



CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES DE SISTEMA HIDRÁULICO PARA UN SISTEMA DE DOBLE TANQUE ACOPLADO

Santiago Esteban Baquero Franco

Andrés Felipe Jaramillo Parra

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C., Colombia

2018

**CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES DE SISTEMA HIDRÁULICO
PARA UN SISTEMA DE DOBLE TANQUE ACOPLADO**

Santiago Esteban Baquero Franco

Andrés Felipe Jaramillo Parra

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Eduard Galvis Restrepo, PhD

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C., Colombia

2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Manuel y Graciela, por acompañarme durante toda mi vida incluyendo el desarrollo de este proyecto. A mis hermanos Rodrigo, Angélica y David por ser un apoyo incondicional en mi vida. A mi familia y amigos por brindarme siempre su apoyo y compañía a lo largo de mi vida. Y, a mi tutor de proyecto Eduard Galvis Restrepo, por su apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto y por ser un excelente guía y consejero en el desarrollo de mi etapa universitaria.

Santiago.

A mis padres Lilia y Jaime, por apoyarme desde un principio y con el mayor esfuerzo posible a salir a delante con mis metas y este proyecto. A mi hermano Javier por ser un apoyo incondicional frente a todo problema presentado. A mi abuela Elsa por su apoyo y cariño que me ha dado desde un comienzo. A mis amigos y familiares que estuvieron apoyándome desde un principio en esta etapa y que siempre me han estado acompañando en cada logro obtenido, a mi tutor Eduard Galvis, por su enseñanza, su apoyo y entrega con el desarrollo de este proyecto y en el transcurso de la carrera.

RESUMEN

Este proyecto está relacionado con el diseño e implementación de un controlador predictivo para un sistema de doble tanque acoplado, fabricado por la empresa Quanser. Partiendo del modelamiento del sistema, la programación del algoritmo del controlador predictivo y la inclusión de restricciones al sistema para dar así mayor robustez a la acción de control. El controlador predictivo tendrá además de restricciones, variables de sintonización para obtener una respuesta eficiente para este tipo de sistemas. También, se mostrará una metodología de toma de datos para distintos escenarios de prueba para las configuraciones que ofrece la planta Quanser. De igual forma, en esta toma de datos, se realiza una confrontación con un controlador proporcional, integral derivativo (PID), para dar así una alternativa para el control de nivel en este tipo de sistemas. De igual forma, se realiza un estudio de las posibles ventajas y desventajas que tiene el controlador predictivo frente al controlador PID. Y, por último, en los anexos se relaciona una guía de laboratorio sencilla, para incentivar el uso de la planta Quanser y motivar el uso e implementación de estrategias de control avanzado, en los cursos de control de la facultad de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás.

TABLA DE CONTENIDO

1.	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	4
1.1	INTRODUCCIÓN	4
1.2	ANTECEDENTES	6
1.3	JUSTIFICACION.....	8
1.4	OBJETIVOS	9
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	9
1.4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
1.5	MARCO CONCEPTUAL	10
2.	DISEÑO	14
2.1	DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO SIN RESTRICCIONES.....	19
2.1.1	MODELO AUMENTADO	19
2.1.2.	OPTIMIZACION	21
2.2	DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES.....	26
3.	RESULTADOS	29
3.1	CONFIGURACIÓN No.1 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.	30
3.2	CONFIGURACIÓN No.2 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.	42
3.3	CONFIGURACIÓN No.3 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.	47
3.4	GUIA DE USUARIO	52
4.	CONCLUSIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXOS	59

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

La siguiente sección contiene la información principal en cuanto a lo que se refiere a la definición y propuesta de este proyecto. En primera instancia, se encuentra la introducción, en donde es posible evidenciar el contexto en el que se va a desenvolver el proyecto. Luego, aparece la sección de los antecedentes donde se verá evidenciado los proyectos relacionados con la temática que se trabaja en este proyecto, seguidamente se encontrará la justificación que da solución a la problemática del proyecto. Después se encuentra el componente de los objetivos que orientan este trabajo, seguido por una breve sección de marco teórico.

1.1 INTRODUCCIÓN

En la Universidad Santo Tomás, en el núcleo académico de control y automatización de la facultad de Ingeniería Electrónica, se desarrollan distintas competencias en el estudiante tales como el diseño y modelamiento de sistemas por métodos de ingeniería de control. Estas competencias permiten desarrollar habilidades para aplicar conocimientos en campos de control moderno o control analógico y además en control digital o control de procesos industriales.

Actualmente se trabajan estrategias de control convencionales tales como la proporcional-integral-derivativa (PID) y diseños de sistemas de control por espacios de estados, pero estas pueden quedar limitadas a la hora de diversificar en otros métodos que puedan ser eficientes en el medio que se quiera utilizar y que puedan aportar distintas o mejores respuestas para la persona que desee diseñar un sistema de control.

Es importante que las instalaciones de las instituciones de educación superior cuenten con herramientas modernas en el diseño de controladores, que estén a la vanguardia de los sistemas industriales en los que se requieran implementar. Además de esto, se busca que estas herramientas sean versátiles para la enseñanza del componente teórico y práctico de esta área de la ingeniería, en donde las técnicas de modelamiento de sistemas de control se ven reducidas a sistemas que tienen naturaleza lineal, por lo que están expuestos a llegar a ser poco eficientes si se trabaja con un sistema el cual pueda tener variaciones en su entorno. Un ejemplo claro de estos sistemas de comportamiento no lineal, es el de un sistema de tanques acoplados, ya que el comportamiento dinámico depende del nivel resultante que provenga de

otros tanques, ante esto la estrategia de control debe considerar que cada parámetro puede mostrar una dependencia fuerte de otros [11].

Existe una estrategia de control avanzado llamada control predictivo, la cual es una alternativa para sistemas de comportamiento no lineal como una planta de doble tanque acoplado y que además ofrece una mejora eficiente de la respuesta que se desea obtener en este sistema. El control predictivo ofrece la posibilidad, de predecir respuestas futuras ya previamente calculadas por un modelo y horizonte de predicción, además este controlador permite agregar restricciones y variables de sintonización al sistema, lo que da robustez al controlador, ideal para la implementación en este tipo de sistemas.

Teniendo en cuenta el contexto descrito, con la realización de este proyecto se busca desarrollar un algoritmo de control predictivo para un sistema de doble tanque acoplado implementado en las plantas Quanser disponibles en la Universidad Santo Tomás, observando su comportamiento y respuesta. Además, determinando su eficiencia frente a un controlador PID y las ventajas que puede tener frente a este. Esto con la finalidad de dar una alternativa en la impartición de las temáticas de control avanzado de la Universidad en un ámbito teórico y práctico. Igualmente se busca otorgarle al proyecto un efecto netamente académico, en donde se realizan distintas pruebas en el sistema de doble tanque acoplado fabricado por Quanser, observando específicamente el comportamiento de la variación de los horizontes de predicción y de control, como parámetros de sintonización que actúan sobre el desempeño del controlador.

1.2 ANTECEDENTES

El control predictivo es considerado una técnica de control muy robusta para sistemas lineales y con retardos, los cuales normalmente son encontrados en la industria de procesos. Este tipo de técnica no era considerada eficiente para sistemas no lineales y rápidos, pero en los últimos años, se ha demostrado importantes y significativos avances en la tecnología industrial [1].

La formulación más conocida que usa ese tipo de modelo es el control predictivo Generalizado (GPC), es uno de los más utilizados en campos industriales, pudiendo operar a plantas inestables y de fase no mínima a la vez que incorpora la idea de horizonte de control y la consideración de incremento de la señal de control. El siguiente es el modelo de convolución, el cual engloba los modelos de respuesta impulso y respuesta ante una excitación de un escalón. Al igual que el GPC, el modelo de convolución tiene un gran éxito en las aplicaciones industriales, ya que tienden a ser muy intuitivos y permiten un procedimiento de identificación relativamente práctico y sencillo. Por último, está el modelo por espacio de estados, el cual también es denominado de descripción interna, tienen o se le ameritan los resultados teóricos más relevantes relacionados a la estabilidad de un sistema. Este modelo puede ser usado tanto para problemas mono variables y puede extenderse muy fácilmente al campo de los sistemas no lineales [2]. Otra aplicación que tiene el control predictivo actualmente en los campos en los que opera es la medición de perturbaciones, las cuales son cambios externos de las variables que se pueden medir en el desarrollo de un proceso de una planta, otro aspecto que determina la aparición de perturbaciones son los procesos cuyas salidas se ven afectadas por variaciones en el régimen de carga, ya sea en campo petro-químico, área de refinería, sectores de pulpa y papel, procesado de alimentos, gas, minería, hornos, metalurgia, industria automotriz, entre otras[2].

Una aplicación compleja, es la de tanques acoplados. En [5], se presentó un modelo en donde se fijan las restricciones del sistema y se realizan diferentes simulaciones variando los parámetros de sintonía del controlador. Así mismo, para un sistema de las mismas características, en [6], se desarrolló una estrategia de control predictivo adaptivo para un sistema de tanques acoplados, el cual es capaz de hacer que la salida del sistema sea igual a una salida convenientemente predefinida. Esta técnica es válida para sistemas que pueden tener grandes retardos, que sean inestables o no lineales. Para sistemas que trabajan con

sistemas multivariables, se evidenciaron casos como el de [15] en donde se realizó un controlador predictivo óptimo distribuido (DOMC) para cuatro tanques acoplados, en el cual se dividió en subsistemas para cada tanque y se implementó una red de comunicación local para la interacción de estos controladores.

De igual manera, en [14], se presenta una comparación entre dos técnicas lineales de controladores conocidos como PI-LQR y MPC con restricciones suaves aplicada a un proceso de cuatro tanques acoplados, cuyas características principales son las no linealidades, múltiples entradas y salidas y una dinámica lenta. El modelo es linealizado alrededor de un punto de funcionamiento utilizando un método de optimización, denominado mínimos cuadrados.

En [19], se presentó un trabajo de tesis que plantea la implementación de un controlador predictivo basado en modelos, en una plataforma industrial tomando como ejemplo de aplicación una planta piloto de cuatro tanques acoplados. Se ha realizado el control del modelo de un módulo de cuatro tanques y el control predictivo de un modelo de un secador de disco rotatorio usado en la industria de harina de pescado.

Actualmente, el control predictivo utiliza diferentes tipos de modelos que se utilizan para capturar la dinámica del proceso, aunque todos tienen el mismo principio o finalidad, el cual es la realización o formulación paso a paso de algoritmos de control capaces de solventar las necesidades de cada sistema en donde sean aplicados, todos son ligeramente distintos, se presentaron tres modelos de diseño de algoritmos de control predictivo [2]: Función de transferencia, modelos de convolución y modelo de espacio de estados.

En [16], se desarrolla una estrategia supervisada de control predictivo descentralizado para resolver los problemas relacionados con el cierre y las operaciones de apertura de los sistemas de canales. La evaluación es cumplida mediante simulación numérica en dos casos de estudio en una variedad de escenarios.

En [19], se desarrolla una estrategia de control predictivo basados en funciones de Laguerre. Además, se realiza una comparación entre una estrategia de control predictivo y la realizada en funciones de Laguerre, determinando las ventajas que puede tener la implementación entre estos dos tipos de controladores.

1.3 JUSTIFICACION

Respecto a los tipos de control, en el ámbito industrial se observa que la topología de control más utilizada es el control proporcional - integral - derivativo (PID), ya que este es uno de los métodos de control que asegura tres de las más importantes respuestas de un sistema de control (estabilidad, error cero y respuesta rápida) y que además de esto, es de muy fácil implementación. Pero se ha observado que el control PID en el campo de implementación académica, es un método limitado si se introduce en sistemas que no sean lineales. Se buscará por medio de este proyecto, diseñar una estrategia de control predictivo, la cual es una alternativa en el diseño de sistemas de control avanzado, mirando los aspectos y respuestas fundamentales que puedan tener estos sistemas y que fueron mencionadas anteriormente.

Además, poder observar las ventajas y desventajas que pueda tener la estrategia de control predictivo ante un controlador PID, en cuanto a diseño del modelo, simulaciones, cambios de consigna, rechazo a perturbaciones y resultados de las respuestas que puedan tener cada uno de los controladores y, por último, determinar cuál de estos dos controladores es más eficiente en términos de disminución de error en estado estacionario, rechazo a perturbaciones y velocidad de acción de control. Esto se realizará por medio de una planta Quanser® de tanques acoplados, la cual hace parte de las últimas adquisiciones hechas por la Universidad Santo Tomás en el núcleo de modelamiento y control, y en la cual, no se ha implementado una estrategia de control avanzado como la del control predictivo, por lo que se realizará una documentación detallada de distintos escenarios experimentales, para así dar a conocer y dejar evidencia de las distintas alternativas y variables de sintonización que puede tener este controlador frente al convencional PID.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar de un sistema de control predictivo con restricciones para el sistema hidráulico de dos tanques acoplados

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener el modelo matemático para la planta de doble tanque acoplado.
- Diseñar el controlador predictivo del sistema teniendo en cuenta los horizontes de predicción, de control y la función de coste para fines de optimización.
- Implementar en el sistema de doble tanque acoplado, el control predictivo previamente calculado y simulado numéricamente para posteriormente observar su comportamiento.
- Diseñar e implementar un controlador PID para el sistema de doble tanque acoplado.
- Implementar una metodología de toma de datos de los principales parámetros de medición para los tanques acoplados.
- Observar y comparar los resultados obtenidos por la planta con la implementación de los dos tipos de control.
- Redactar una sencilla guía de laboratorio la cual permita orientar y ejecutar la práctica de un sistema de control predictivo desde el ámbito académico.

1.5 MARCO CONCEPTUAL

CONTROL PREDICTIVO

El control predictivo, es una estrategia de control avanzado que se ha impuesto en las últimas décadas en la industria de procesos como la mejor opción para controlar un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas satisfaciendo además un conjunto de restricciones de operación del mismo. Este controlador ofrece la posibilidad de predecir futuras respuestas con base en un modelo de predicción y una función de coste. Además, tiene la opción de sintonización de una ventana de predicción en la cual estarán ubicadas las futuras respuestas del sistema en forma vectorial. También ofrece variables de sintonización y aplicación de restricciones al sistema, lo que lo hace una técnica de control avanzada con distintas y grandes ventajas de sintonización frente a otras estrategias de control [2].

Las estrategias de control predictivo lineal, incluidas en diferentes productos comerciales están siendo aplicadas con éxito en los últimos años. Los retos existentes consisten en el diseño de algoritmos de control no lineal aplicables, de fácil implementación y haciendo uso de modelos no lineales para una operación óptima del proceso en todo su rango de funcionamiento. [12]

Para la implementación de un control predictivo y la aplicación del mismo se tienen en cuenta ciertas herramientas de análisis matemáticos, para desarrollar y usar un modelo matemático el cual reconozca que el proceso que se utiliza nos deje predecir la evolución futura de las variables controladas sobre un horizonte de predicción. Este modelo tiene la facilidad de calcularse de forma lineal o no lineal en tiempo continuo o discreto. También se tiene que hallar una función de coste la cual nos expresa el criterio de optimizar el control realizado, por si existen algún comportamiento diferente en sistema a lo largo del horizonte de predicción y permita optimizarlo. Y finalmente se le aplicaran las restricciones las cuales indican los límites dentro de los cuales debe transcurrir la evolución de las señales que rigen el comportamiento del sistema. Estas fronteras se rigen por límites físicos de los actuadores, por razones de seguridad entre otras razones [13].

SISTEMA DE DOBLE TANQUE ACOPLADO

El almacenamiento de fluidos se lleva a cabo por medio de tanques que deben cumplir con una serie de especificaciones dependientes de las propiedades del fluido o tipo de componente que se requiera almacenar, con el objetivo de la realización de tratamientos que optimicen la calidad del producto antes de salir al mercado. Con el pasar de los años se han ido modernizando y hoy en día encontramos diversos tipos de tanques que se acoplan a los requerimientos y parámetros establecidos a la hora de almacenar un determinado producto [7].

Para conocer las variables de un sistema de tanques acoplados se presenta en la figura1.

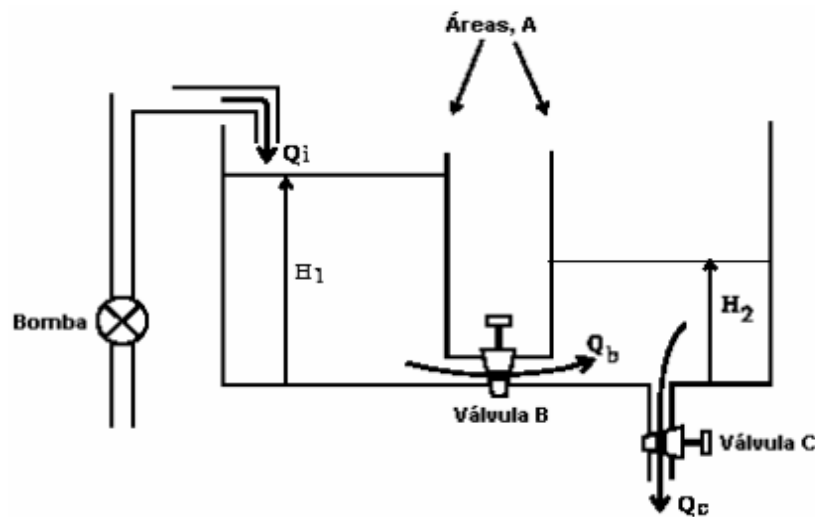


Figura 1. Sistema de tanques acoplados [2].

La figura 1 muestra el modelo básico de un sistema de tanques acoplados en donde las variables de almacenamiento de fluidos de estos tanques serán la altura o nivel del fluido en los dos tanques (H_1 y H_2) y el flujo que ingresa al sistema definido como (Q_i) y el flujo que sale del sistema definido como (Q_o), por medio de válvulas controladas, una para la conexión entre los dos tanques definida como válvula B y una para la salida total del sistema definida como válvula C [8].

Para la medición de variables de nivel, los tanques cuentan con escalas volumétricas incorporadas en el material en el cual se encuentre hecho o fabricado. En cuanto a la medición del flujo que entra y sale como parámetro de entrada y salida del sistema se posee unos sensores de presión, los cuales poseen la capacidad de calibración en casos de cambios con respecto a variables externas, tales como los cambios de temperatura ambiente, lo cual causa una posible dilatación del fluido [9].

TANQUES ACOPLADOS.

¿CÓMO FUNCIONAN?

El sistema de doble tanque acoplado fabricado por la empresa Quanser fue diseñado en asociación con Prof. Karl Åström y Prof. Karl Henrik Johansson, El sistema de tanques consta de una bomba con dos tanques. Cada tanque Está equipado con un sensor de presión para medir el nivel del agua. La bomba impulsa el agua desde La cuenca inferior hasta la parte superior del sistema. Dependiendo de cómo Se configuran válvulas de salida, el agua fluye entonces hacia el depósito superior, Tanque inferior, o ambos.

La velocidad de flujo también se puede cambiar usando el flujo de salida Con diferentes diámetros [10].

