



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE MECATRÓNICA**

**Control de inventarios en cadenas de producción mediante
estimación de demanda usando control GPI y control por rechazo
activo de perturbaciones**

T E S I S

Que presenta

Ing. Adriana Piedad Escudero Gómez

Para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias

En la especialidad de:
Ingeniería Eléctrica

Directores de Tesis:
**Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles
Dr. Hebertt Sira Ramírez**

Ciudad de México

Enero de 2018

Agradecimientos

Por ser la mejor amiga y cómplice y cuidar de mi sin pedir nada a cambio, desde mi niñez hasta la fecha. Usted me impulsa siempre a salir adelante y por ello le dedico este logro. Gracias por ser mi madre....

Martha Gómez Pérez

A Conacyt, por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto de tesis.

Por permitirme la realización de este proyecto y ser mis asesores.....

Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles

Dr. Hebertt Sira Ramírez

Abstract

In this thesis the cases of supply chain control are addressed, for inventory control systems using an estimation technique based on extended state observers and the Active Rejection of Disturbances technique. The approach makes the statistically based average forecast unnecessary and also shows that it is adequately extensible to efficiently handle the effects of production time on production orders. The characteristics of the experimental platform are exposed, as well as; the correspondence with the dynamic system. Simulations and experimental results applied to the supply chain are presented, these results correspond to the theoretical framework. The results extend to the case of production rates subject to delay effects by incorporating a variant of the popular Smith Predictor.

Resumen

En este trabajo de tesis se abordan los casos de control de cadenas de suministro, para sistemas de control de inventarios utilizando una técnica de estimación basada en observadores de estado extendido y la técnica de Rechazo Activo de Perturbaciones. El enfoque hace que sea innecesario el pronóstico promedio basado estadísticamente y también se muestra que es adecuadamente extensible para manejar eficientemente los efectos de tiempo de producción en los pedidos de producción. Se exponen las características de la plataforma experimental, así como; la correspondencia con el sistema dinámico. Se presentan las simulaciones y los resultados experimentales aplicados a la cadena de suministro, dichos resultados presentan la correspondencia con el marco teórico. Los resultados se extienden al caso de las tasas de producción sometidas a efectos de retardo mediante la incorporación de una variante del popular Predictor de Smith.

Índice general

Agradecimientos	3
Resumen	4
Resumen	5
Lista de figuras	8
Lista de tablas	10
1. Introducción	1
1.1. Definición de cadenas de suministro	1
1.2. Elementos de una cadena de suministro	2
1.2.1. Elementos estructurales	3
1.2.2. Elementos de control	3
1.2.3. Componentes clave	5
1.2.4. Restricciones	5
1.2.5. Variables de decisión	6
1.2.6. Modelos	6
1.3. Motivación	9
1.4. Objetivos	11
1.4.1. General	11
1.4.2. Específicos	11
1.5. Organización de la Tesis	12
2. Preliminares	13
2.1. Modelo de las cadenas de suministro	13
2.2. Predictor de Smith	15
2.3. Control GPI	18
2.3.1. Generalización	18
2.4. Control por Rechazo Activo de Perturbaciones	23

3. Plataforma experimental de un sistema hidráulico como cadena de suministro	27
3.1. Funcionamiento	27
3.2. Estructura del nodo	29
3.2.1. Tanque	29
3.2.2. Sensor de flujo	31
3.2.3. Tubería	32
3.2.4. Bomba hidráulica	32
3.2.5. Electroválvula	33
3.2.6. Sensor de presión diferencial	34
3.2.7. Circuito de control para la electroválvula	37
3.2.8. Tarjeta de adquisición de datos Sensoray 626	39
4. ADRC con Predictor de Smith	40
4.1. Seguimiento de inventario bajo efectos de retardo en las órdenes de producción	40
4.2. Prueba de convergencia	44
4.3. Caso de estudio	45
4.3.1. Trayectoria de la tasa de demanda	45
4.3.2. Perfil de inventario deseado	46
4.3.3. Simulación y resultados experimentales	47
4.3.4. Conclusiones	52
5. ADRC con control PI^2D para nodo no productor	53
5.1. Formulación de problema	53
5.2. Diseño del controlador	53
5.3. Prueba de convergencia	55
5.4. Caso de estudio	56
5.4.1. Trayectoria de la tasa de demanda	56
5.4.2. Perfil de inventario deseado	56
5.4.3. Simulación y resultados experimentales	57
5.4.4. Conclusiones	61
6. ADRC con control PID para nodo productor	62
6.1. Problema de control de inventario	62
6.2. Diseño del controlador y observador	63
6.3. Prueba de convergencia	65
6.4. Caso de estudio	66
6.4.1. Trayectoria de la tasa de demanda	66
6.4.2. Perfil de inventario deseado	66
6.4.3. Simulación y resultados experimentales	67
6.4.4. Conclusiones	69