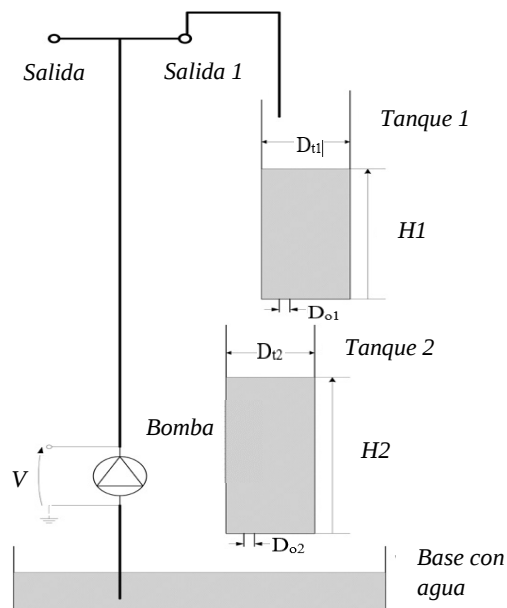


Figura 2. Diagrama de bloques de la planta tomado de [10].

La capacidad de dirigir el flujo de agua, junto con los orificios de salida variable, permite varias configuraciones de una sola salida de entrada única (SISO). Además, dos o más tanques acoplados se pueden combinar juntos para experimentos MIMO (Múltiple Input Múltiple Output). Los problemas únicos que implican dinámica de fluidos, presión y retrasos de tiempo se evidencian eficazmente con este sistema.



Figura 3. Descripción grafica de la planta y sus componentes tomado de [10].

2. DISEÑO

El diseño y ejecución del proyecto se divide en diferentes etapas. Iniciando con una introducción respecto al concepto de control predictivo, en donde se realizó una conceptualización del tema del controlador predictivo y sus características. Además, se realizó una pequeña comparación conceptual con tipos de control tales como el PI o PID, tomando énfasis en aspectos de implementación y la matemática que se emplea. Seguidamente se realizaron simulaciones en Matlab/Simulink con diferentes sistemas para comparar su comportamiento frente a un periodo de muestreo, cambio de consigna y perturbación establecidas para todos los controladores.

Con el objeto de ejemplificar el uso del control predictivo se utilizó el MPC toolbox de Matlab, en donde se puede observar el resultado y el diagrama de bloques utilizado para las simulaciones de tres plantas diferentes en las figuras 4 y 5.

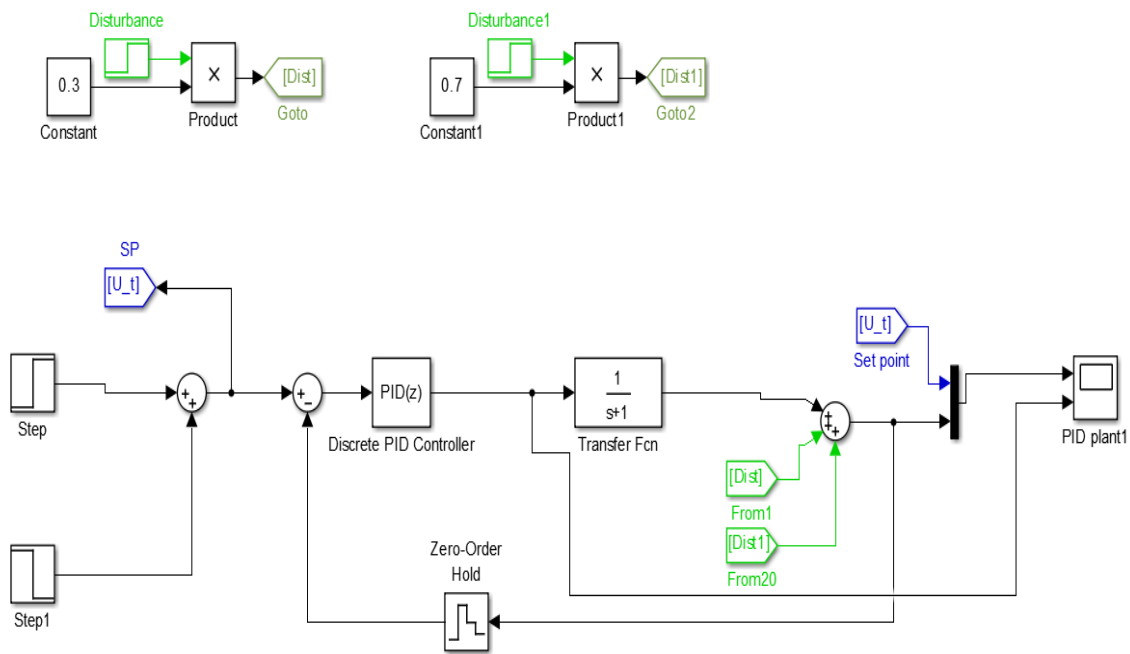


Figura 4. Diagrama de bloques para controlador PID.

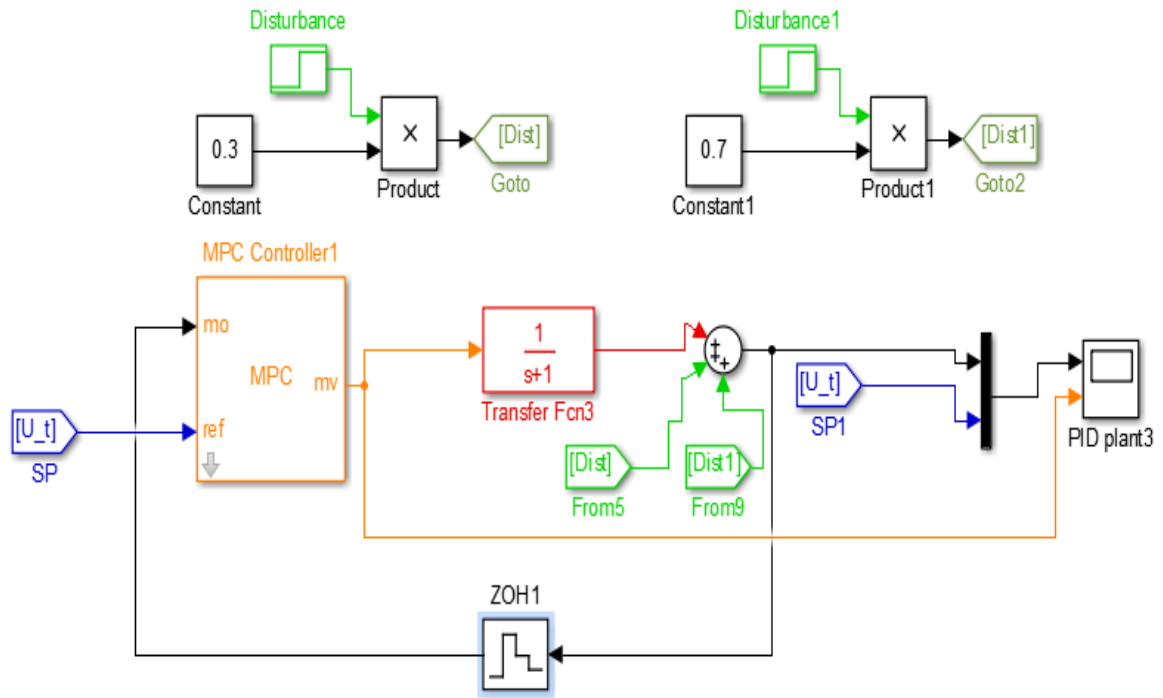


Figura 5. Diagrama de bloques para controlador predictivo MPC.

Planta 1

$$G(s) = \frac{1}{s + 1}$$

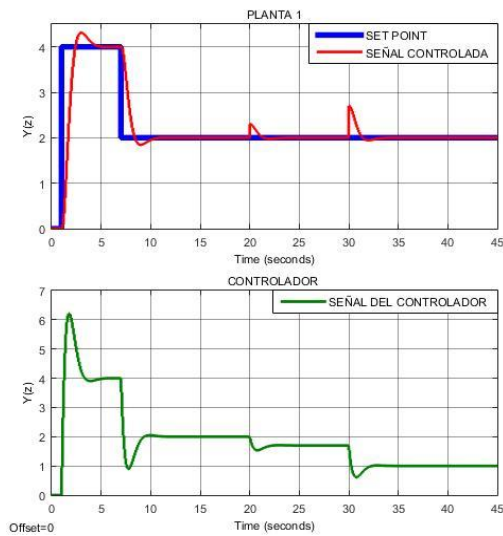


Figura 6. Control PID para la planta 1.

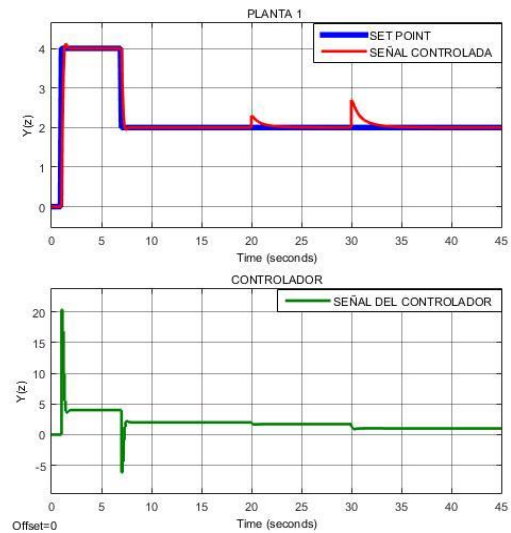


Figura 7. Control predictivo para la planta 1.

Planta 2

$$G(s) = \frac{1}{s^2}$$

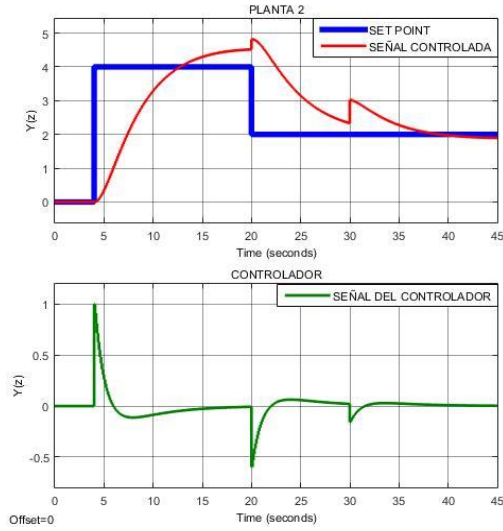


Figura 8. Control PID para la planta 2.

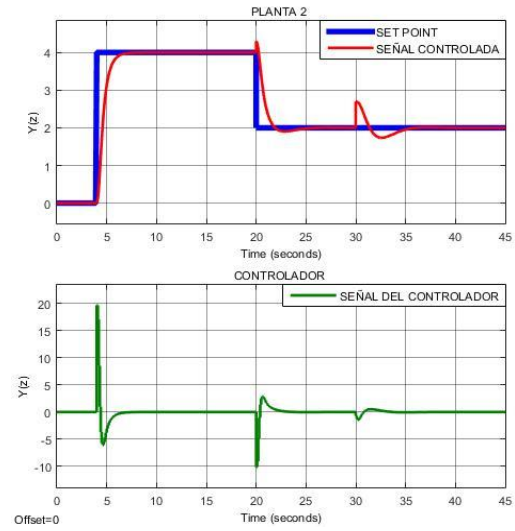


Figura 9. Control predictivo para la planta 2.

Planta 3

$$G(s) = \frac{1}{s^3}$$

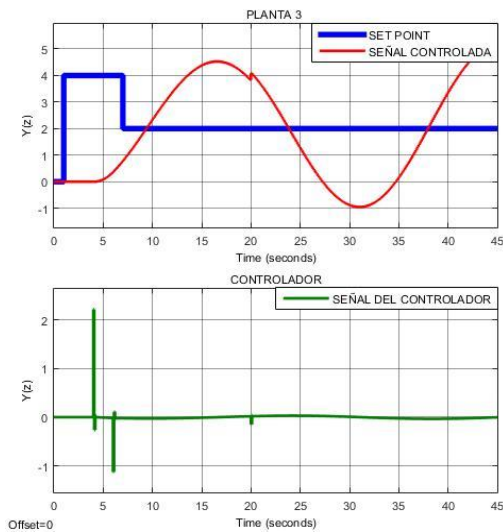


Figura 10. Control PID para la planta 3.

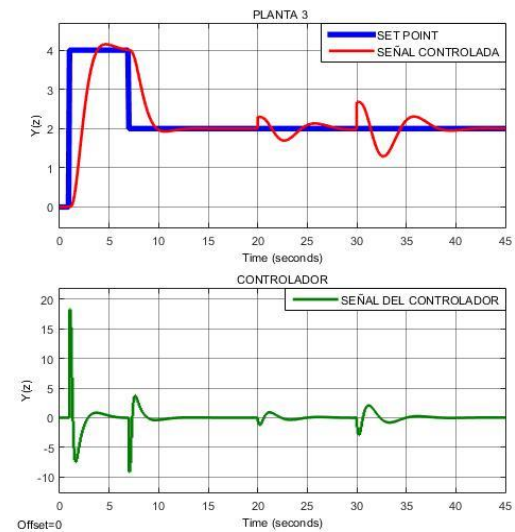


Figura 11. Control predictivo para la planta 3.

Como se pudo observar, en la tercera planta con el control PID no logro controlar el sistema debido a que contiene un polo adicional, mientras que con el controlador predictivo logra controlar el sistema y sus perturbaciones.

Consecutivamente, se hizo una familiarización al manejo y componentes principales de la planta de doble tanque acoplado de Quanser, para esto se realizó el modelo de la planta con ayuda de workbook del estudiante que nos ofrece la empresa. Además de esto, gracias a la facilidad que ofrece la empresa Quanser para trabajar con Matlab se realizaron unos ejemplos de controladores ya implementados en la planta, observando su comportamiento y respuestas ante diferentes puntos de referencia. A continuación, se pasó a la implementación de un control PID de la planta, con el cual se obtuvo una gráfica del controlador como se observa en la figura 11. Cabe resaltar que las constantes fueron obtenidas por un proceso de sintonización numérica del bloque PID de Matlab. También se observó que la constante derivativa era casi cero por lo que se omitió y se dejó un controlador PI.

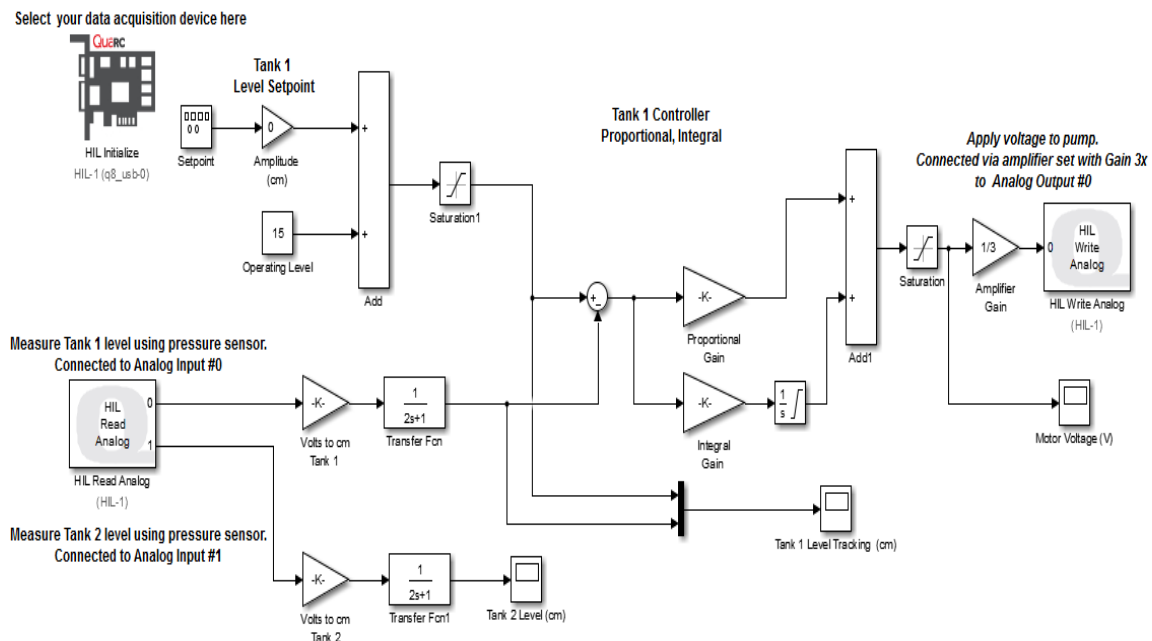


Figura 12. Diagrama de bloques del control PI implementada en la planta Quanser.

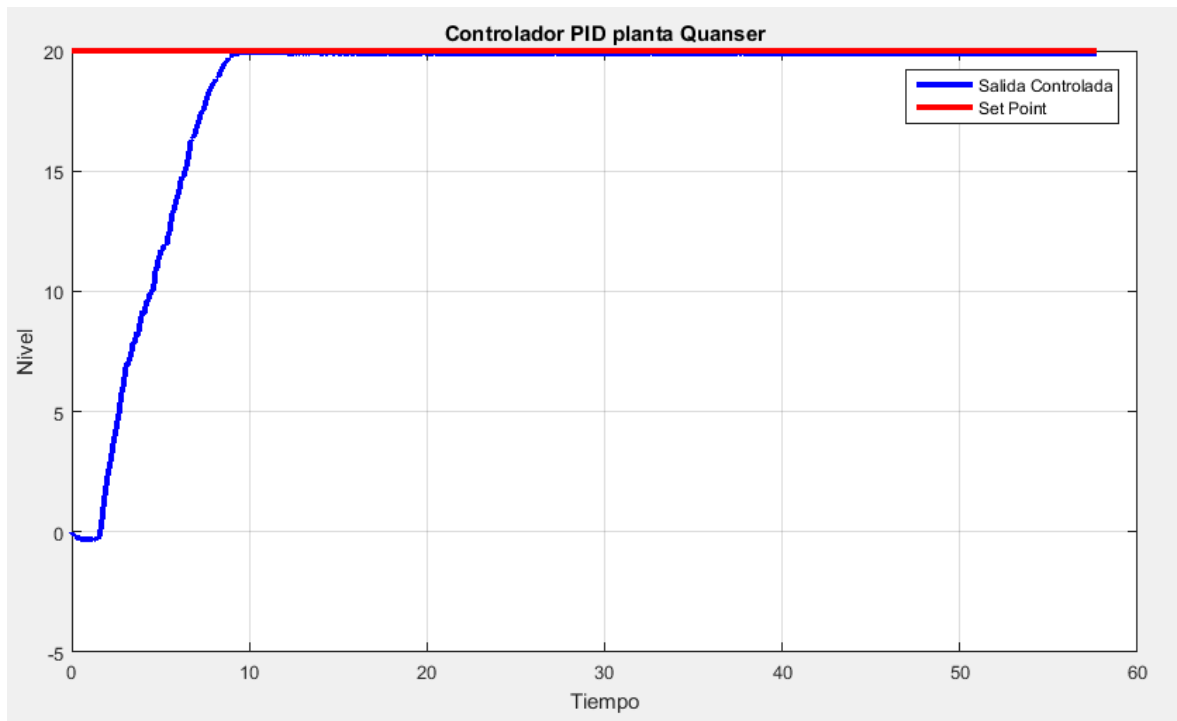


Figura 13. Grafica del control PI implementada en la planta Quanser.

En las siguientes etapas se realizó la implementación del algoritmo de control predictivo con y sin restricciones al sistema, en donde se dio una conceptualización de los componentes necesarios para cada algoritmo y se realizaron simulaciones en las plantas trabajadas anteriormente para así poder observar su funcionamiento.

Después de observar su funcionamiento con este tipo de control y adecuada familiarización, se inició con la siguiente etapa, la cual consta de realizar un algoritmo en Matlab ya que el bloque MPC toolbox no permite trabajar con sistemas que están recibiendo información en tiempo real como la planta Quanser, es por esto que fue necesario programar todo el algoritmo en una función de Matlab para una futura implementación en la planta.

2.1 DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO SIN RESTRICCIONES.

2.1.1 MODELO AUMENTADO

Para el diseño del algoritmo de control predictivo sin restricciones, se optó por el método de espacios de estados, ya que para comenzar se realizará el control en un solo tanque y este método es de gran simplicidad trabajar con sistemas así ya que son sistema de una entrada y una salida (SISO). Para esto, se parte de las ecuaciones de estado que surgen del modelo matemático de la planta, como se muestra en la ecuación 1.

$$\begin{aligned}x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k)\end{aligned}\tag{1}$$

Donde u será la variable de entrada o variable a manipular, y será la salida⁽²⁾ del sistema y x_m será el vector de estado. Además, se debe tener en cuenta que, debido al principio de retroceso, la entrada $u(k)$ no puede afectar la salida $y(k)$ por lo que se asume una matriz D_m igual a 0.

Como se requiere obtener una predicción de la variable de control se realiza una operación de diferencia a las ecuaciones de estado, para así realizar un incremento a la variable de entrada $u(k)$ y al vector de estado x_m . Esta se obtiene de la diferencia entre el estado actual de la variable y su estado pasado.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)\tag{3}$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)\tag{4}$$

El paso siguiente es la de incorporar $\Delta x_m(k)$ en la salida $y(k)$, también es necesario realizar un nuevo vector de estado que comprenda el cambio de la variable x_m .

$$x(k) = [\Delta x_m(k) \ y(k)]^T\tag{5}$$

$$y(k+1) - y(k) = C_m(x_m(k) - x_m(k-1)) = C_m \Delta x_m(k)$$

$$= C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (6)$$

Por último, se implementan las nuevas ecuaciones de estado y se obtienen las matrices aumentadas de estado, estas se muestran a continuación.

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (7)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} o_m & 1 \end{bmatrix}}^c \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como se puede observar el cálculo del modelo aumentado puede llegar a ser un poco tedioso dependiendo de las dimensiones de las matrices del modelo, es por esto que se tomó el algoritmo propuesto en el libro de Liuping Wang [17], en donde realiza una función en Matlab que toma como parámetros de entrada a las matrices iniciales del modelo y obtiene sus correspondientes matrices aumentadas.

Para el cálculo del modelo aumentado del modelo original que ofrece la empresa Quanser para la planta de doble tanque acoplado, tomamos el modelo de la planta Quanser, el cual muestra la relación entre la altura del nivel de fluido en los tanques $H(s)$ y el voltaje suministrado por la bomba $V(s)$, y define la función de transferencia para los tanques del sistema [10], la cual se muestra en la ecuación 9.

$$G(s) = \frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K_{DC}}{0.1592 s + 1} \quad (9)$$

Seguidamente aplicamos el algoritmo de obtención del modelo aumentado de [17] para el sistema de doble tanque acoplado.

$$A_e = \begin{bmatrix} 0.9969 & 0 \\ 6.2617 & 1 \end{bmatrix} \quad B_e = \begin{bmatrix} 0.0005 \\ 0.0031 \end{bmatrix} \quad C_e = [0 \quad 1] \quad (10)$$

2.1.2. OPTIMIZACION

La optimización del controlador predictivo se refiere al cálculo de la variable de control óptima para el cálculo de las salidas predichas del sistema. Dicha predicción esta descrita como una ventana de predicción, en donde su longitud está dada por el horizonte de predicción N_p , el cual representa el número de muestras que serán las variables de salidas predichas y que estarán ubicadas en la ventana de predicción. Ahora queda ajustar la trayectoria de la señal de control futura por medio del horizonte de control N_c . La forma general de la ecuación de la trayectoria queda descrita como

$$\Delta u(k), \Delta u(k+1), \Delta u(k+2), \dots, \Delta u(k+N_c-1) \quad (11)$$

Aplicando el concepto de optimización, las futuras variables de estado serán calculadas por.

$$\begin{aligned} x(k_i+1|k_i) &= Ax(k_i) + B\Delta u(k_i) \\ x(k_i+2|k_i) &= Ax(k_i+1|k_i) + B\Delta u(k_i+1) \\ &= A^2x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i+1) \\ &\vdots \\ x(k_i+N_p|k_i) &= A^{N_p}x(k_i) + A^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + A^{N_p-2}B\Delta u(k_i+1) + \\ &\dots + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i+N_c-1) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde k_i es la corriente de tiempo. Para las variables de salida predichas se sustituye igual que para el caso anterior.

$$\begin{aligned} y(k_i+1|k_i) &= CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \\ y(k_i+2|k_i) &= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CAB\Delta u(k_i+1) \\ y(k_i+3|k_i) &= CA^3x(k_i) + CA^2B\Delta u(k_i) + CAB\Delta u(k_i+1) \\ &\quad + CB\Delta u(k_i+2) \\ &\vdots \\ y(k_i+N_p|k_i) &= CA^{N_p}x(k_i) + CA^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + CA^{N_p-2}B\Delta u(k_i+1) \\ &\quad + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i+N_c-1) \end{aligned} \quad (13)$$

Todas las variables predichas están formuladas en términos de la corriente de tiempo o la información de la variable $x(k_i)$ y la trayectoria de control futura está dada por $\Delta u(k_i+j)$ donde $j=0,1,\dots, N_c-1$ y se procede a definir los siguientes vectores.

$$Y = [y(k_i + 1|k_i) \ y(k_i + 2|k_i) \ y(k_i + 3|k_i) \ ... \ y(k_i + N_p|k_i)]^T \quad (14)$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i) \ \Delta u(k_i + 1) \ \Delta u(k_i + 2) \ ... \ \Delta u(k_i + N_c|k_i)]^T \quad (15)$$

Ahora se procede a reunir la ecuación de variables de salida predichas en una matriz compacta y así formar el modelo de predicción del controlador, esta matriz está dada por [17].

$$Y = F x(k_i) + \phi \Delta U \quad (16)$$

Donde

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (17)$$

A continuación se define la función de coste, la cual tiene como objetivo principal la reducción al mínimo del error entre la variable de entrada o valor de consigna y la variable de salida del ΔU . Esta función está definida como

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad (18)$$

Donde R_s será el vector de entrada y R será la matriz de penalización de la variable de control en la cual su dimensión depende del horizonte de control N_c . para encontrar el valor óptimo de ΔU es necesario hacer una minimización de la función de coste.

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\phi^T \phi + R) \Delta U$$

$$\frac{dJ}{d\Delta U} = -2\phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\phi^T \phi + R) \Delta U \quad (19)$$

$$\frac{dJ}{d\Delta U} = 0 \quad (20)$$

Con lo que obtenemos la solución óptima para la señal de control. (21)

$$\Delta U = (\phi^T \phi + R)^{-1} \phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (22)$$

Para la implementación del modelo de predicción en Matlab se opta por la implementación del algoritmo de obtención del modelo de predicción de [17]. Se realiza una función que toma como parámetros de entrada el modelo aumentado, el horizonte de predicción y el horizonte

de control. Se realiza la misma prueba sobre el modelo de la planta Quanser y se obtienen las siguientes matrices.

$$\phi^T \phi = \begin{bmatrix} 0.0270 & 0.0250 & 0.0231 & 0.0212 \\ 0.0250 & 0.0233 & 0.0215 & 0.0197 \\ 0.0231 & 0.0215 & 0.0199 & 0.0183 \\ 0.0212 & 0.0197 & 0.0183 & 0.0169 \end{bmatrix} \quad \phi^T F = \begin{bmatrix} 53.8825 & 0.6556 \\ 49.9966 & 0.5847 \\ 46.1182 & 0.5268 \\ 42.2669 & 0.4718 \end{bmatrix}$$

$$\phi^T R = \begin{bmatrix} 0.6456 \\ 0.5847 \\ 0.5268 \\ 0.4718 \end{bmatrix}$$

Cabe resaltar que el algoritmo de modelo de predicción planteado en [17] ya realiza las operaciones entre matrices descritas en la solución óptima, todo esto para simplicidad en la obtención de esta solución. Este ejemplo se realizó con un horizonte de control $N_c = 4$ y un horizonte de predicción $N_p = 20$, es claro decir que en [17] siempre recomiendan que en el diseño del controlador $N_c \leq 4N_p$.

Otro factor importante para tener en cuenta en el contexto de la sintonización del controlador, es la obtención de un valor estimado de rw , el cual es el parámetro de penalización que se le configura al controlador y que regula la velocidad de la variable de control en un periodo de muestreo determinado. El valor de rw puede ser calculado mediante un proceso de normalización mediante la estimación máxima de valores permitidos (MAVE) planteado en (21). El MAVE captura la estimación de la variación de la cantidad de una entrada o salida. Este cálculo estimado relaciona el error estimado e_{MAVE} , que puede tener la desviación del nivel de agua ante un valor de consigna definido y el cambio en la variable de control estimado ΔU_{MAVE} en un periodo de muestreo definido. La ecuación de valor estimado normalizado para el parámetro de penalización rw está definida como (21):

$$rw \text{ (normalizado)} = \frac{1}{(\Delta U_{MAVE})^2} \cdot (e_{MAVE})^2 \quad (23)$$

El último paso, es la implementación del algoritmo en una función de Matlab/Simulink, en la cual se utilizarán los pasos anteriores, es decir, el modelo aumentado y el modelo de predicción, que serán guardadas como variables con memoria, para así poder hacer un lazo de control de realimentación. Además de esto se dotará a la función de la ecuación de solución óptima ΔU , la cual será la salida del controlador predictivo. A continuación, se mostrará las pruebas realizadas al controlador predictivo sobre plantas trabajadas anteriormente con el MPC toolbox de Matlab. También se realizará una comparación del desempeño de este controlador frente al MPC toolbox y el controlador PID.

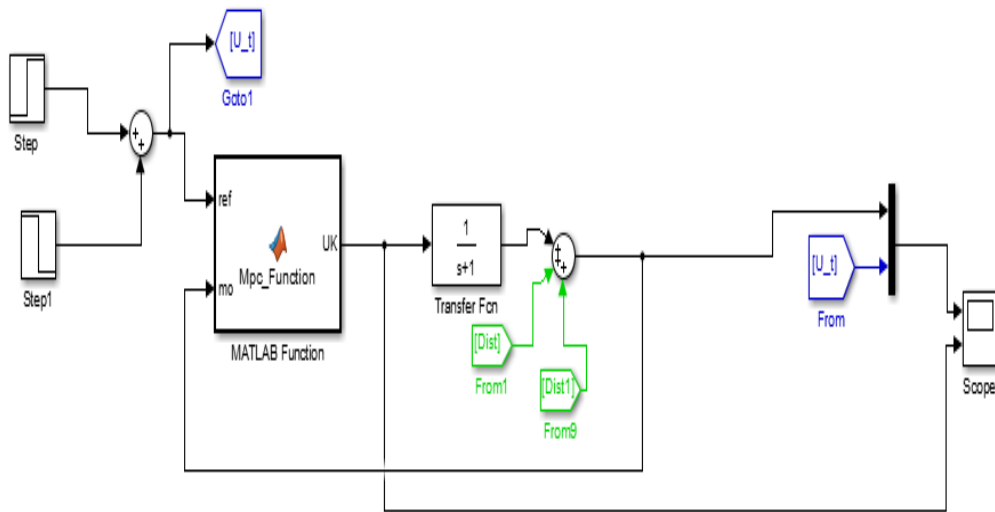


Figura 14. Diagrama de bloques controlador predictivo implementado en una función de Matlab.

Planta 1

$$G(s) = \frac{1}{s+1}$$

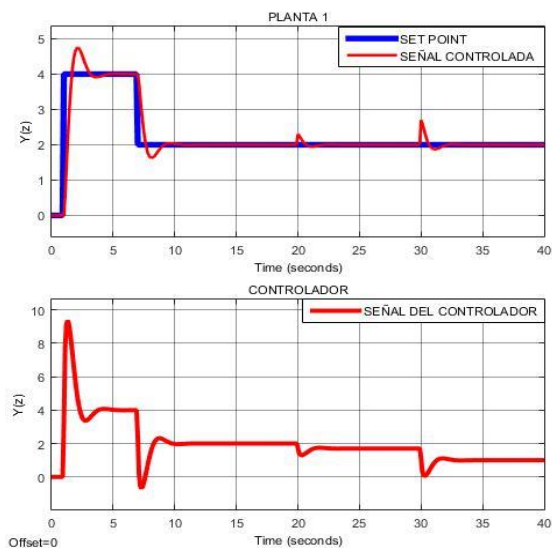


Figura 15. Controlador MPC para la planta 1.

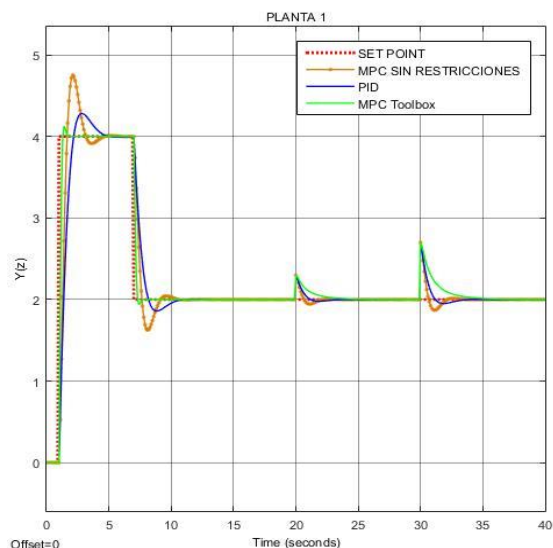


Figura 16. Comparación entre controladores para la planta 1.

Planta 2

$$G(s) = \frac{1}{s^2}$$

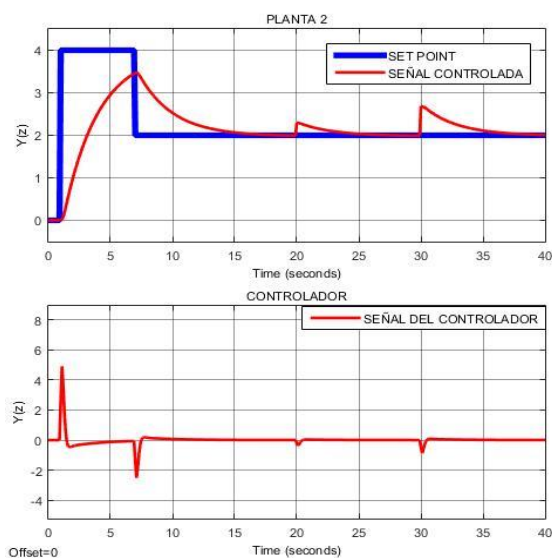


Figura 17. Controlador MPC para la planta 2.

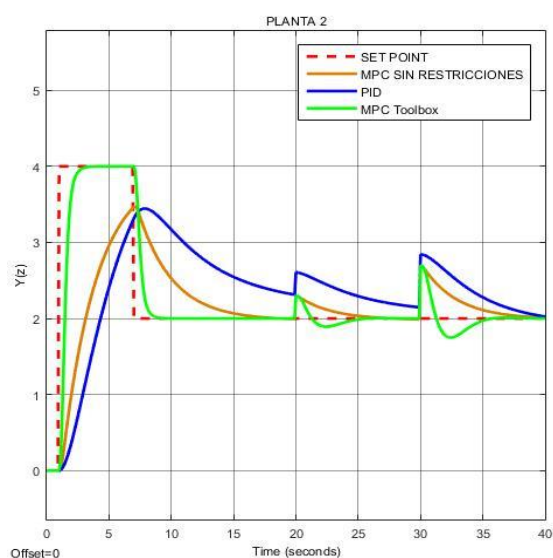


Figura 18. Comparación entre controladores para la planta 2.

Para un sistema de orden mayor, se observa que tanto el controlador PID, como el algoritmo realizado en la función de Matlab no logran controlar el sistema debido a que carecen de polos suficientes para realizar este control, mientras que el controlador del MPC toolbox si logra controlar el sistema, tal y como se muestra en la figura 18.

2.2 DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL PREDICTIVO CON RESTRICCIONES.

Un controlador predictivo ofrece como valor agregado a su característica como controlador avanzado la adición de restricciones sobre el sistema que se esté trabajando. Una restricción se define como unos límites pre-establecidos por el usuario en forma matricial para la mejora y robustez del controlador; estas se utilizan principalmente para regular las salidas del controlador, la velocidad de la acción de control y su ventana de magnitud en la que la acción de control puede otorgar la salida del controlador.

Para otorgar al controlador predictivo la capacidad de tener restricciones a su acción de control en el sistema, fue necesario resolver un problema de programación cuadrática para la función de optimización del controlador, en donde mediante una ecuación de minimización se pueden incorporar también restricciones expresadas en desigualdades para el cambio de la variable de control y su magnitud. Cabe resaltar que existen varias restricciones que se le pueden dar al sistema, tales como las restricciones a la salida, a la entrada, de magnitud y las anteriormente mencionadas que son las que se trabajaron para este algoritmo de control. La función de minimización se expresa a continuación.

$$J = \frac{1}{2} \eta^T H \eta + \eta^T f \quad (24)$$

$$A\eta \leq b$$

Donde H y f son las matrices que parten de la función de optimización ΔU , η será la variable de optimización, es decir, ΔU y $A\eta$ y b serán las matrices que contendrán las restricciones del sistema. El tamaño de η o ΔU estará dado por el horizonte de control y este determinara a su vez el tamaño de A . la matriz b , contendrá los rangos de la desigualdad o inecuación que se quiera incorporar al sistema.

Al identificar las matrices H y F de la función de optimización y saber interpretar las restricciones del sistema, se pasa a la minimización y solución cuadrática del problema, la que se trabajó por dos métodos distintos, el primero fue la utilización del comando *quadprog* de Matlab, el cual resuelve un problema de programación cuadrática por medio de una función de minimización, y al cual le ingresan como parámetros los elementos anteriormente mencionados (H , f , A y b). Se realizaron pruebas de este comando con solo la inclusión de los parámetros H y f , y se observó que la solución numérica que otorgaba el comando *quadprog* era igual a la trabajada en la función de optimización ΔU en el controlador sin restricciones.

Para la implementación de esta solución numérica en Matlab Simulink fue necesario recurrir al algoritmo de Hildreth, planteado en [17], el cual se encarga de la optimización de la ecuación de la ecuación que define la ley de control para este controlador, mediante un trabajo de minimización de la ecuación la cual recibe los parámetros descritos en la ecuación 24 y que da solución al problema de programación cuadrática que se presenta al añadir restricciones al sistema. Al igual que para el controlador predictivo, se realizó el algoritmo en una función de Matlab, incorporando las matrices del modelo aumentadas y el modelo de predicción para así conformar las nuevas matrices H y f que solicita el algoritmo de Hildreth, además de las restricciones expresadas de forma matricial. A continuación, se mostrarán las simulaciones a las plantas trabajadas con el controlador sin restricciones y la comparación con los demás controladores.