7. Conclusiones	70
7.1. Trabajo futuro	71
Apéndice A: Estructura del tanque	72
Bibliografía	80

Índice de figuras

1.1. Elementos de la cadena de suministro [1]	2
2.1. Estructura de una cadena de suministro.	13
2.2. Estructura clásica del PS.	16
2.3. Control GPI de un sistema de orden n a través de reconstructores integrales.	19
2.4. Control GPI de una planta de integración de orden n como una red de compensación clásica.	22
3.1. Estructura de un nodo.	28
3.2. Estructura de un nodo.	29
3.3. Tanque de acrílico.	30
3.4. Sensor de flujo.	31
3.5. Tubería.	32
3.6. Bomba hidráulica modelo PKM60.	33
3.7. Principio de funcionamiento electroválvula.	33
3.8. Sensor de presión de silicio.	34
3.9. Esquema de medición de nivel.	35
3.10. Linealidad del sensor de presión.	36
3.11. Circuito de control de la electroválvula.	37
3.12. Circuito de control de la electroválvula.	38
3.13. Tarjeta de adquisición de datos	39
4.1. Esquema de predictor de Smith para un control de nivel de inventario en un sistema de producción/inventario con un retardo conocido.	41
4.2. Inventario deseado para el caso descendente	48
4.3. Resultados de simulación	48
4.4. Resultados experimentales	49
4.5. Resultados experimentales	49
4.6. Inventario deseado para el caso descendente	50
4.7. Resultados de simulación	50

4.8. Resultados experimentales	51
4.9. Error de seguimiento del inventario	51
5.1. Resultados de simulación	58
5.2. Resultados experimentales	58
5.3. Error de seguimiento del inventario	59
5.4. Resultados de simulación	59
5.5. Resultados experimentales	60
5.6. Error de seguimiento del inventario	60
6.1. Resultados de simulación	68
6.2. Resultados experimentales	68
6.3. Error de seguimiento del inventario	69

Capítulo 1

Introducción

Alguna vez se han preguntado, ¿de dónde vienen los productos de consumo que llegan a nuestras manos? Detrás de esos productos existen toda una serie de actividades, personas, tecnologías, información y recursos que hacen posible la llegada de dichos productos a nuestras manos. Los productos de consumo son resultado de la operación de una *cadena de suministro*.

1.1. Definición de cadenas de suministro

Una Cadena de Suministro (CS) puede ser definida como un proceso integrador [2], donde un número de entidades (proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas) trabajan de forma conjunta para:

- Adquirir materias primas
- Transformar las materias primas en productos finales, y
- Suministrar estos productos finales a los clientes

La CS se caracteriza por el flujo de información aguas arriba y por el flujo de materiales aguas abajo. El proceso integrado de la CS, desde la adquisición de materiales hasta la entrega de productos finales al cliente, se compone de dos procesos básicos:

- El proceso de planificación de la producción y control de inventario, y
- El proceso de distribución y logística

Ambos procesos proporcionan el marco básico para el movimiento de materias primas y su transformación en productos finales. El proceso de planificación de la producción y el control de inventario aborda las actividades de fabricación y el almacenamiento. De forma específica, la planificación de la producción determina el diseño y la gestión del proceso de fabricación.

Siendo la CS un sistema complejo, debido a que intervienen retardos, incertidumbre, etc., los modelos matemáticos que tratan de representar la CS no siempre resultan sencillos, dificultando llegar a soluciones óptimas y requiriendo tiempos de resolución largos. Para reducir dicha complejidad, es habitual la formulación de hipótesis para representar un sistema de CS de forma más simplificada. No obstante, esta simplificación puede resultar en la generación de un modelo que se aleje demasiado de la realidad. Es por ello, que la simulación es una herramienta utilizada para el modelado de sistemas complejos como la CS. La simulación por tanto, permitirá modelar, analizar y evaluar la CS así como posibles escenarios, sin necesidad de que previamente hayan existido, de forma, que puedan compararse.

1.2. Elementos de una cadena de suministro

La CS se puede clasificar en dos grupos de elementos [1]: Elementos estructurales y elementos de control. En la Figura 1.1 se muestran los elementos de las cadenas de suministro.