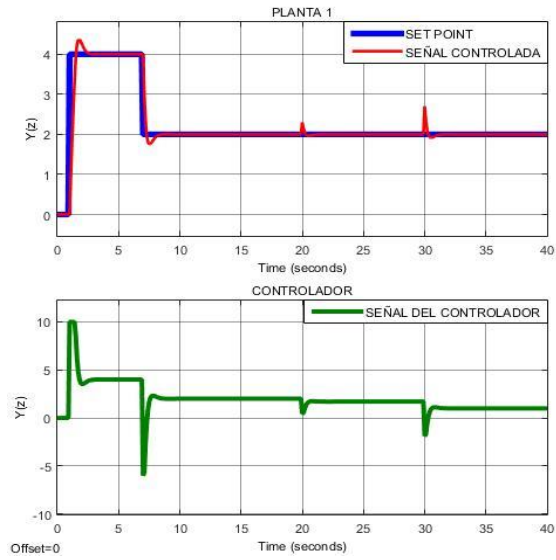


Figura 19. Controlador MPC con restricciones para la planta 1.

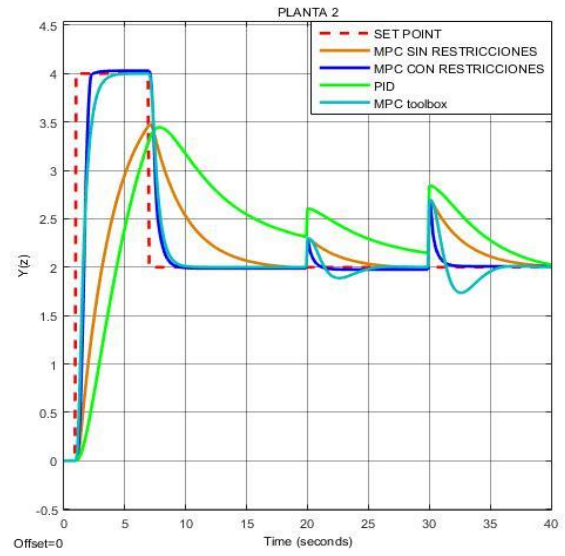


Figura 22. Comparación entre controladores para la planta 2.

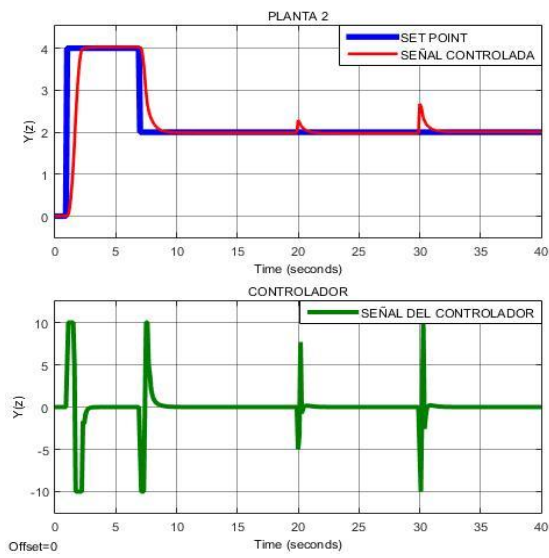


Figura 21. Controlador MPC con restricciones para la planta 2.

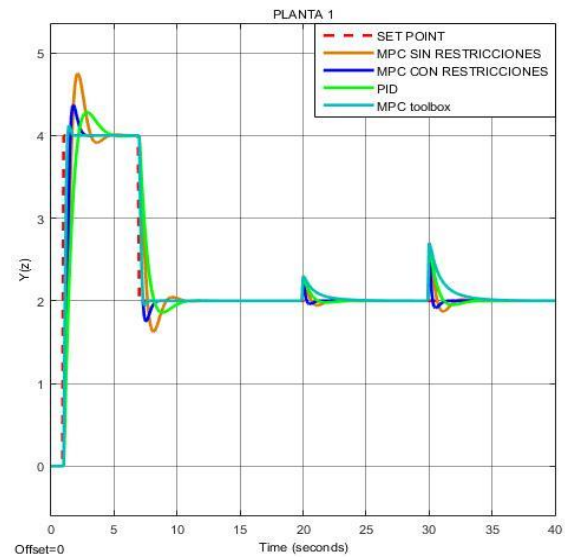


Figura 20. Comparación entre controladores para la planta 1.

3. RESULTADOS

Como se pudo observar en las simulaciones realizadas en la figura 20 y en la figura 22, el algoritmo de control predictivo con restricciones realizado ofrece una muy buena respuesta en comparación con la del controlador del MPC toolbox incorporado en Matlab. Ya que este bloque no se puede implementar directamente en las plantas Quanser debido a que los drivers instalados en la versión de Matlab 2015b no lo soportan. consecuentemente se ha programado el algoritmo utilizando líneas de código en el editor de Matlab.

La planta de doble tanque acoplado fabricada por la empresa Quanser utilizada en el presente proyecto ofrece tres tipos de configuración de la planta para realizar el control de nivel sobre el tanque superior o del inferior, con suministro de agua por parte de la bomba para un solo tanque o para los dos.

3.1 CONFIGURACIÓN No.1 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.

Para determinar los parámetros óptimos de sintonización del controlador sobre la planta Quanser, se realizaron 23 escenarios posibles para la configuración No.1 en un tiempo de un minuto para todos, en donde se variaron los valores de estos parámetros del controlador y se analizó cada una de las respuestas que otorgaba el controlador y así poder determinar cuál de estos eran los más adecuados para esta configuración, cabe resaltar que este configuración hace el sistema de carácter SISO (Single Input – Single Output), así que el control se aplicara únicamente sobre el tanque 1. El plano de la configuración 1 de la planta Quanser se muestra en la figura 22 y la visualización de los parámetros trabajados se muestra en la tabla 1 y sus correspondientes graficas en las siguientes veinticinco figuras.

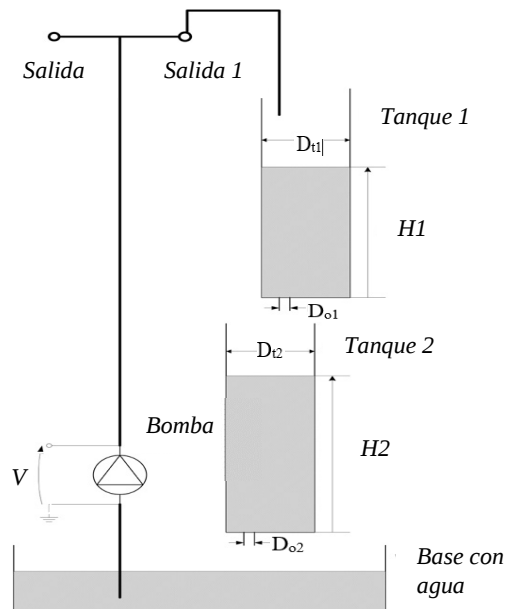


Figura 23. Plano configuración #1 para la planta Quanser.

$G(s) = \frac{K_{DC}}{0.1592 s + 1}$	Consigna (sp) (cm)	Horizonte de control (Nc)	Horizonte de Predicción (Np)	Penalización (rw)	Valor máximo (Umax) (cm ³ /s/V)
Escenario 1	10	10	100	0.5	5
Escenario 2	10	10	100	1.5	5
Escenario 3	10	10	100	5	5
Escenario 4	10	10	100	15	5
Escenario 5	10	10	100	0.5	5
Escenario 6	10	10	100	0.5	15
Escenario 7	15	10	100	0.5	20
Escenario 8	15	10	100	0.5	30
Escenario 9	15	10	100	0.5	50
Escenario 10	15	10	100	0.5	10
Escenario 11	20	20	200	0.5	60
Escenario 12	20	30	250	0.5	60
Escenario 13	20	30	70	0.5	60
Escenario 14	20	30	400	0.5	60
Escenario 15	20	80	400	0.5	60
Escenario 16	22	10	100	10	25
Escenario 17	22	10	100	50	8
Escenario 18	22	10	100	3	8
Escenario 19	13	10	100	50	50
Escenario 20	22	10	100	25	15
Escenario 21	16	60	180	0.5	25
Escenario 22	12	40	400	2.5	15
Escenario 23	24	5	20	10	9

Tabla 1. Tabla de variación de parámetros para controlador predictivo configuración No.1

En los primeros cinco escenarios se realizó la variación del parámetro de penalización rw al sistema, partiendo de un valor inicial de 0.5. Como se puede observar en la tabla 1, en la gráfica se visualiza como el aumento de esta constante hace que la oscilación de la estabilización del sistema sea directamente proporcional al valor del valor de este parámetro.

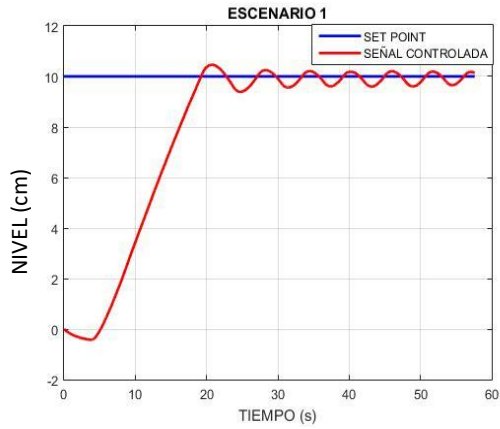


Figura 24. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

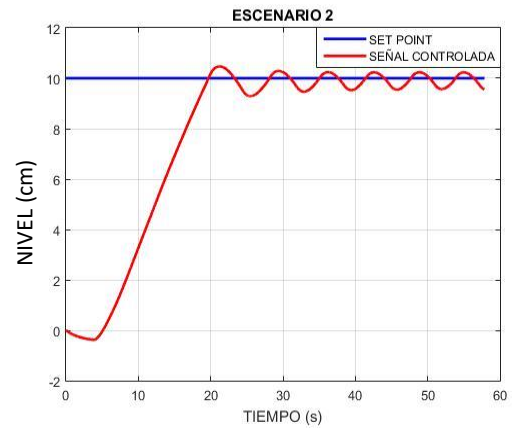


Figura 25. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

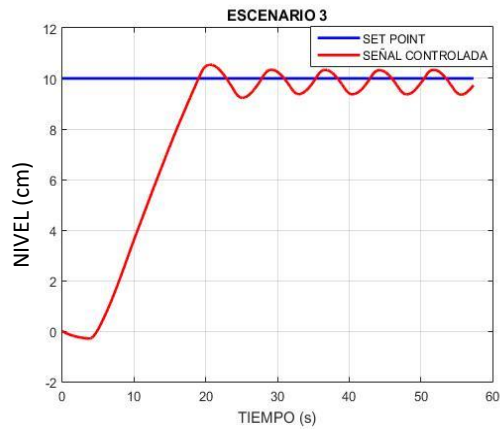


Figura 26. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

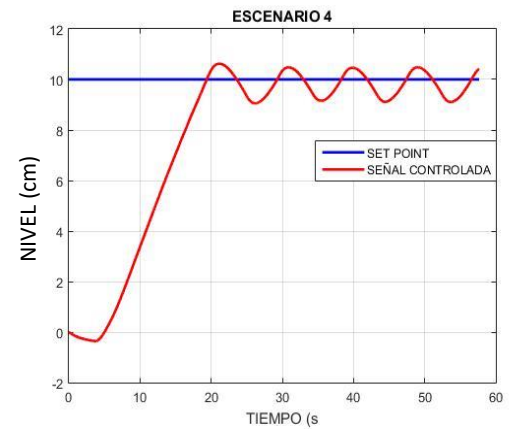


Figura 27. Escenario 4, variable de salida en el tiempo.

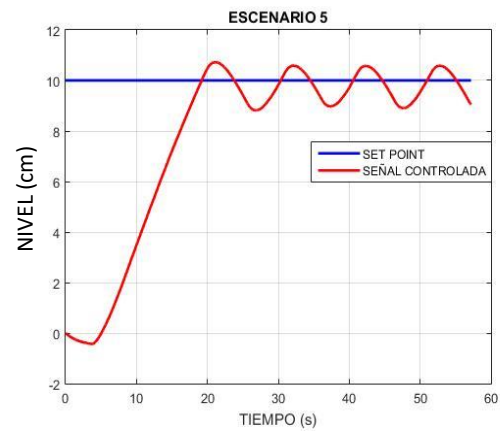


Figura 28. Escenario 5, variable de salida en el tiempo.

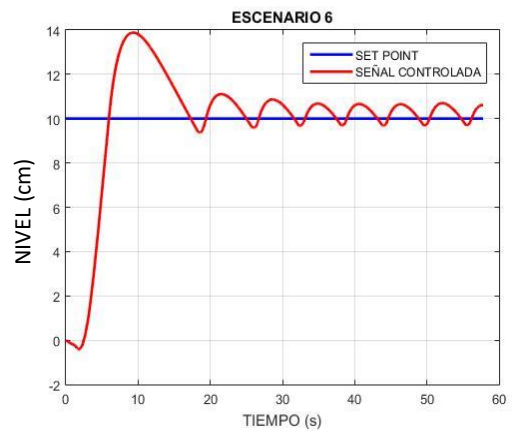


Figura 29. Escenario 6, variable de salida en el tiempo.

En los siguientes cuatro escenarios, se realizó la variación a la constante U_{max} en la restricción del valor máximo, partiendo de un valor inicial de 15 y además reincorporando el valor inicial de rw de 0.5, también se incrementó el valor de consigna. Se observa que el error en estado estacionario mejora en comparación a los escenarios anteriores, pero el sobre pico inicial aumenta proporcionalmente al valor de U_{max} . Posterior a estas pruebas se decidió dejar un valor de U_{max} , menor a la inicial y se observa como mejora la rapidez de la señal controlada y el sobre pico inicial del sistema.

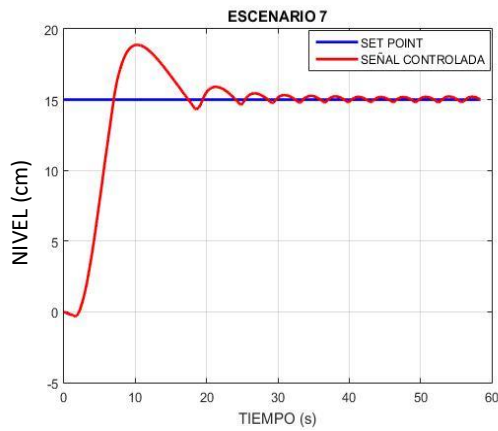


Figura 30. Escenario 7, variable de salida en el tiempo.

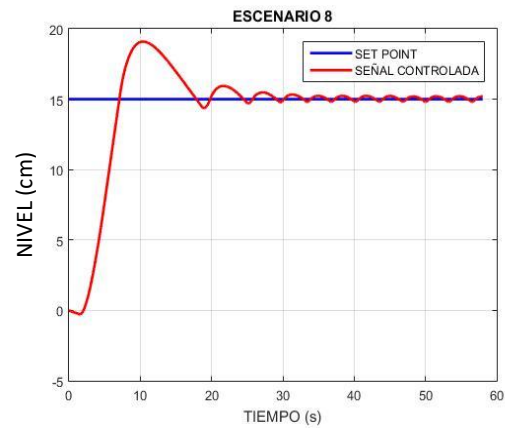


Figura 31. Escenario 8 variable de salida en el tiempo.

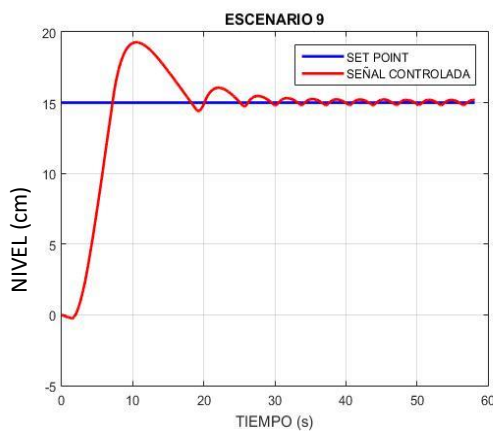


Figura 32. Escenario 9, variable de salida en el tiempo.

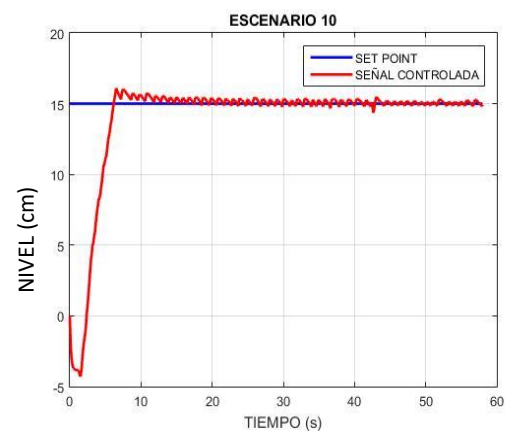


Figura 33. Escenario 10, variable de salida en el tiempo.

En los siguientes cinco escenarios, se reincorporo el valor inicial de U_{max} y se variaron los valores de horizonte de prediccion y horizonte de control (N_p y N_c), partiendo de un valor de 10 y 100 para N_c y N_p respectivamente. Nuevamente se incrementa el valor de consigna. Se observa que entre mas grande sea la diferencia entre los valores de N_c y N_p , mejor sera el control de nivel en la planta.

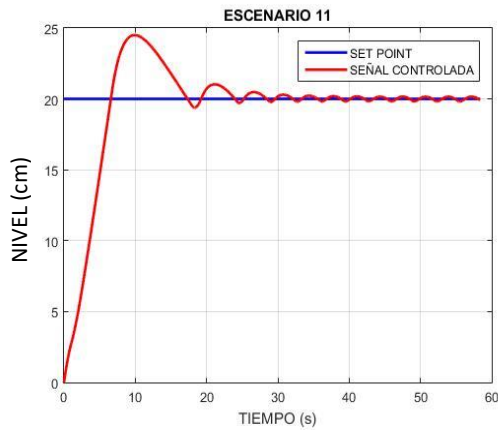


Figura 34. Escenario 11, variable de salida en el tiempo.

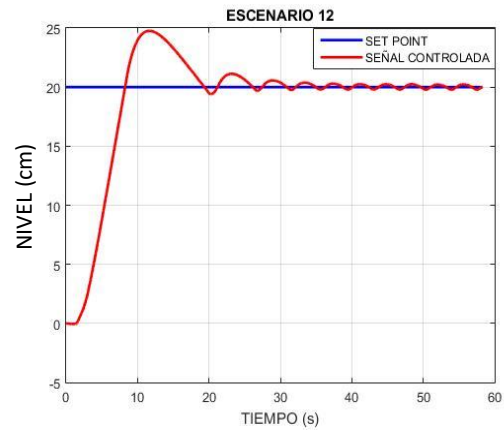


Figura 35. Escenario 12, variable de salida en el tiempo.

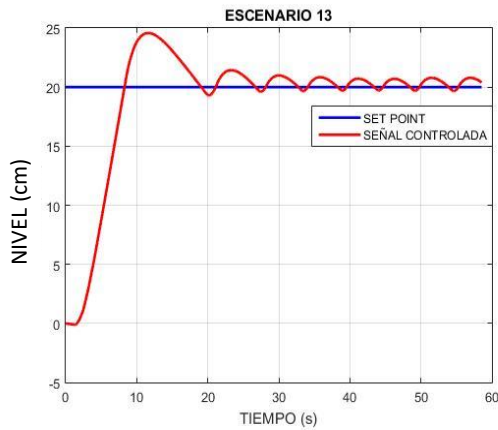


Figura 36. Escenario 13, variable de salida en el tiempo.

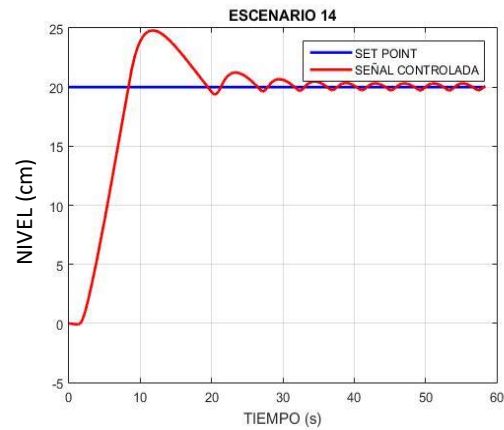


Figura 37. Escenario 14, variable de salida en el tiempo.

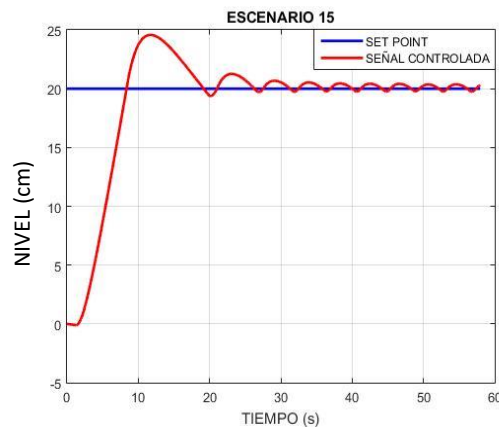


Figura 38. Escenario 15, variable de salida en el tiempo.

En los siguientes 8 escenarios se variaron todos los parametros de sintonización, teniendo en cuenta los 15 anteriormente analizados, entre estos resaltan el escenario 19 en donde la respuesta es rápida debido al alto valor de U_{max} que hace que el la bomba suministre con mayor intensidad agua, pero que al tener un valor de rw tan grande hace que la oscilacion en el estado estacionario sea muy grande.

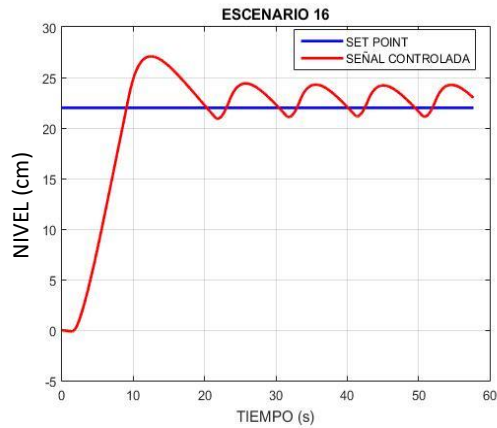


Figura 39. Escenario 16, variable de salida en el tiempo.

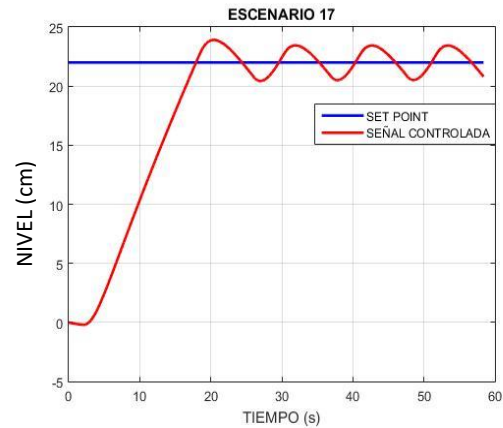


Figura 40. Escenario 17, variable de salida en el tiempo.

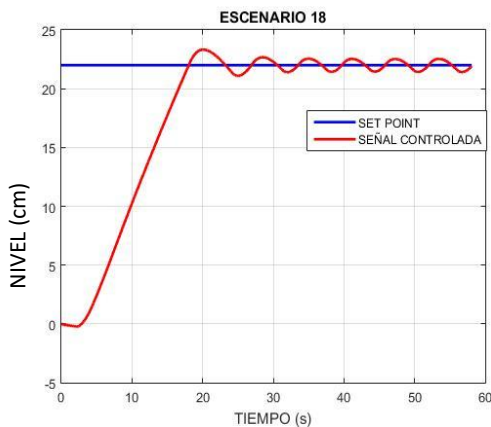


Figura 41. Escenario 18, variable de salida en el tiempo.

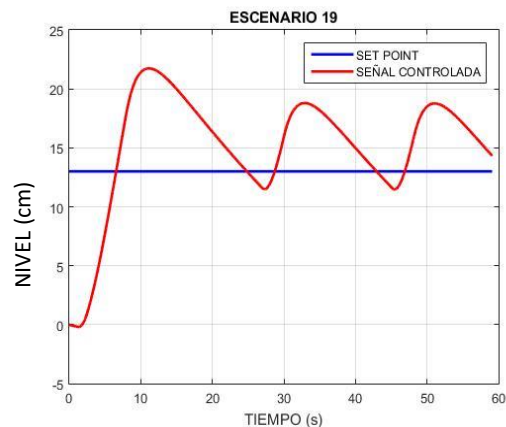


Figura 42. Escenario 19, variable de salida en el tiempo.

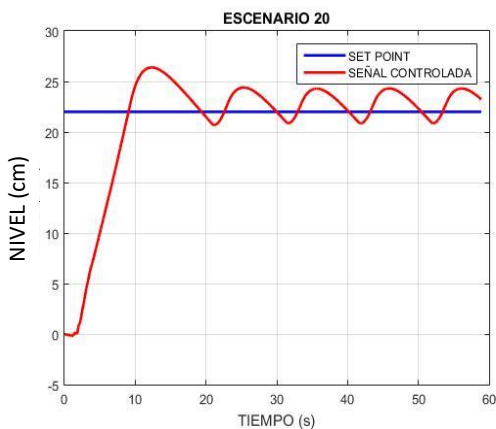


Figura 43. Escenario 20, variable de salida en el tiempo.

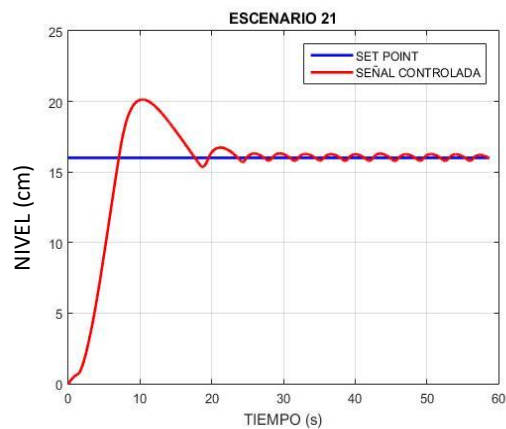


Figura 44. Escenario 21, variable de salida en el tiempo.

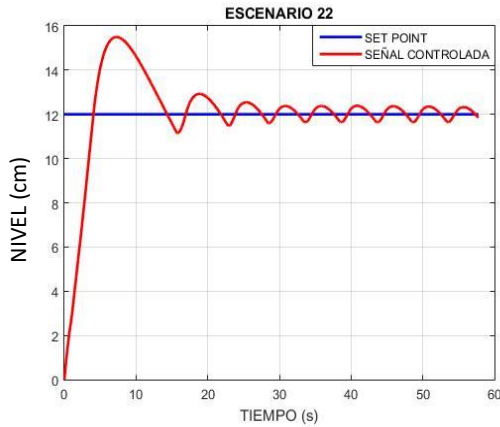


Figura 45. Escenario 22, variable de salida en el tiempo.

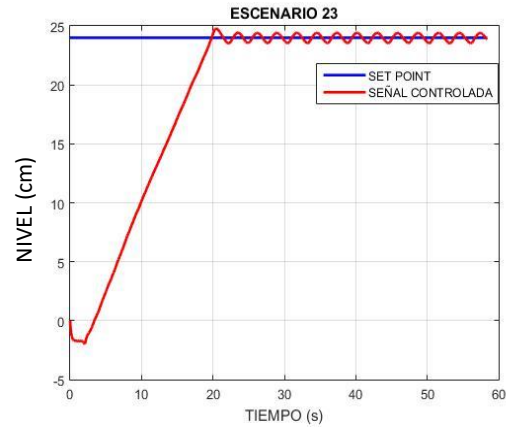


Figura 46. Escenario 23, variable de salida en el tiempo.

Después de haber realizado estos 23 escenarios se determinaron los parámetros de sintonización óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Nc	10
Np	400
Rw	0.1
Umax	10

Tabla 2. Parámetros de sintonización óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser en su configuración No.1.

Seguidamente, se realizó una comparación entre el desempeño del controlador predictivo y un controlador PID en la misma configuración, para este caso se realizaron 6 escenarios distintos para cada controlador en donde se analizaron la respuesta a perturbaciones y cambios de consigna durante un tiempo de simulación de 1 minuto. Las pruebas para el controlador PID se muestran en las siguientes figuras.

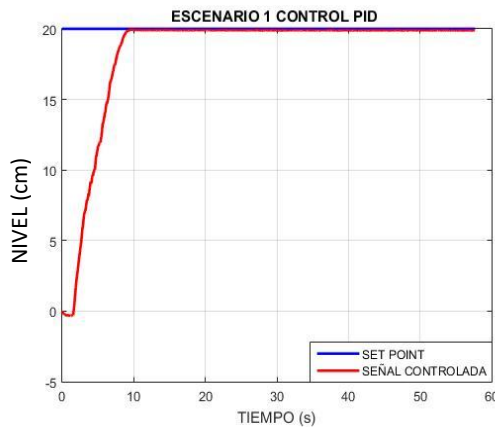


Figura 47. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

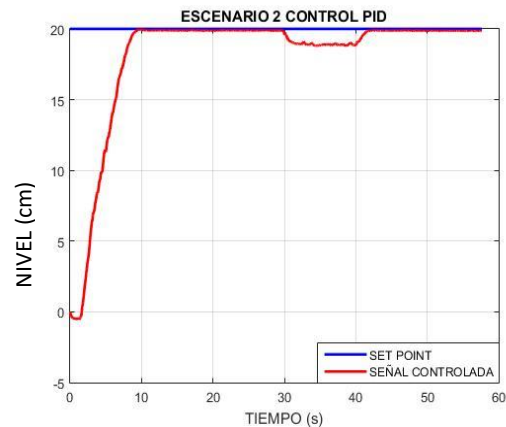


Figura 48. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

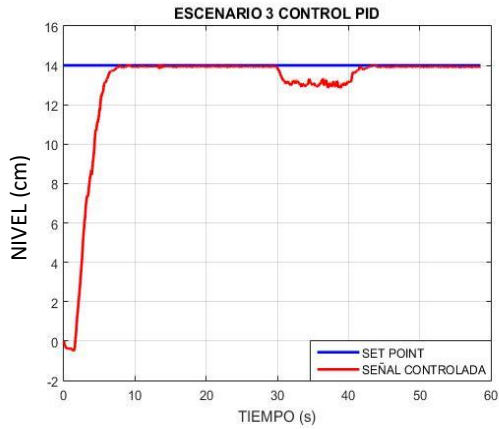


Figura 49. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

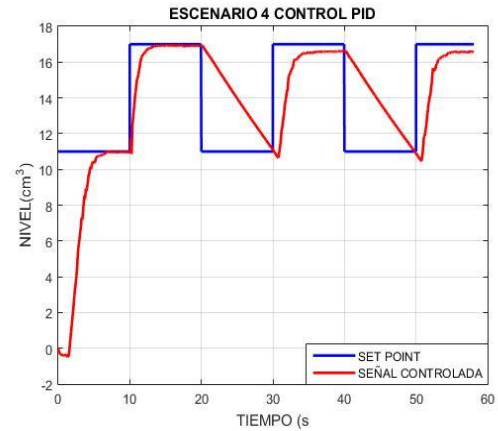


Figura 50. Escenario 4, variable de salida en el tiempo.

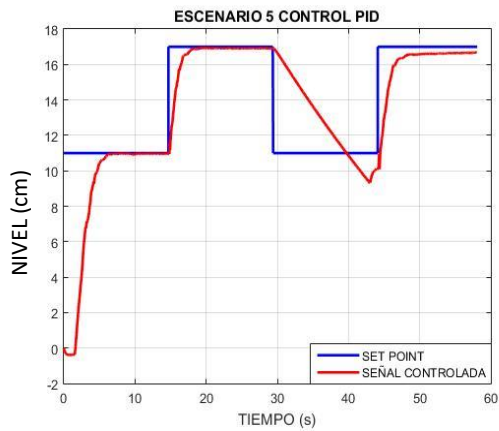


Figura 51. Escenario 5, variable de salida en el tiempo.

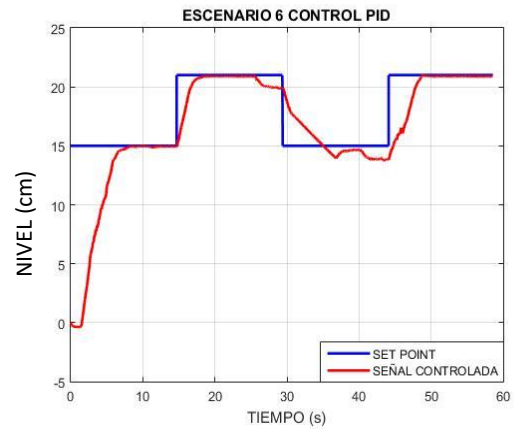


Figura 52. Escenario 6, variable de salida en el tiempo.

A continuación, se realizaron las mismas pruebas para el controlador predictivo, sintonizado con los parámetros de la tabla 2. Las gráficas se muestran en las siguientes figuras.

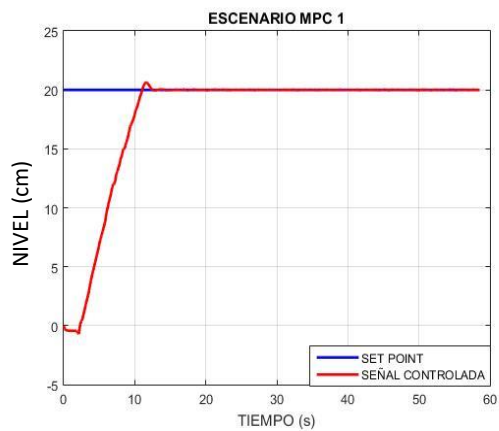


Figura 53. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

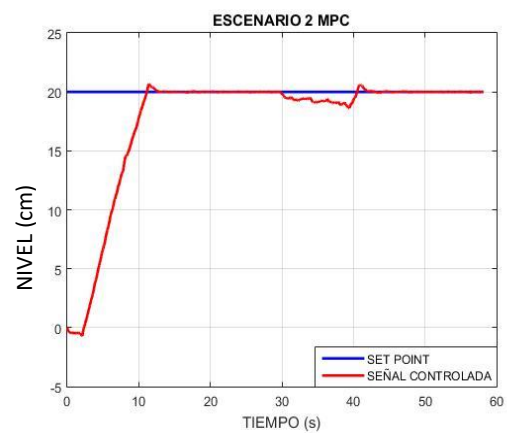


Figura 54. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

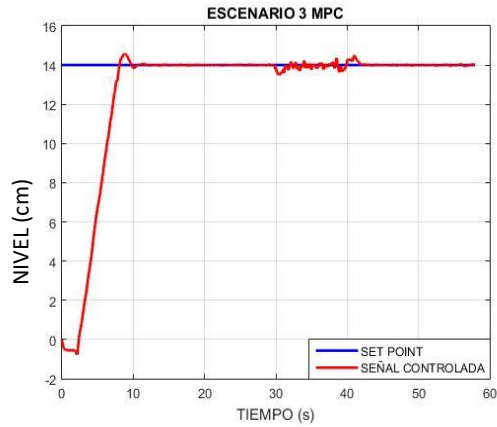


Figura 55. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

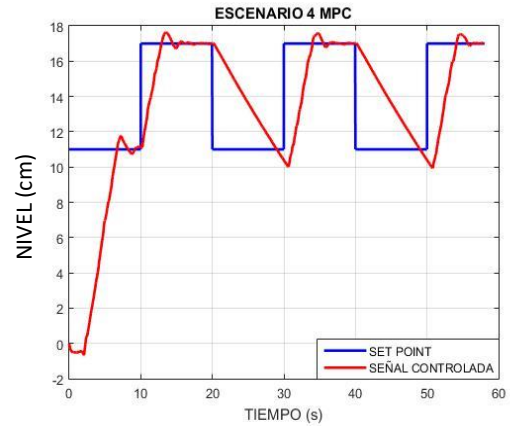


Figura 56. Escenario 4, variable de salida en el tiempo.

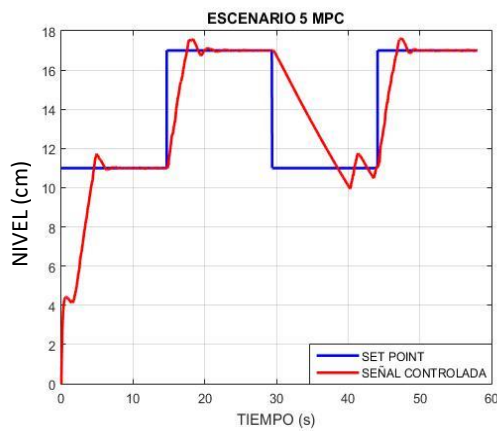


Figura 57. Escenario 5, variable de salida en el tiempo.

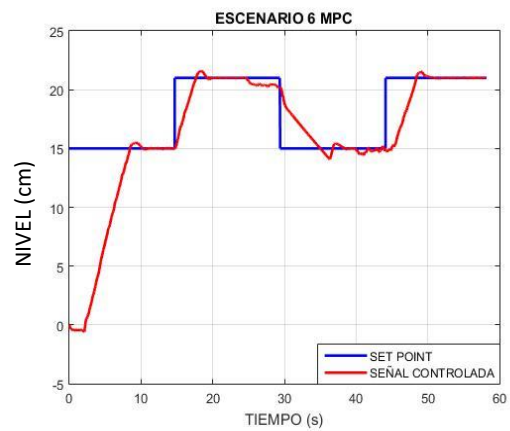


Figura 58. Escenario 6, variable de salida en el tiempo.

Para una mejor visualización de la comparación de los dos controladores, se graficaron en una sola grafica los dos controladores para cada uno de los escenarios, esto se muestra en las siguientes figuras.