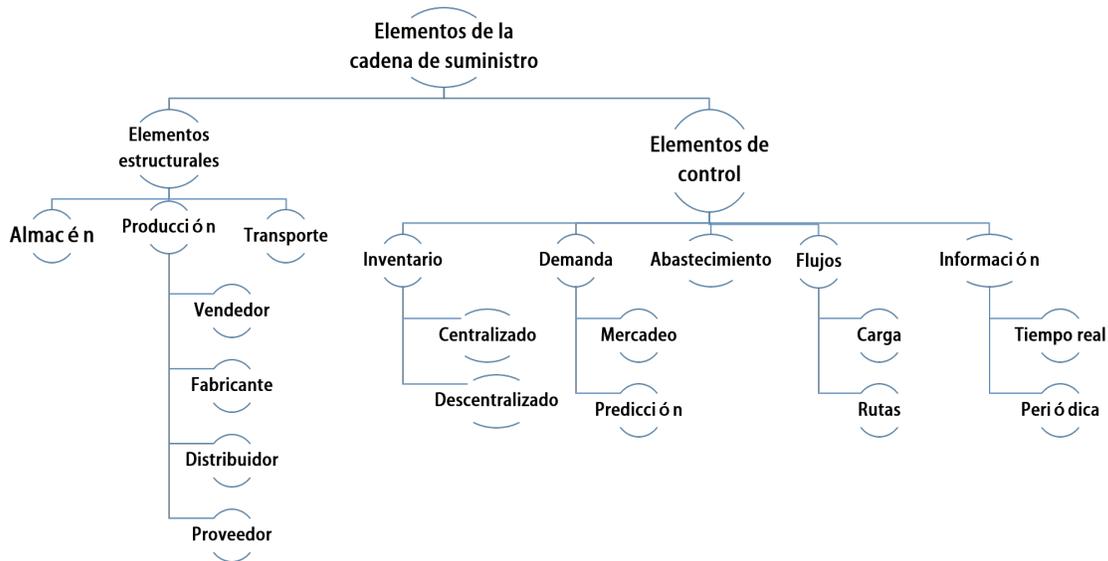


Figura 1.1: Elementos de la cadena de suministro [1]

1.2.1. Elementos estructurales

La estructura de las cadenas de suministro depende de la cantidad de elementos que la integren y estos son los factores que afectan el desempeño de la cadena [1].

- **Proveedores:** Un proveedor puede ser una planta de manufactura, de ensamblaje, o pueden poseer su propia cadena de suministro para la producción. Su operación es caracterizada por los contratos del proveedor que determinan el tiempo de entrega, el costo y la información que comparte con clientes.
- **Fabricantes:** Las plantas de manufactura es donde los componentes son ensamblados y los productos son manufacturados. En general, las órdenes provienen de los centros de distribución pero también pueden provenir de los vendedores.
- **Centros de distribución:** Están encargados de recibir productos desde las plantas de manufactura o desde plantas proveedoras y almacenarlos o enviarlos hacia el vendedor correcto. Cuando arriba una orden desde el vendedor, los productos requeridos son removidos del área de almacenaje y enviados a su destino.
- **Vendedor:** Un vendedor es donde los clientes compran productos. Cuando una orden de un cliente solicitando un producto es recibida, se determina que producto está siendo ordenado. El producto es empacado y embarcado al cliente si está disponible en inventario, en caso contrario la orden es añadida a una cola de acuerdo a su prioridad. Cuando el producto es entregado desde un centro de distribución o desde una planta de manufactura la orden es removida de la cola.
- **Clientes:** El cliente es el elemento más importante y se busca su satisfacción en todos sus requerimientos.

1.2.2. Elementos de control

El buen funcionamiento de las cadenas de suministro depende de la habilidad y la integración de los elementos de control que se consideren [3].

- **Control de inventario:** Ellos controlan el flujo de materiales en el interior de la cadena de suministro y son principalmente de dos tipos: centralizados y descentralizados.
 - **Control centralizado:** Estos elementos controlan el inventario en un nodo en particular mientras toma en cuenta el nivel de inventario en la cadena de suministro como un todo. Un requerimiento importante para poder implementar una política de control centralizado, es la capacidad de acceder a la información referente a los niveles de inventario de las otras entidades en la cadena de suministro.