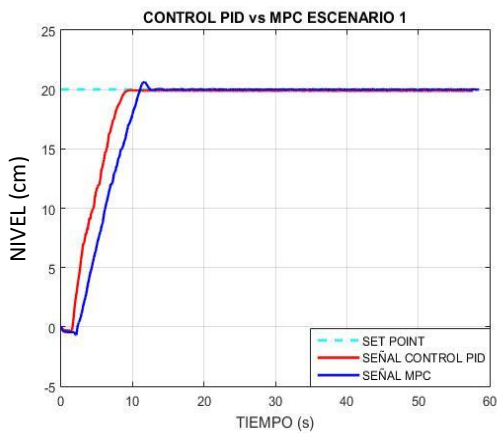


Figura 59. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

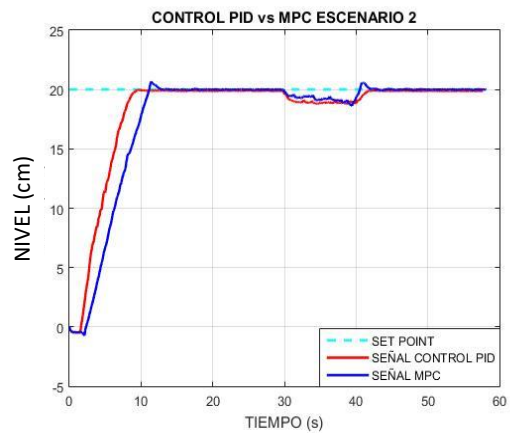


Figura 60. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

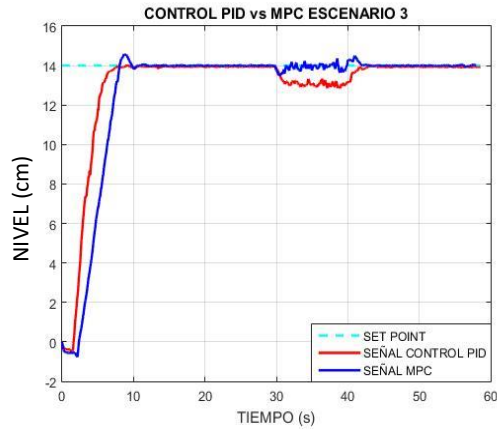


Figura 61. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

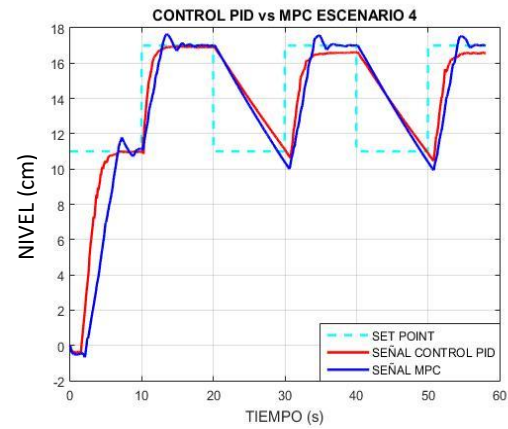


Figura 62. Escenario 4, variable de salida en el tiempo.

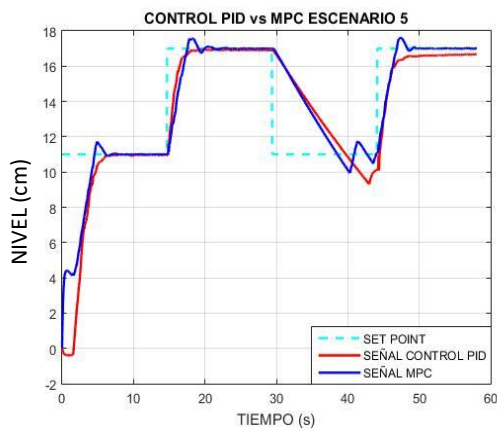


Figura 63. Escenario 5, variable de salida en el tiempo.

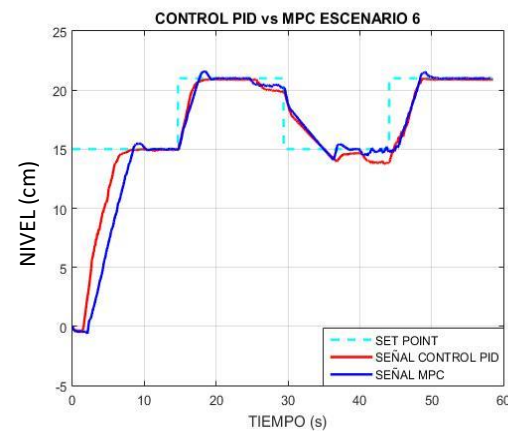


Figura 64. Escenario 6, variable de salida en el tiempo.

Se puede observar que los dos controladores ofrecen una respuesta muy positiva para cada uno de los escenarios, pero analizando las respuestas a los cambios de consigna y perturbaciones se observa que el controlador predictivo ofrece una mejor desempeño, en cuanto a la rapidez del controlador, el PID ofrece una respuesta más rápida que la del controlador predictivo en el estado transitorio y hasta el punto de estabilización, después ya en el estado estacionario se observa como el controlador predictivo iguala o incluso en algunos escenarios supera la velocidad de respuesta del PID. Cabe aclarar, que se dejó un valor pequeño en la variable de control U_{max} para así asegurar un error menor al 0.5%, lo que hace que la bomba no suministre agua con la misma potencia posible, tal y como si lo hace el PID

La visualización de la disminución del error en estado estacionario de ambos controladores se muestra en las *figuras 65 y 65*

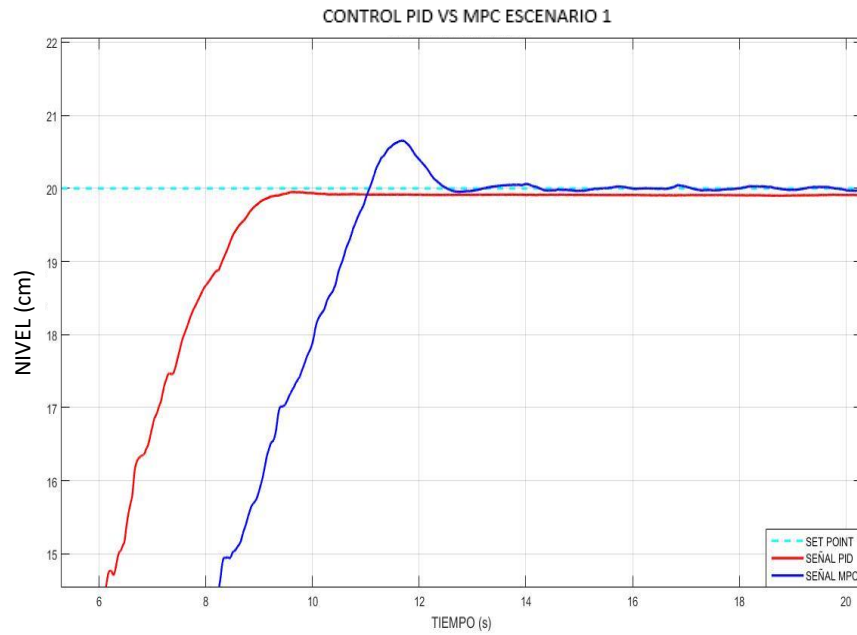


Figura 65. Comparación desempeño de controlador predictivo vs control PID en escenario 1.
(Visualización de error en estado estacionario).

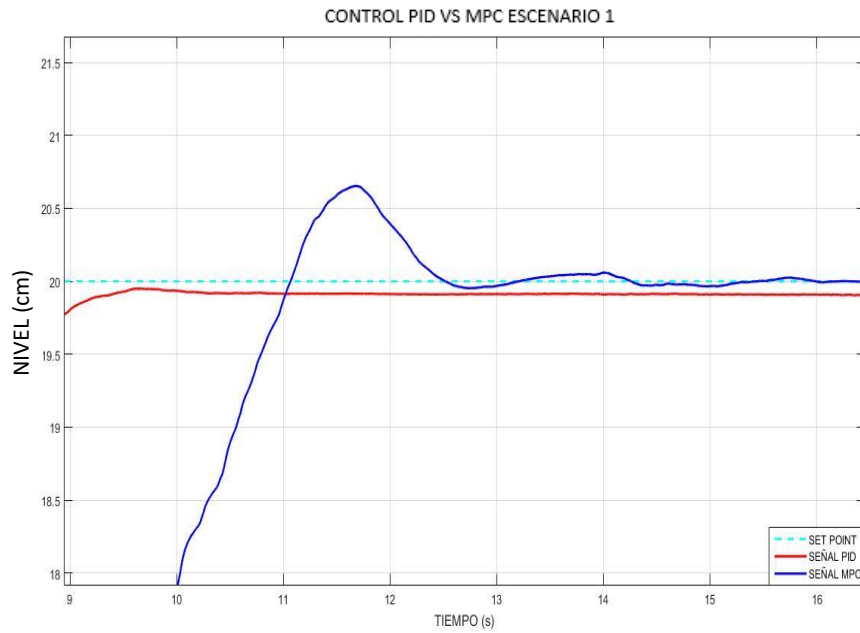


Figura 66. Comparación desempeño de controlador predictivo vs control PID en escenario 1.
(Visualización de error en estado estacionario).

La cuantificación del error para estos dos controladores se realizó mediante los métodos de RMSE (Root Mean Square Error), el cual es una forma de cuantificar el error por medio de una estimación que mide el promedio de los errores al cuadrado y MAPE (Mean Absolute Percentage Error) el cual es una medida de la precisión de predicción de un método de pronóstico en las estadísticas para el error de los controladores.

Las ecuaciones que describen estos dos métodos de cuantificación de error están definidas de la siguiente manera [18]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - \hat{Y}_k)^2} \quad MAPE = \frac{100}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N \left| \frac{Y_k - \hat{Y}_k}{Y_k} \right|}$$

Donde N es la cantidad de muestras, Y_k es el valor teórico que en este caso sería el valor de consigna y $\hat{Y}_k$ es el valor medido,

		RMSE	MAPE
escenario 1	MPC	3,2206	0,1114
	PID	2,4319	0,0843
escenario 2	MPC	3,4426	0,1206
	PID	2,7307	0,0947
escenario 3	MPC	2,6287	0,0948
	PID	2,2119	0,0756
escenario 4	MPC	1,0805	0,0948
	PID	1,1469	0,1798
escenario 5	MPC	3,1797	0,1002
	PID	0,8420	0,128
escenario 6	MPC	2,2851	0,1326
	PID	1,9457	0,1077

Tabla 3. Tabla de cuantificaron de errores.

3.2 CONFIGURACIÓN No.2 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.

Cabe resaltar que esta configuración sigue siendo un sistema de carácter SISO, pero ahora el control se realizara sobre el tanque 2, donde influye ahora el concepto de acoplamiento con el tanque 1, el cual se encargara ahora del suministro de agua para el tanque 2. En esta configuración, se realizaron 9 posibles escenarios en donde se variaron los mismos parámetros de sintonización del controlador para así encontrar los óptimos para esta configuración. El plano de la configuración No. de la planta Quanser se muestra en la figura 69 y la visualización de los parámetros trabajados se muestra en la tabla 4 y sus correspondientes graficas en las siguientes figuras.

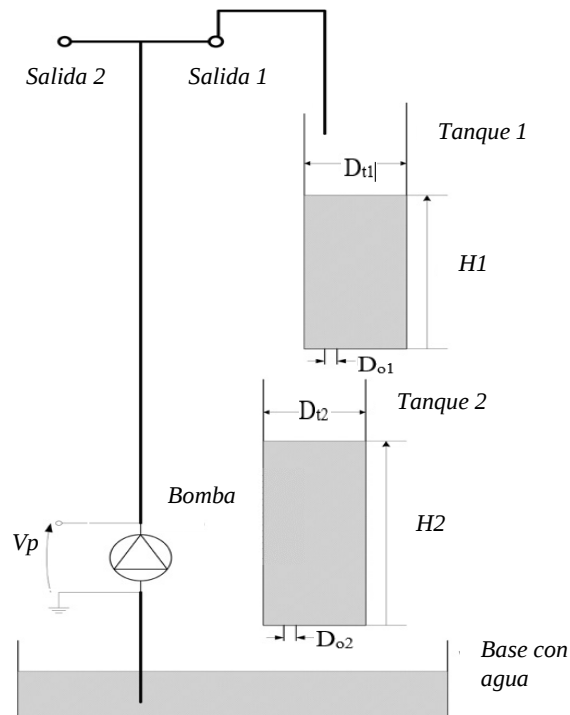


Figura 67. Plano configuración #2 para la planta Quanser.

$G(s) = \frac{K_{DC}}{0.1592 s + 1}$ Tanque 2	Consigna (sp)	Horizonte de control (Nc)	Horizonte de Predicción (Np)	Penalización (rw)	Valor máximo (Umax) (cm ³ /s/V)
Escenario 1	15	10	800	2	10
Escenario 2	20	2	800	0.05	20
Escenario 3	15	2	800	0.5	10
Escenario 4	20	2	800	0.05	10
Escenario 5	10	200	800	1	20
Escenario 6	10	200	800	1	10
Escenario 7	15	2	800	0.05	10
Escenario 8	15	2	800	0.01	5
Escenario 9	10	2	800	0.07	5

Tabla 4. Tabla de variación de parámetros para controlador predictivo configuración #2.

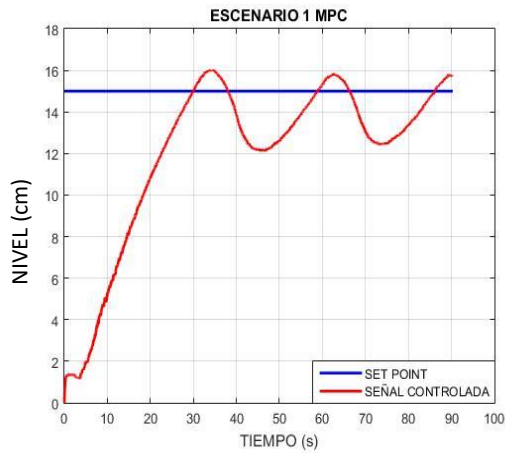


Figura 68. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

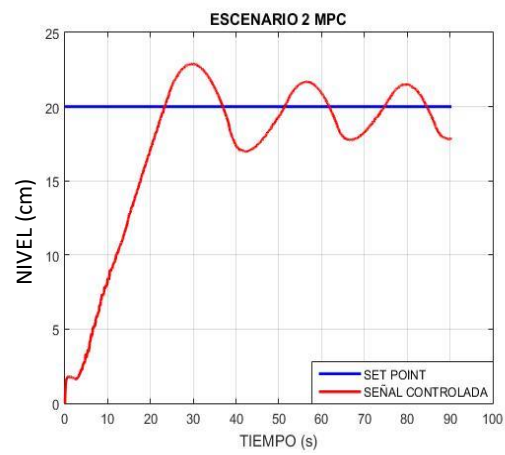


Figura 69. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

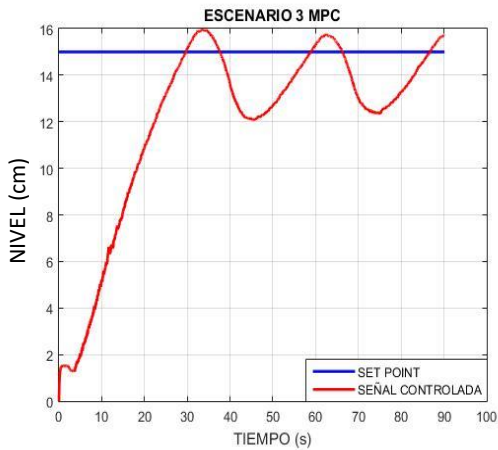


Figura 70. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

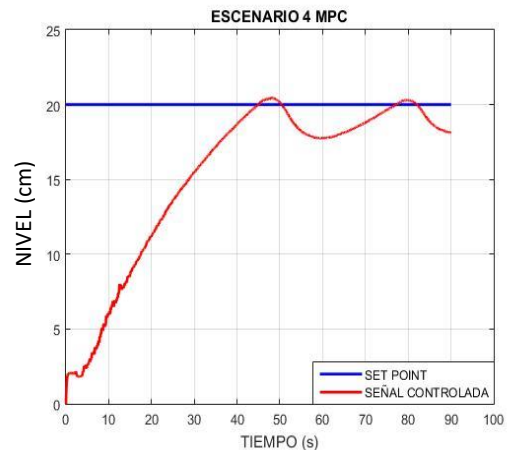


Figura 71. Escenario 4 variable de salida en el tiempo.

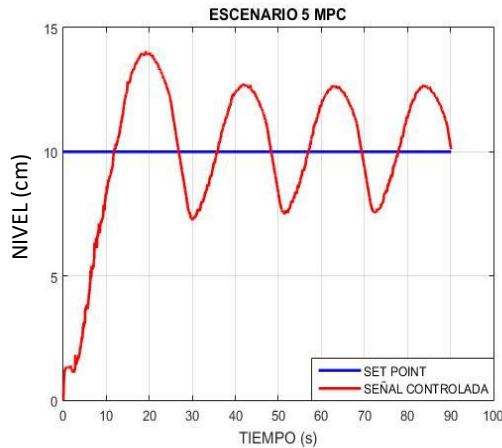


Figura 72. Escenario 5, variable de salida en el tiempo.

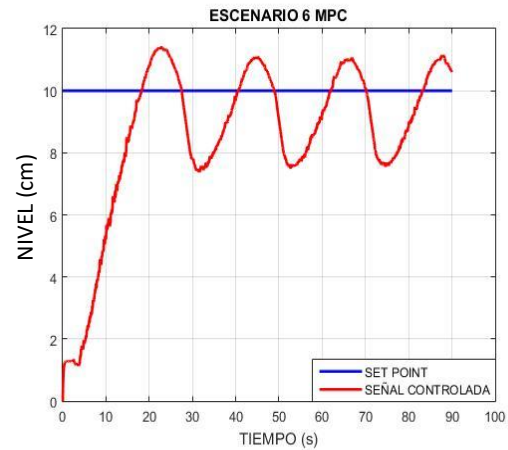


Figura73. Escenario 6, variable de salida en el tiempo.

Estos 6 escenarios se realizaron con las boquillas que permiten un mayor flujo de agua en los dos tanques, estas boquillas son de aproximadamente 5 mm. A simple vista, se puede observar que la señal controlada tiene una respuesta más lenta que la del controlador No.1, debido al efecto de gravedad que se presenta entre el tanque 1 y el tanque 2. Como el control en esta configuración se realiza sobre el tanque 2, se observa que los picos negativos en la oscilación de la respuesta en estado estacionario son de gran magnitud debido a la cantidad que sale del tanque 2 al tanque de suministro del sistema, por lo que el controlador tarda más tiempo en estabilizar el sistema. Se decide cambiar la boquilla de salida del tanque 2 para lograr una mejor respuesta del controlador. Se pasa de una boquilla de 5 mm a una de 2 mm.

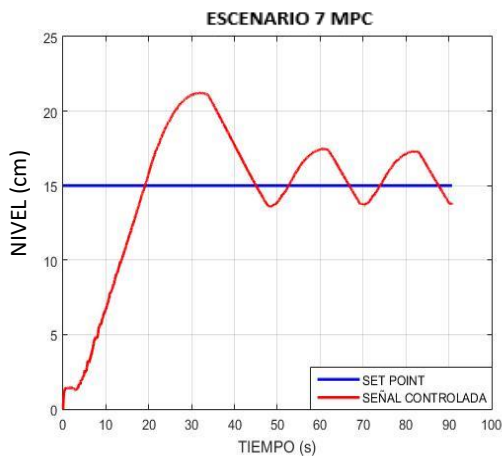


Figura 74. Escenario 7, variable de salida en el tiempo.

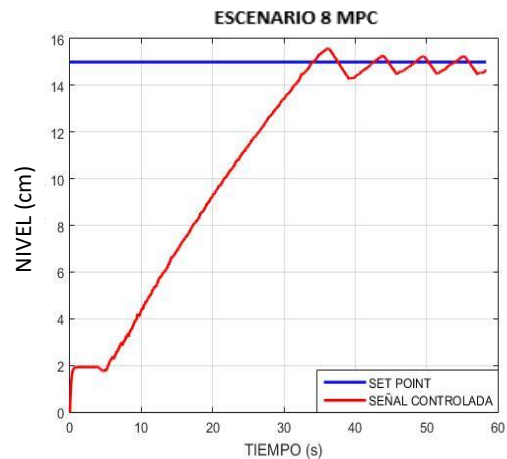


Figura 75. Escenario 8, variable de salida en el tiempo.