1.2. ELEMENTOS DE UNA CADENA DE SUMINISTRO

- **Control descentralizado:** Estos elementos controlan solamente el nivel de inventario en un nodo en particular, considerando solo el nivel de inventario en ese elemento de la cadena de suministro.
- **Control de la demanda:** El proceso de la demanda se basa en la demanda actual y la pronosticada. Las órdenes contienen información sobre el tipo de productos que han sido ordenados, la cantidad de productos que son requeridos, el destino a donde los productos serán embarcados y el día de entrega de la orden. Dos elementos importantes del control de la demanda son:
 - **Mercadeo:** Mediante anuncios, descuentos, cupones y ventas estacionales se estimula la demanda adicional de productos. El incremento en la demanda puede ser estacional, aleatorio o permanente.
 - **Elementos de predicción:** Los elementos de predicción determinan cómo se pronostica la demanda en la cadena de suministro y cómo estos pronósticos se desarrollan en el tiempo.
- **Control de abastecimiento:** Los elementos de control de abastecimiento establecen los términos y condiciones para la entrega de los materiales una vez que las órdenes han sido puestas. Los contratos contienen información sobre el precio del material, tamaño del contrato, volumen a ser comprado durante el periodo de contrato, penalizaciones por incumplimientos, tiempos de entrega una vez que se recibe la orden, y tipos de control de información que pueden ser usados.
- **Control de flujo:** Los elementos de control de flujo coordinan el flujo de productos entre los elementos de producción y de transporte. Los tipos de control de flujo son los siguientes:
 - **Elementos de carga:** Administran que transporte será cargado o descargado.
 - **Elementos de enrutamiento:** Controlan la secuencia en la cual los productos son entregados por los elementos de transporte.
- **Control de información:** Los tipos de flujos de información son los siguientes:
 - **Información en tiempo real:** Se le conoce como directamente accesible y se refiere a la propagación instantánea de la información. Por ejemplo, esta puede ser información referente a los niveles de inventario, capacidades de almacenamiento, averías en las maquinas o referirse a las rutas tomadas por los elementos de transporte.
 - **Periódicas:** La información periódica puede indicar cambios en la estrategia de negocios, incremento de precios, introducción de nuevos servicios o mejoras en los productos, introducción de nuevos elementos de producción,

etc. La información periódica es enviada a todas las entidades en la cadena de suministro en forma de mensajes, al contrario de la información en tiempo real que debe estar explícitamente en coordinación con los elementos de control.

1.2.3. Componentes clave

Sin conocer cuáles son los componentes esenciales de una cadena de suministro, no se pueden establecer metas. Algunos componentes clave son los siguientes:

- ***Iniciativas de servicio al cliente:*** es considerar la disponibilidad de producto y los tiempos de servicio como tiempos de entrega, tiempos de procesamiento de órdenes.
- ***Valor monetario:*** es generalmente definido como una fracción del ingreso total. Una cadena de suministro puede realzar este valor monetario a través de los ingresos de las ventas y la actividad productiva, reduciendo gastos. Entonces el valor monetario refleja la eficiencia y rentabilidad de operar la cadena de suministro, este es ampliamente usado como función objetivo en la cadena de suministro.
- ***Transacciones de conocimiento e información:*** la información sirve como conexión entre varios elementos de la cadena de suministro, permitiendo a los socios de la cadena de suministro coordinar sus acciones y facilitar el monitoreo de su inventario. Tal información incluye datos, tecnologías, especificaciones, lista de clientes, precios, perfiles de clientes, predicciones de ventas e historiales de órdenes.
- ***Elementos de riesgo:*** estos son reducidos al compartir recursos con los otros miembros.

1.2.4. Restricciones

Las restricciones son limitaciones que determinan la viabilidad de tomar algunas alternativas. Algunas de las restricciones son las siguientes:

- ***Capacidad:*** las capacidades financieras, productivas, de servicio y suministro determinan el resultado deseado en términos del inventario, la producción, inversiones, adopción de tecnología informática y satisfacción del cliente.
- ***Demanda:*** la integración de la cadena de suministro esta ideada para sincronizar la capacidad de abastecimiento contra la demanda.

1.2.5. Variables de decisión

Las variables de decisión determinan la eficiencia del sistema. Algunas de las variables de decisión son las siguientes:

- **Número de instalaciones y equipamiento:** determina los elementos necesarios.
- **Ubicación:** determina la ubicación de los elementos de la cadena de suministro.
- **Asignación:** determina cuales almacenes y/o plantas deben servir a los clientes y segmentos del mercado.
- **Estructuración de la cadena:** determina la estructura de una cadena de suministro.
- **Secuencia de servicio:** determina rutas para vehículos de entrega.
- **Volumen:** determina el volumen de compras, producción, y de embarque en cada elemento de la cadena de suministro.
- **Nivel de inventario:** determina los niveles de materia prima en cada elemento de la cadena de suministro.

1.2.6. Modelos

Podemos construir un modelo, que representa un sistema a fin de explorar comportamientos. Cuando se propone un modelo se hacen eliminaciones y simplificaciones para hacerlo más fácil de entender. Sin embargo, aún con la sencillez del modelo, este debe ser capaz de reproducir la realidad. Una limitación de los modelos es que no pueden capturar todos los aspectos de un sistema. Al proponer un modelo podemos considerar ciertos componentes clave dependiendo del interés de estudio.

Se han desarrollado distintos modelos para explicar el comportamiento de las cadenas de suministro:

- **Determinísticos (no probabilísticos):** En este modelo se asume que todos los parámetros del modelo son conocidos y fijos. Se pueden considerar los siguientes modelos:
 - Los modelos de flujos provienen de la teoría de tráfico y fueron introducidos para resolver problemas relacionados con colas [4].
 - Los modelos mediante balances de flujos que describen el comportamiento de un sistema en su arranque, en donde se consideran los tiempos de retardo [5].

- Modelo donde se mantiene la idea de separar una cadena de suministro en nodos para la obtención de un modelo continuo en el tiempo. En este modelo se dejan de lado los flujos de órdenes y se centra el análisis en los flujos de materiales. A partir de balances de materia se obtiene una ecuación que modela el cambio en el nivel de inventario de un nodo. El control sobre el nivel de inventario se logra a través de una variable que modifica el flujo de entrada de material al nodo. Así, un par de ecuaciones diferenciales lineales modelan el comportamiento de un nodo [6]. Se analiza la estabilidad de una cadena de suministro lineal cuando se asume en el cálculo del control propuesto los valores de los niveles de inventario de más de un sólo nodo, con el propósito de demostrar las ventajas de compartir la información de los inventarios entre los integrantes de la cadena.
- Modelo continuo en el tiempo [7]. Aquí se presenta la división de una cadena en sus elementos básicos llamados nodos, los cuales son caracterizados cada uno por un balance de inventarios y un balance de órdenes. El modelo considera los flujos de materiales y de información dentro de la cadena de suministro, así como la existencia de tiempos de retardo y la capacidad de la cadena de suministro de considerar la producción de distintos productos. El control sobre el inventario se logra con las órdenes impuestas al nodo proveedor. Dicho control actúa sobre cada nodo, de forma que se logra un control descentralizado en la cadena de suministro [8]. Se utiliza el mismo modelo, pero se analiza la ventaja de utilizar un esquema de control centralizado sobre uno descentralizado.
- Modelo donde se distinguen dos clases de nodo en función de su capacidad productiva [9]. También se introducen límites en los niveles de inventario posibles y el control sobre los nodos. Se privilegia la descripción del flujo de materiales sobre el flujo de información. Se introduce un control no lineal acotado y descentralizado capaz de cumplir con el objetivo de control, que en este caso es la regulación de los niveles de inventario de cada uno de los nodos entorno de un valor deseado. Lo anterior implica la sincronización en el estado estacionario de los flujos de entrada y de salida de cada nodo, y en su caso de la totalidad de la cadena de suministro. Se extiende el modelo anterior para considerar un nivel de inventario de órdenes no atendidas en los nodos sin capacidad productiva e introducir parcialmente al modelo los flujos de información [10]. El mismo control logra la regulación del nivel de inventario deseada y la sincronización de la cadena.
- Modelado mediante el uso de Redes de Petri híbridas. La cadena queda definida por variables discretas y continuas, que modifican su valor en el tiempo conforme se presentan transiciones discretas y continuas, las cuales constituyen las variables de control sobre el sistema. [11].

- Modelo discreto en el tiempo y a partir de balances de materiales y de órdenes [12], de donde se obtienen funciones de transferencia discretas que modelan el comportamiento de cada componente de la cadena de suministro.
- **Estocásticos (probabilísticos):** Los modelos estocásticos, toman en cuenta las incertidumbres y los parámetros aleatorios como la demanda de los clientes, tiempos muertos y la fluctuación en la producción.
- **Tecnología informática:** Muestra los avances informáticos para mejorar las cadenas de suministro. Se han desarrollado herramientas como:
 - **Los planificadores de las necesidades de material (MRP, por sus siglas en inglés: Material Requirement Planning):** El objetivo del MRP es dar un enfoque más objetivo, sensible y disciplinado a determinar los requerimientos de materiales de la empresa. Para ello el sistema trabaja con dos parámetros básicos: tiempos y capacidades. El sistema MRP calculará las cantidades de producto terminado a fabricar, los componentes necesarios y las materias primas a comprar para poder satisfacer la demanda del mercado.
 - **Los sistemas de planificación de recursos de la empresa (ERP, por sus siglas en inglés: Enterprise Resource Planning):** Son sistemas de gestión de información que integran y automatizan muchas de las prácticas de negocio asociadas con los aspectos operativos o productivos de una empresa. Su principal desventaja es que es un sistema extremadamente costoso.
 - **Los programas de reabastecimiento continuo (CRP, por sus siglas en inglés: Continuous Replenishment Program):** Se enmarcan dentro de la iniciativa ECR (Efficient Consumer Response) o Respuesta Eficiente al Consumidor para proporcionar al cliente final el mayor valor, el mejor servicio y la máxima variedad de productos