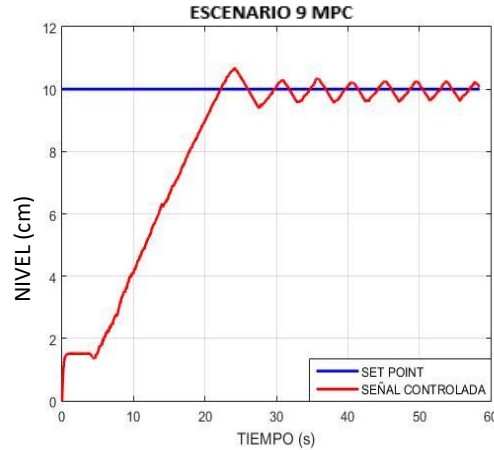


Figura 76. Escenario 9, variable de salida en el tiempo.

Como se puede observar, la oscilación en el estado estacionario se reduce considerablemente y es aceptable para la respuesta esperada de este tipo de sistemas hidráulicos. Al igual que las pruebas de los escenarios de la configuración #1, se observa que la variable de sintonización U_{max} , es determinante para el sobrepico de estado estacionario, con un valor menor se asegura una disminución en la oscilación del estado estacionario, pero hace un poco más lenta la estabilización del sistema. Otra variable de sintonización sigue siendo el horizonte de predicción N_p . Al igual que la configuración anterior, los escenarios que contaban con un valor alto de N_p tenían una gran disminución del estado estacionario.

Después de haber realizado estos 9 escenarios se determinaron los parámetros de sintonización más óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

N_c	2
N_p	800
R_w	0.05
U_{max}	5

Tabla 5. Parámetros de sintonización óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser en su configuración No.2.

Seguidamente, se realizó una comparación entre el desempeño del controlador predictivo y un controlador PID. Con la primera prueba realizada se observó que el sobre pico inicial del estado transitorio del controlador PID era bastante alto, por lo que se anticipó que a un valor de consigna alto, el nivel del agua desbordaría los límites del tanque y por lo tanto no podría

controlar el sistema en esta configuración. En las siguientes imágenes se verá reflejado como un controlador PID solo permite controlar ciertos escenarios antes de llegar a su límite de control.

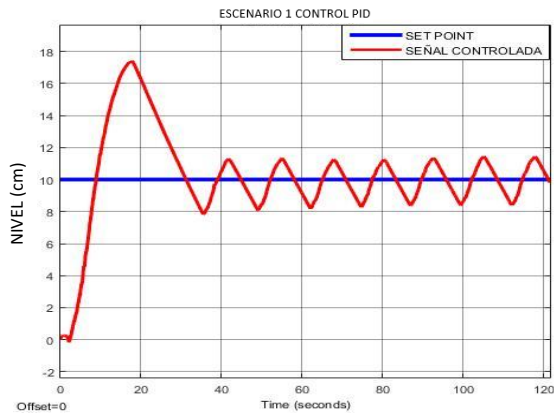


Figura 77. Escenario 1, variable de salida en el tiempo

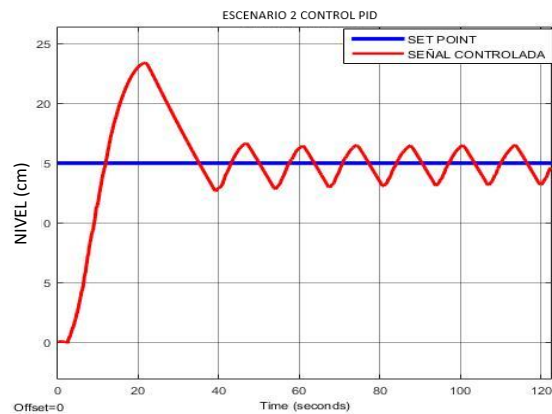


Figura 78. Escenario 2, variable de salida en el tiempo

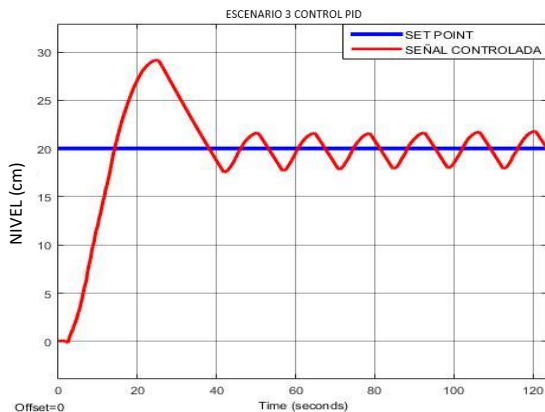


Figura 79. Escenario 3, variable de salida en el tiempo

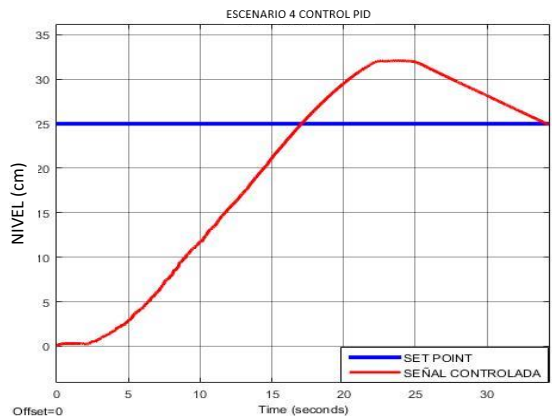


Figura 80. Escenario 4, variable de salida en el tiempo

Como se observa en el escenario 4, el nivel sobrepasa el nivel de 30 cm, el cual es el límite máximo que soporta el tanque, por lo que el agua se desbordó y fue necesario suspender la prueba.

3.3 CONFIGURACIÓN No.3 DE SISTEMA DE TANQUE ACOPLADO.

Por último, se implementó la última configuración que ofrece la planta Quanser, en la que al igual que en la configuración No.2, se realizaron 8 posibles escenarios en donde se variaron los mismos parámetros de sintonización del controlador para así encontrar los óptimos para esta configuración. Para esta configuración se realiza el control del tanque 2, pero ahora la alimentación de la bona de suministro será para los dos tanques al tiempo. El sistema sigue siendo de comportamiento SISO, en donde sigue aplicando el concepto del acoplamiento con el tanque 1 más la incorporación de la nueva entrada para el tanque 2. El plano de la configuración No.3 de la planta Quanser se muestra en la figura 87 y la visualización de los parámetros trabajados se muestra en la tabla 6 y sus correspondientes graficas en las siguientes figuras.

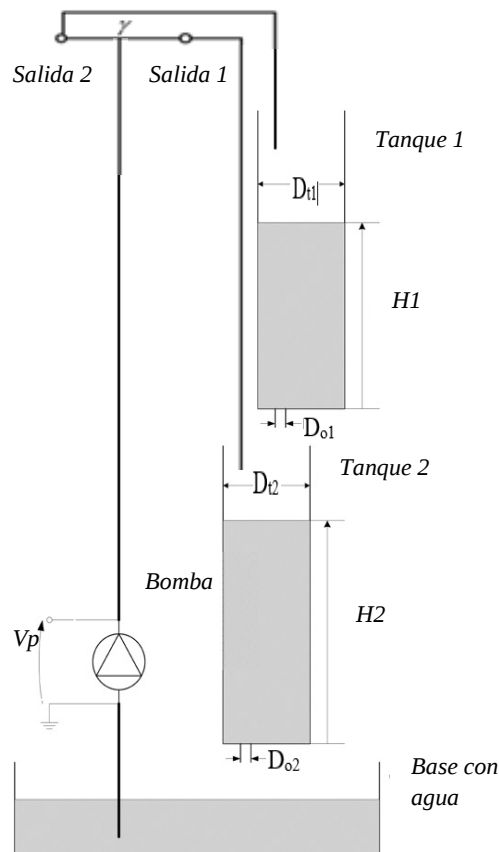


Figura 81. Plano configuración No.3 para la planta Quanser.

$G(s) = \frac{K_{DC}}{0.1592 s + 1}$ Tanque 2	Consigna (sp)	Horizonte de control (Nc)	Horizonte de Predicción (Np)	Penalización (rw)	Valor máximo (Umax) (cm ³ /s/V)
Escenario 1	15	10	100	0.5	5
Escenario 2	10	10	100	1.5	5
Escenario 3	15	10	800	2	10
Escenario 4	20	2	800	0.05	20
Escenario 5	15	2	800	0.5	10
Escenario 6	20	2	800	0.05	10
Escenario 7	15	2	800	0.01	5
Escenario 8	10	2	800	0.01	5

Tabla 6. Variación de parámetros para controlador predictivo configuración No.3.

En las gráficas de los primeros 4 escenarios probados, se muestra una mejora en la velocidad de respuesta del controlador hasta el punto que llega a su estado estacionario. Cabe resaltar que se presenta un sobre pico secundario en cada oscilación que realiza el controlador en su estado estacionario. Esto se debe, al remanente de agua que queda en la manguera que suministra la entrada del tanque dos, la bomba envía una última señal de presión para no dejar líquidos en las mangueras de la planta. Es importante aclarar que se dejaron las mismas boquillas utilizadas en la configuración No.2, ya que como el control se realiza también en el tanque 2, son las más indicadas para la realización de estas pruebas.

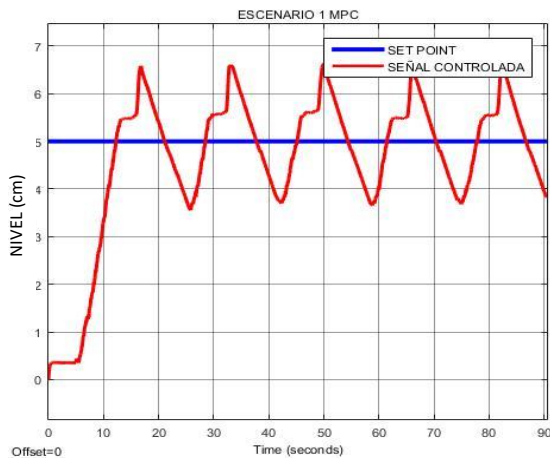


Figura 82. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

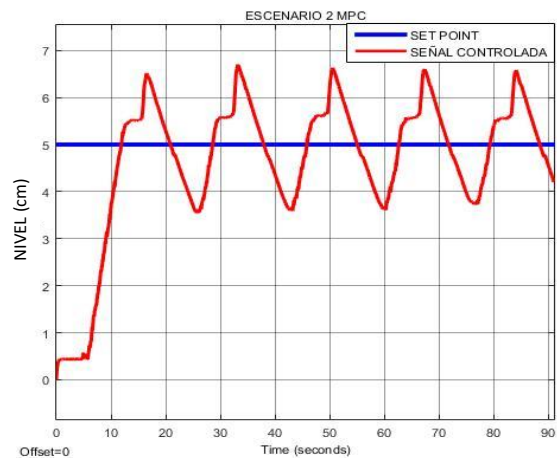


Figura 83. Escenario 2, variable de salida en el tiempo

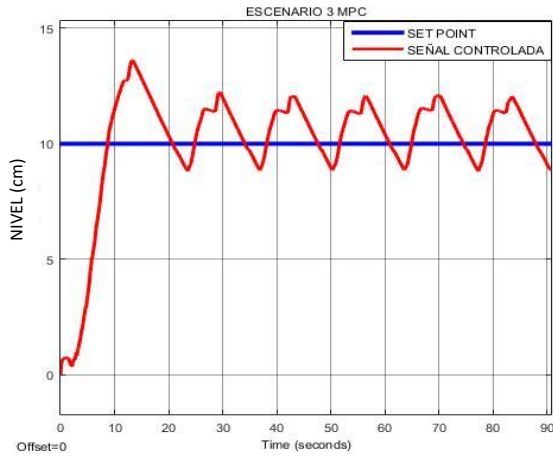


Figura 84. Escenario 3, variable de salida en el tiempo

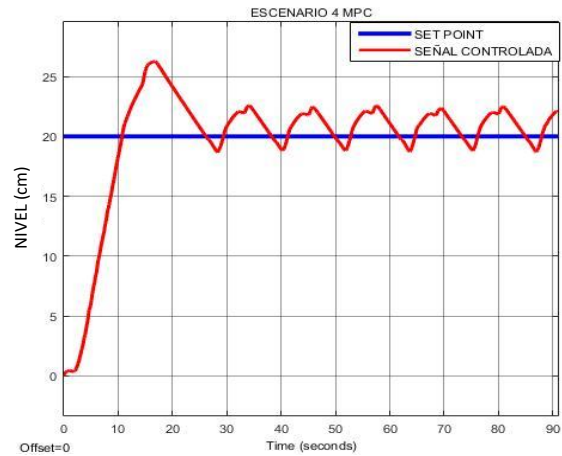


Figura 85. Escenario 4, variable de salida en el tiempo

En los siguientes 2 escenarios se muestra que el ciclo negativo en la oscilación de la señal controlada baja considerablemente ante el aumento de consigna a valores mayores o iguales a 15 cm, esto se debe al efecto de acoplamiento de los tanques, ya que las longitudes de llenado disminuyen de un nivel bajo, en donde el tiempo que lleva al controlador llegar al punto de referencia es más larga duración, a un nivel alto en donde el llenado que debe hacer el sistema no tiene larga duración y el doble suministro de agua para el tanque 2 por parte de la bomba y el tanque 1, hace que el sistema tenga una mayor velocidad cuando este nivel baja del valor de consigna.

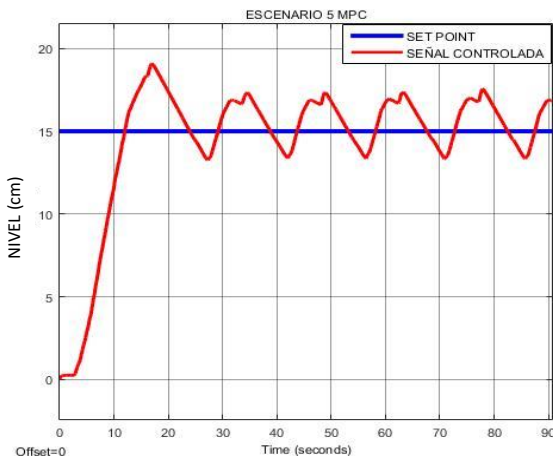


Figura 86. Escenario 5, variable de salida en el tiempo

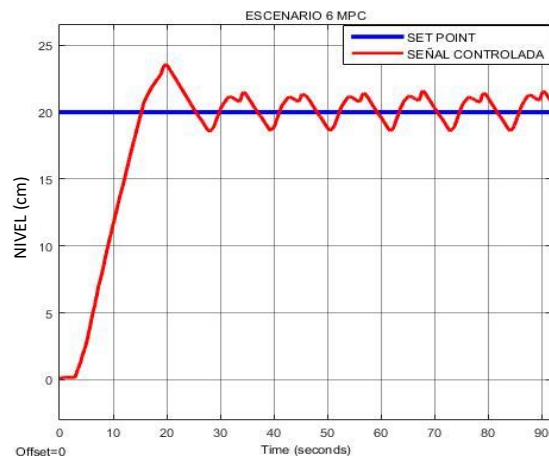


Figura 87. Escenario 6, variable de salida en el tiempo

Para los siguientes escenarios, se modificaron los parámetros de sintonización determinantes para lograr una disminución significativa del error de estado estacionario. Se varían el horizonte de predicción al doble de lo anteriormente sintonizado y la constante de penalización r_w para darle rapidez a la acción de control. Además, conjuntamente se adhiere el concepto anteriormente visto en los anteriores escenarios, en donde los puntos de referencia altos tienen mejor respuesta por cuestión de el efecto de acoplamiento de los tanques.

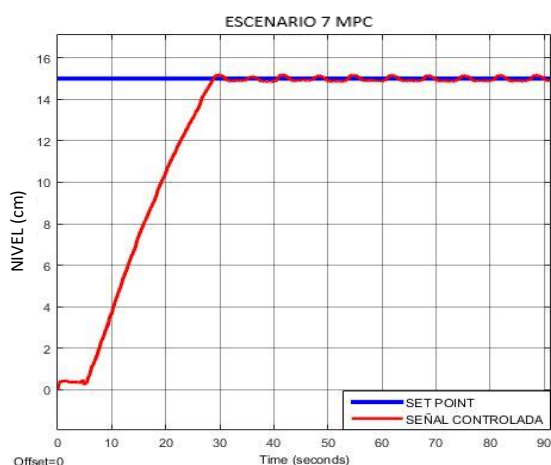


Figura 88. Escenario 7, variable de salida en el tiempo

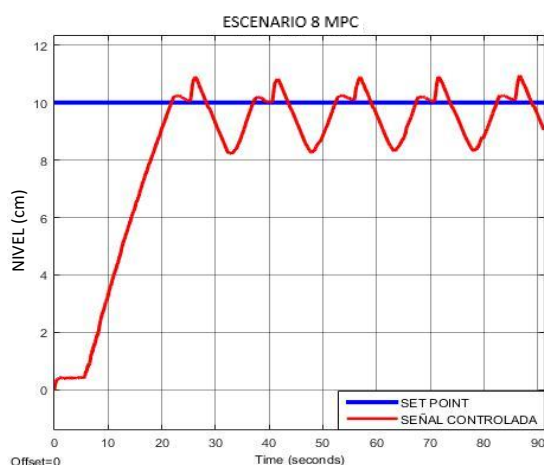


Figura 89. Escenario 8, variable de salida en el tiempo

Por último, se realiza una prueba con un valor de consigna de 28 cm, este nivel es casi el límite del que soporta el tanque, como se observa en la figura 98, la respuesta del controlador mejora considerablemente con respecto a todas las pruebas anteriormente realizadas.

Después de haber realizado estos 8 escenarios se determinaron los parámetros de sintonización óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

N_p	2
N_c	800
R_w	0.001
U_{max}	5

Tabla 7. Parámetros de sintonización óptimos para el controlador predictivo de la planta Quanser en su configuración #3.

Seguidamente se precede a la implementación de un controlador PID, para esta configuración. Se observa que al igual que la configuración No.2, el sobre pico inicial es su estado transitorio es muy elevado y a cierto nivel de valor de consigna elevaría el nivel del agua demasiado hasta el punto de sobrepasar el límite del tanque, el cual es de 30 cm^3 . A continuación se mostraran 4 escenarios en donde se aumentó progresivamente el valor de consigna, hasta llegar al punto de desbordamiento que se observa en la figura 104, en donde fue necesario apagar el sistema para no continuar con el desbordamiento de agua.

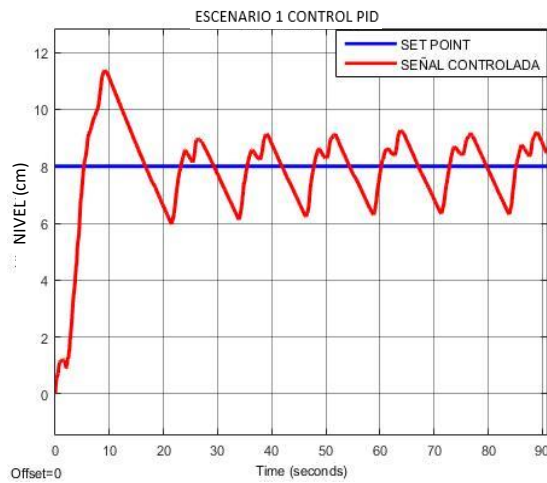


Figura 90. Escenario 1, variable de salida en el tiempo.