1.3. Motivación

Las cadenas de suministro son sistemas dinámicos donde la evolución del sistema depende de las interacciones tales como la capacidad del proveedor, el arribo de bienes a un distribuidor, la capacidad del productor y el arribo de bienes al cliente, por lo que resulta conveniente modelar cada una de las entidades, como sistemas dinámicos a controlarse, de la CS por separado.

El control del nivel de inventario ha sido objeto de un interés en los sistemas de producción/inventario, desde los trabajos seminales en los años cincuenta de H. Simon [13] y H. J. Vassian [14], donde se muestra un enfoque de servomecanismos para la síntesis de reglas de decisión de tasa de producción, bajo incertidumbre en la tasa de demanda. Para una reseña extensa sobre las aplicaciones de la teoría del control en los problemas de control de producción/inventario, referimos al lector a M. Ortega y Lin [15], el libro de S. Axater [16], las obras de [17] y a Towill y sus colegas [18]. Aplicaciones de la teoría del control a sistemas de producción/inventario pueden encontrarse en J. Dejonckheere [19].

El Control Activo de Rechazo a Perturbaciones (ADRC, por sus siglas en inglés: Active Disturbance Rejection Control) es un área de investigación establecida en el control de sistemas dinámicos sometidos a incertidumbres endógenas y exógenas. El método, naturalmente adaptado a los modelos de sistemas entrada-salida, se basa en el uso de un Observador de Estado Extendido (ESO, por sus siglas en inglés: Extended State Observer) de alta ganancia, que calcula de forma precisa y simultánea los estados (variables de fase) del sistema, además, se estiman los términos de perturbación en la dinámica del sistema. Para los resultados sobre ADRC, el lector puede referirse a Han [20], Sun y Gao [21], Gao [22] y Sira-Ramirez [23].

Una explicación detallada de las principales propiedades del ADRC fue aportada por Guo y Zhao [24], donde se proporciona el razonamiento del por qué las incertidumbres dependientes del estado y exógenas pueden estimarse simultáneamente y con precisión a través de un ESO, y luego canceladas, en una gran clase de sistemas no lineales (véase también [25] y [26]). Recientemente, se ha producido una antología sobre ADRC en memoria del quinto aniversario del fallecimiento del Prof. J. Han (ver [23]).

Los sistemas de producción/inventario sujetos a tasas de demanda desconocidas y variables en el tiempo pueden beneficiarse de la metodología de ADRC, en tanto que los efectos de la tasa de demanda pueden considerarse como una perturbación exógena a una regulación de inventario o un problema de seguimiento de trayectorias de inventario.

Los efectos variables en el tiempo obtenidos de los términos inciertos en la dinámica se incorporan inmediatamente en una la ley de control de realimentación para cancelar o contrarrestar las perturbaciones. La ley de control de realimentación se diseña entonces como si las perturbaciones estuvieran idealmente ausentes de la descripción entrada-salida del sistema.

En el presente trabajo de tesis se propone el uso de una estrategia de producción de ED/SD en un problema de control de seguimiento de trayectorias de inventario. Los resultados se extienden al caso de los índices de producción que experimentan efectos de retardo fijo (véase [27]) incorporando una variante del popular predictor de Smith [28] que es susceptible a los esquemas de ADRC a través de la predicción de perturbaciones [29].

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Proponer una estrategia de control automático para cadenas de suministro, sujetas de demandas inciertas, mediante una ley de producción, basada en ADRC, que satisfaga la demanda mientras regula el inventario a trayectorias deseadas. La estrategia consiste en estimar la demanda en línea, cancelarla de la dinámica del inventario mediante una ley de producción y regular el inventario para que este siga una trayectoria pre-especificada en el tiempo. Validar dicha estrategia, de manera experimental, en un sistema hidráulico análogo.

1.4.2. Específicos

- Implementación de la estrategia de control de manera experimental.
- Analizar la estrategia de control propuesta bajo la presencia de retardo en la variable de producción, simulado mediante un sistema de primer orden y utilizando el Predictor de Smith.

1.5. Organización de la Tesis

En el Capítulo dos se muestran los fundamentos teóricos para la aplicación de las técnicas de control aplicadas a cada experimento. El Capítulo tres muestra la estructura de la plataforma del sistema, tanques, sensores, etc.

En el Capítulo cuatro se presenta la formulación del problema de seguimiento de la trayectoria del inventario utilizando una estimación de la tasa de demanda en línea basada en el ESO, así como; la aplicación del predictor de Smith. En el Capítulo cinco se muestra el modelo del sistema de inventario para un nodo no productor y la aplicación de un control ADRC, así como, la implementación de un control PI^2D . En el Capítulo seis se presenta el modelo del sistema para un nodo productor, aplicando la estrategia de control ADRC.

Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y perspectivas de trabajo a futuro.

Capítulo 2

Preliminares

2.1. Modelo de las cadenas de suministro

La naturaleza discreta de la gran mayoría de las cadenas de suministro, ya que el producto final de la cadena generalmente es contado por unidades, genera que se propongan modelos discretos para su estudio. Sin embargo, el modelo aquí considerado parte de una representación continua de variables que representan el comportamiento de una cadena de suministro, como el propuesto en Morales y Rodríguez-Angeles [9]. Consideremos una cadena de suministro formada por n -nodos con flujos de información y material como se muestra en la Figura 2.1. Los flujos de información representan órdenes de material y bienes y pueden considerarse como una estrategia de control para la regulación del inventario. Cada nodo i (para $i = 1, \dots, n$) se representa por su nivel de inventario I_i y su producción o tasa de entrada P_i , dependiendo de si es productor, almacén, proveedor o nodo de distribución, es decir, productor o no productor.

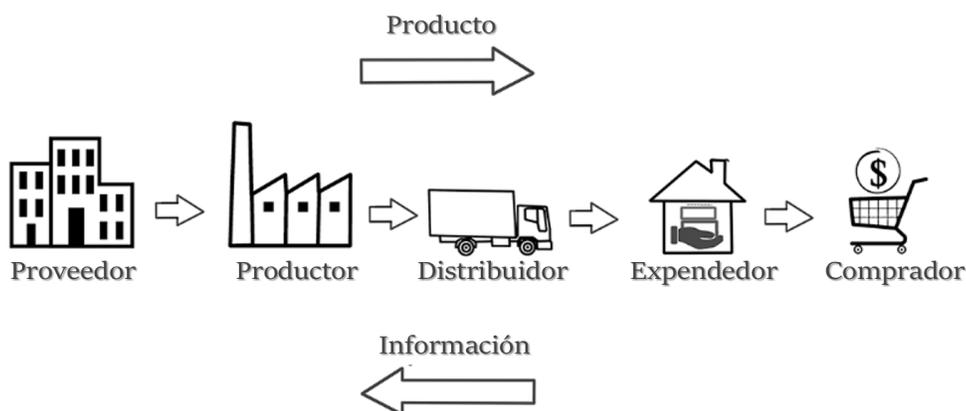


Figura 2.1: Estructura de una cadena de suministro.

2.1. MODELO DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO

Entonces el modelo del inventario, para ambos tipos de nodo, productor o no productor, es:

$$\frac{d}{dt}I_i = P_i - S_i \quad (2.1)$$

La demanda (S_i) a la que puede estar sometido un nodo está dada por:

$$S_i = \sum_{j=1}^r F_{i,j}P_j \quad (2.2)$$

donde r es el número total de nodos que desarrollan alguna demanda (P_j) sobre el nodo en cuestión y $F_{i,j}$ se denomina *razón de producción* del nodo j al nodo i .

En el caso de un nodo no productor su tasa de entrada (P_i) corresponde al material recibido de los proveedores; por lo tanto, no tiene dinámica propia.

Para un nodo productor su tasa de producción varía de acuerdo a políticas de producción. Cuando la tasa de producción cambia se introduce un tiempo de adaptación T_i . Si w_i es la acción de control que modifica la tasa de producción P_i en un nodo productor, entonces la dinámica de la tasa de producción para un nodo productor estará dada por:

$$\frac{d}{dt}P_i = \frac{1}{T_i}(w_i - P_i) \quad (2.3)$$

En donde queda claro que un valor relativamente grande del tiempo de adaptación implicará una reacción lenta de la tasa de producción.