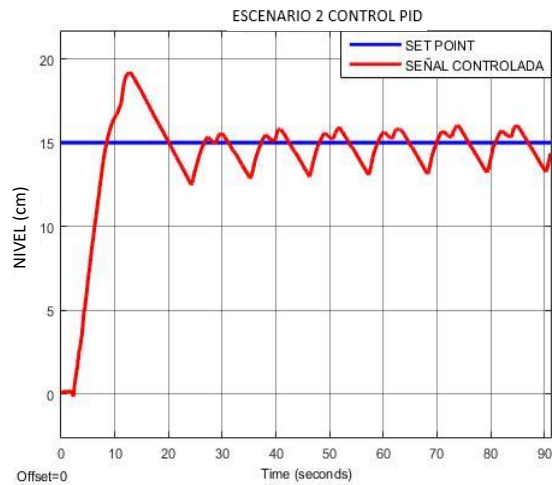


Figura 91. Escenario 2, variable de salida en el tiempo.

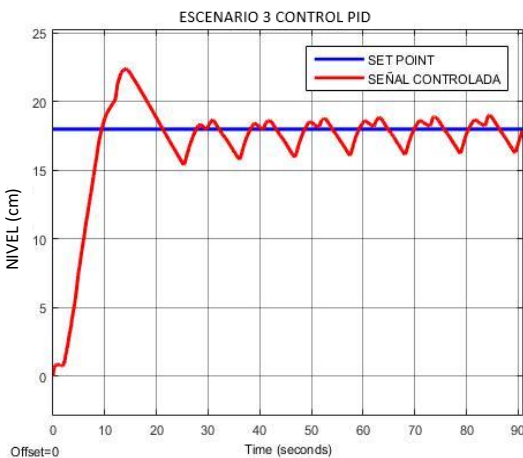


Figura 92. Escenario 3, variable de salida en el tiempo.

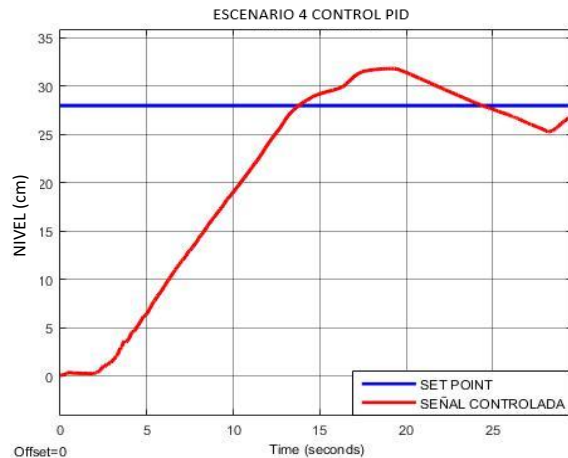


Figura 93. Escenario 4, variable de salida en el tiempo.

3.4 GUIA DE USUARIO

Uno de los objetivos planteados en el proyecto se basa en el diseño de una sencilla guía de laboratorio, en donde el estudiante de la facultad de ingeniería de la Universidad Santo Tomás, pueda tener un mayor acercamiento a esta estrategia de control avanzado y pueda asimilarla como una herramienta alternativa para su desenvolvimiento en la vida laboral o profesional. En la guía se incorpora el manejo de la planta Quanser de doble tanque acoplado, la cual no tiene una gran participación en el trabajo práctico en los cursos de control. Además se da una introducción al manejo del controlador predictivo y la comparación de desempeño frente al controlador PID, lo que fue la idea central del proyecto. La guía elaborada se muestra en la parte de anexos

4. CONCLUSIONES

- Para el diseño del modelo matemático del sistema de doble tanque acoplado fue necesario realizar una linearización de la ecuación no lineal que otorga este sistema debido a su característica que lo define como un sistema dinámico. Esta ecuación está determinada fundamentalmente por dos variables, una es el voltaje que suministra la bomba al tanque y la otra es el nivel de fluido que se incorpora al tanque, esta ecuación esta descrita para los dos tanques y como resultado otorga una función de transferencia de primer orden, con una constante de tiempo τ y otra constante de ganancia de voltaje DC. Esta misma función esta descrita para cada uno de los tanques.
- En el diseño del controlador predictivo, se observó que tiene una implementación mucho más compleja que la de un controlador convencional, esto se debe al modelo de predicción y función de coste, las cuales son las partes esenciales de la optimización del controlador y que se rigen o su forma de resolución es por medio de algebra de matrices. Esto sin incorporar restricciones al sistema, las cuales requieren la realización de un problema de programación cuadrática para obtener la salida de la señal controlada.
- Para el proceso de sintonización del controlador, se realizó el cálculo del valor estimado del parámetro de penalización rw , mediante el método de estimación MAVE, en el cual se obtuvo un valor superior a 1000, por lo que se decidió minimizar este valor para enfocar la sintonización del controlador en los parámetros de los horizontes de predicción y control, debido a que el enfoque del proyecto está orientado a observar el cambio que puede tener el desempeño del controlador con la variación de estos dos parámetros.
- Al momento de realizar simulaciones de un controlador predictivo mediante el bloque de Matlab MPC Toolbox, se obtiene una gran ventaja en el manejo de plantas de mayor complejidad. En comparación con un controlador PID, el controlador predictivo puede controlar de forma eficiente sistemas de hasta tres polos, lo que el PID no puede realizar.

- Se observó, que la eficiencia del controlador predictivo sin restricciones es mucho menor al controlador predictivo con restricciones. Esto se debe a que el controlador predictivo tiene más posibilidades de sintonización que el que no tiene restricciones. Por nombrar algunas están los niveles máximos de restricción en la variable de control, más la penalización que se le puede dar a la señal por parte de la constante rw , mientras que para el controlador sin restricciones se limita a solo manejar la línea de horizonte de predicción y de control y la constante de penalización.
- Para la toma de datos en la parte experimental se ha utilizado una metodología que buscaba ver la variación del desempeño del controlador predictivo para las tres diferentes configuraciones del sistema de doble tanque acoplado, variando los parámetros de sintonización que fueran determinantes que afectaran directamente la respuesta del sistema de control en lazo cerrado.
- Para el diseño del controlador PID para la planta de doble tanque acoplado fabricada por Quanser, se realizaron los cálculos de las constantes proporcional, integral, derivativa por medio del bloque PID Controller de Matlab, haciendo la sintonización de la función de transferencia previamente obtenida. Se observó que la constante derivativa era casi cero, por lo que se podía omitir dicha constante.
- Para la configuración No1 del sistema de doble tanque acoplado, se realizaron 23 escenarios, puesto que se buscaba encontrar las variables de sintonización óptimas para la comparación frente al controlador PID, ya que el PID ofrecía una muy buena respuesta para el sistema, y se debe tener en cuenta que la implementación de un controlador PID no es tan compleja como la del controlador predictivo. Además, se buscó hacer una investigación extensa debido al enfoque académico en el que está orientado el proyecto.
- Dado que la configuración n.º 1 de doble tanque acoplado realiza el control sobre el tanque 1 ubicado en la parte superior del sistema, se realizó una modificación en la boquilla de salida de este tanque, debido a que la boquilla que traía de fábrica tenía un orificio de un diámetro de 7 mm, lo que alargaba los tiempos de toma de datos. La planta cuenta con 5 boquillas auxiliares para que el usuario pueda adecuar la planta de acuerdo a su preferencia.

- En la confrontación del controlador predictivo frente al controlador PID se realizaron pruebas de cambios de consigna dentro de los límites de la planta, además de la inclusión de perturbaciones al sistema. Se observó que ambos controladores ofrecen muy buenas respuestas en cuanto a los cambios de consigna, los rechazos a perturbaciones y la disminución de error en estado estacionario. Particularmente, para el controlador predictivo se observa una respuesta un poco más lenta que la del PID pero con una gran ventaja en cambios de consigna y rechazo a perturbaciones. En cuanto a la disminución del error, los dos ofrecen una buena respuesta, ya que es menor al 5%.
- Para las configuraciones No2 y No3 del sistema de doble tanque acoplado ya se tenía un modelo de parámetros de sintonización a partir de los 23 escenarios realizados para la configuración #1, además se observó que para tanto para la configuración #2 como para la configuración #3, el controlador PID no era el indicado para controlar el nivel de agua, ya que como en estas configuraciones el control se realizaba sobre el tanque 2 o superior, tendía a ser más tedioso por el efecto de acoplamiento de los tanques y para el estado transitorio del control PID se observó un sobre pico demasiado elevado, lo que hacía desbordar el agua en pruebas con valores de consigna altos y era necesario apagar el sistema para proteger los sensores y la tarjeta de la planta de algún daño por el contacto con el agua. Es por esto que no se decidió realizar la misma cantidad de pruebas que para la configuración #1 y tampoco una confrontación con el controlador predictivo.
- Para la toma de datos en la configuración No.2 y No.3 fue necesario aumentar el periodo de muestra total de la prueba, puesto que el control para estas configuraciones era más lento y la gráfica de la señal controlada no lograba apreciarse muy bien.

- En largos periodos de prueba, se observó que la bomba de la planta Quanser tendía a calentarse, a pesar de que esta cuenta con un disipador de potencia de gran tamaño, la carga a varias sesiones de pruebas hacia que esta se calentara. Esto se presentaba con más frecuencia cuando la bomba era configurada al máximo de su potencia. Con la inclusión de la restricción de la magnitud de la variable de control se regulaba este valor y la bomba no trabajaba al máximo de su velocidad en todas las pruebas, lo que, interpretado en un campo o desempeño industrial, puede significar un ahorro energético significativo.
- Para el control predictivo de un sistema de doble tanque acoplado como la planta Quanser, es necesario añadir restricciones al sistema, ya que solo en la simulación se observa la mejoría y robustez que obtiene el controlador sobre la respuesta controlada de este tipo de sistemas.
- Se determinó que el control PID puede ser de muy fácil implementación y tiene muy buena respuesta para el control de un tanque, pero para el control de un segundo tanque acoplado queda limitado y la respuesta de estado estacionario no presenta una buena disminución de error en estado estacionario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bemporad A., M. Morari, V. Dua y E.N pistikopoulous (2002). *The Explicit Linear Quadratic Regulator for Constrained Systems*, 3-20
- [2] Camacho, E. F., & Bordons, C. (2004). *Control predictivo: Pasado, presente y futuro. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1(3), 5-28.
- [3] M. G. Judewicz, J. R. Fischer, N. Echeverría, S. A. González y D. O. Carrica (2014) ´ *Laboratorio de Instrumentación y Control, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina*
- [4] Noelia I. Echeverría, Marcos G. Judewicz, Sergio A. González, Jonatán R. Fischer, Daniel O. Carrica (2016). *Laboratorio de Instrumentación y Control, Facultad de Ingeniería, UNMdP Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina*
- [5] García, N. T., & Tamayo, J. P. G. (2006). *Control predictivo generalizado implementado a dos tanques acoplados. Scientia et Technica*, 3(32), 61-66.
- [6] Llata, J. R., Oria, J. P., Sarabia, E. G., Arce, J., & Robles, A (2006). *Control predictivo de tanques acoplados. Universidad de Cantabria.*
- [7] ADRIANA GÓMEZ HERNÁNDEZ and JULIE XIMENA CASTILLO (2007). *Definición de estándares operativos para tanques atmosféricos y vasijas de almacenamiento de líquidos a presión.*
- [8] J. P. González Tamayo and N. Toro García (2006). *Control predictivo generalizado implementado a dos tanques acoplados. Scientia Et Technica* 3(32), pp. 61-66. 2006. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=4819170>.
- [9] 1. Castro C, Vargas H, Faras G (2014). *Aplicación de estrategias de control avanzado sobre un sistema de tanques acoplados de estructura variable para uso docente..*
- [10] *Product information Sheet (2013) – Quanser Coupled Tanks .The Coupled Tanks system is a re-configurable process, control experiment that enables students to perform a and wide array of modeling and control-related laboratories. Coupled tanks.*
- [11] Piura and 2. marzo de 2016. *MODELACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE CUATRO TANQUES ACOPLADOS* peter saúl gutarra castillo.
- [12] Cita tomada de: <http://cpoh.upv.es/es/investigacion/lineas/item/4-control-predictivo-basado-en-modelos.html> (2017).
- [13] Cita tomada de: <http://www.ilustrados.com/tema/9320/Introduccion-control-predictivo.html> (2017).
- [14] Chamorro Hernández, W., & Velarde Rueda, P. (2018). *Regulador cuadrático lineal y control predictivo aplicados en un sistema de cuatro tanques: una comparación de rendimiento. Enfoque UTE*, 9(1), pp. 204 - 216.
<https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.257>

- [15] F. D. J. Sorcia-Vázquez et al, "Control Predictivo Distribuido Óptimo Aplicado al Control de Nivel de un Proceso de Cuatro Tanques Acoplados," *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial RIAI*, vol. 12, (4), pp. 365-375, 2015. Available: <https://doaj.org/article/13ba2896faf844d5b97b6ccb1f8dbd60>. DOI: 10.1016/j.riai.2015.07.002.
- [16] Oliden Semino, J. C. (2016). *Desarrollo de un Controlador Predictivo Basado en Modelo para Plataforma Industrial*.
- [17] WANG, Liuping. *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [18] Galvis Restrepo, E. (2016). *Predictive control with dynamic constraints for closure and opening operations of irrigation Canals (Doctoral Thesis)*. Universidad politécnica de Cataluña.
- [19] Khalid, M. U., & Kadri, M. B. (2012). *Liquid level control of nonlinear coupled tanks system using linear model predictive control*. In *Emerging Technologies (ICET), 2012 International Conference on* (pp. 1-5). IEEE

ANEXOS

1. Guía de Laboratorio para práctica de control predictivo y familiarización de planta Quanser.

 2. UNIVERSIDAD SANTO PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE	UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS "PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA" FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA GUÍA DE LABORATORIO	 <i>¡30 años!</i>
---	---	---

1. IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA DE APRENDIZAJE

Nombre del Laboratorio:	(Duración en horas)	Número de horas : 4
Equipo Ejecutor: Ing Eduard Galvis, Santiago Baquero, Felipe Jaramillo		
Actividad de aprendizaje: Control Predictivo con restricciones en planta de doble tanque acoplado Quanser.	Duración: 6 horas	
Objetivo General:	Resultados de Aprendizaje	
Ofrecer una alternativa de control avanzado para sistemas como la planta de doble tanque acoplado Quanser, la cual ofrece un sistema no lineal y de mayor complejidad.	• Observación de desempeño de un controlador predictivo. • Comparación de un controlador predictivo frente a una estrategia de control convencional. • Manejo y familiarización con la planta de doble tanque acoplado Quanser.	

2. MARCO TEÓRICO

CONTROL PREDICTIVO

El control predictivo o control avanzado, es una estrategia de control que se ha impuesto en las últimas décadas en la industria de procesos como la mejor opción para controlar un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas satisfaciendo además un conjunto de restricciones de operación del mismo. Las estrategias de control predictivo lineal, incluidas en diferentes productos comerciales están siendo aplicadas con éxito en los últimos años. Los retos existentes consisten en el diseño de algoritmos de control no lineal aplicables, de fácil implementación y haciendo uso de modelos no lineales para una operación óptima del proceso en todo su rango de funcionamiento.

ALMACENAMIENTO DE FLUIDO

El almacenamiento de fluidos se lleva a cabo por medio de tanques que deben cumplir con una serie de especificaciones dependientes de las propiedades del fluido o tipo de componente que se requiera almacenar, con el objetivo de la realización de tratamientos que optimicen la calidad del producto antes de salir al mercado. Con el pasar de los años se han ido modernizando y hoy en día encontramos diversos tipos de tanques que se acoplan a los requerimientos y parámetros establecidos a la hora de almacenar un determinado product

TANQUES ACOPLADOS QUANSER

¿CÓMO FUNCIONAN?

Diseñado en asociación con Prof. Karl Åström y Prof. Karl Henrik Johansson, El sistema de tanques consta de una bomba con dos tanques. Cada tanque Está equipado con un sensor de presión para medir el nivel del agua. La bomba impulsa el agua desde La cuenca inferior hasta la parte superior del sistema. Dependiendo de cómo Se configuran válvulas de salida,

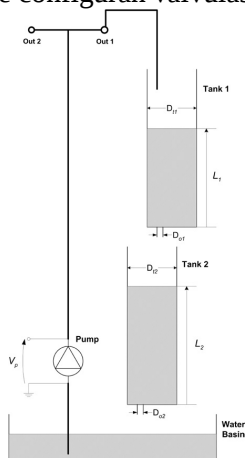


Figura 1. Diagrama de bloques de la planta tomado de information sheet of Quanser.

El agua fluye entonces hacia el depósito superior, Tanque inferior, o ambos. La velocidad de flujo también se puede cambiar usando el flujo de salida Con diferentes diámetros. La capacidad de dirigir el flujo de agua, junto con los orificios de salida variable, permite varias configuraciones interesantes de una sola salida de entrada única (SISO). Además, dos o más tanques acoplados se pueden combinar juntos para experimentos MIMO (Múltiple Input Múltiple Output). Los problemas únicos que implican dinámica de fluidos, presión y retrasos de tiempo se transmiten eficazmente con este sistema.



Figura 2. Descripción grafica de la planta y sus componentes planta tomado de infomation sheet of Quanser [10].

3. MATERIAL DE CONSULTA

- Se encontrará información pertinente en libro Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB® de Liuping Wang.

4. ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE

Descripción: Apropiarse de los conocimientos explicados anteriormente para así llevarlos al laboratorio realizando pequeñas pruebas y familiarización con la planta Quanser, en las cuales en cada una el estudiante será evaluado dependiendo de los ítems que el profesor requiera.

Ambiente(s) requerido:

ETM 11 y alguno de los dos primero computadores ya que son los únicos con licencia

Material (es) requerido: Computador con licencia Quanser, MatLab, Planta Quanser de doble tanque acoplado, destornillador de pala pequeño, mesa de ETM
Instructor (es): Eduard Galvis, Santiago Baquero, Felipe Jaramillo

5. ACTIVIDADES

- Estudio del modelo matemático de la planta propuesto por Quanser.
- Simulación de controlador predictivo mediante el bloque MPC toolbox de Matlab.
- Familiarización con la planta Quanser y sus posibles configuraciones, mediante los ejemplos y controladores de inicio proporcionados por Quanser.
- Estudio de variables de sintonización de control predictivo y optimización del controlador.
- Implementación de controlador predictivo implementado en una función de Matlab y suministrado por alguno de los instructores de la práctica para la implementación en la planta Quanser.
- Comparación de desempeños frente a controladores predeterminados de Quanser.

6. EVIDENCIAS Y EVALUACION

Tipo de Evidencia	Descripción
De conocimiento	Modelamiento de la planta, sintonización de controlador predictivo.
Desempeño	Manejo de herramientas para la simulación y elaboración de controladores para sistemas como la planta Quanser.
De Producto	Entrega de la solución a cada actividad planteada de manera física y digital.
Criterios de Evaluación	Actividad 1: Registro de datos adquiridos, simulaciones, gráficas, controlador implementado e Informe desarrollado.
Fecha de Presentación	