2.2. Predictor de Smith

Desde hace mucho tiempo, ha existido interés en las estrategias de control de plantas con retardo de tiempo, debido a que el retardo de tiempo constituye un fenómeno muy común en el comportamiento dinámico de prácticamente todas las plantas industriales, unidades de procesos, sistemas ecológicos, biotecnológicos, etc. El retardo de tiempo es un fenómeno que se origina debido al desplazamiento temporal entre dos o más variables de una planta y puede ser generado por ejemplo, por el tiempo necesario para transportar masa, energía o información. El retardo de tiempo representa una significativa limitante en los sistemas control y debe ser considerado tanto en las etapas de análisis como en las de diseño de los controladores. Durante ese intervalo de tiempo, la planta no responde en absoluto a las señales de entrada, y cualquier intento de manipular las variables de salida antes de que finalice el retardo conlleva inevitablemente al fracaso. Objetivamente, las investigaciones en el campo del retardo de tiempo comenzaron en el siglo XVIII con los trabajos de D. Bernoulli, L. Euler, J. D'Alembert, dentro de un entorno meramente teórico, donde por primera vez se abordan las ecuaciones diferenciales con retardos, como se muestra en Kuang [30]. Existen diferentes causas que originan el retardo de tiempo en los sistemas físicos, entre las que se destacan: la distancia física entre el controlador y el instrumento de medición; el tiempo requerido por los actuadores para producir un cambio, por ejemplo válvulas o compuertas; el comportamiento dinámico intrínseco de algunas plantas, por ejemplo, el tiempo requerido por las reacciones químicas para obtener el producto deseado en los reactores químicos; el tiempo exigido por los sensores para entregar las mediciones; el tiempo de procesamiento demandado por los controladores para obtener la señal de control, etc. Desde la perspectiva del control clásico, el retardo de tiempo introduce fase negativa, la cual reduce la frecuencia crítica y el margen de fase, y por ende limita la máxima ganancia que se puede utilizar, así como la velocidad de respuesta de los sistemas de control. Uno de los procedimientos utilizados para solucionar el efecto negativo del retardo de tiempo consiste en reajustar el controlador reduciendo la ganancia y aumentando la constante de integración, para de esta forma asegurar la estabilidad del sistema de control de lazo cerrado (Normey-Rico y Camacho [31]). Sin embargo, ello conlleva a una respuesta temporal del sistema de control muy lenta, así como a un bajo rechazo a las perturbaciones, lo cual en diversos casos prácticos es inadmisibles. Una tendencia en el control de plantas con retardo de tiempo se basa en el diseño de: el predictor de Smith, así como sus múltiples extensiones. El predictor de Smith (PS), propuesto en 1957 por el norteamericano Otto Smith [32] constituye sin lugar a dudas el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo de tiempo debido a su elevada efectividad y simple implementación. Esta estructura de control surgió con la idea de mejorar el desempeño de los controladores clásicos (PI o PID) en el control de plantas con retardo de tiempo. Su principal ventaja consiste en

que elimina el retardo de tiempo de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado, cuando su modelo interno describe de forma perfecta el comportamiento dinámico de la planta.

La estructura clásica del PS, se muestra en la Figura 2.2, la cual puede ser dividida en dos partes: el controlador $G_c(s)$ y el predictor. La planta $G_p(s) = G(s)e^{-\tau s}$ se encuentra integrada por el actuador y el proceso con retardo de tiempo, donde τ es un retardo fijo; se considera que la planta es estable.

El predictor está formado por un modelo rápido de la planta $G_m(s)$, sin retardo de tiempo, el cual posibilita calcular la predicción de la salida de la planta $Y_{m2}(s)$, así como por un modelo completo de la planta que incluye el retardo de tiempo, es decir $G_m(s)e^{-\tau_m s}$, cuya salida es la señal $Y_{m1}(s)$. Para que el sistema de control pueda corregir los errores de modelado, así como el efecto de las perturbaciones externas $D(s)$, la salida del modelo completo de la planta $Y_{m1}(s)$ se compara con la salida de la planta $Y(s)$ y la señal de error resultante $E_1(s)$ se realimenta hacia el controlador. Si se considera un modelo perfecto $G_m(s) = G(s)$ y que no existen perturbaciones, la señal de error $E_1(s)$ entre la salida de la planta $Y(s)$ y la salida del modelo completo $Y_{m1}(s)$ es cero, y el controlador $G_c(s)$ puede ser ajustado, al menos en el caso nominal, utilizando el modelo de la planta sin retardo de tiempo. Esta estructura se caracteriza por presentar un pobre rechazo a las perturbaciones externas medibles y/o no medibles.

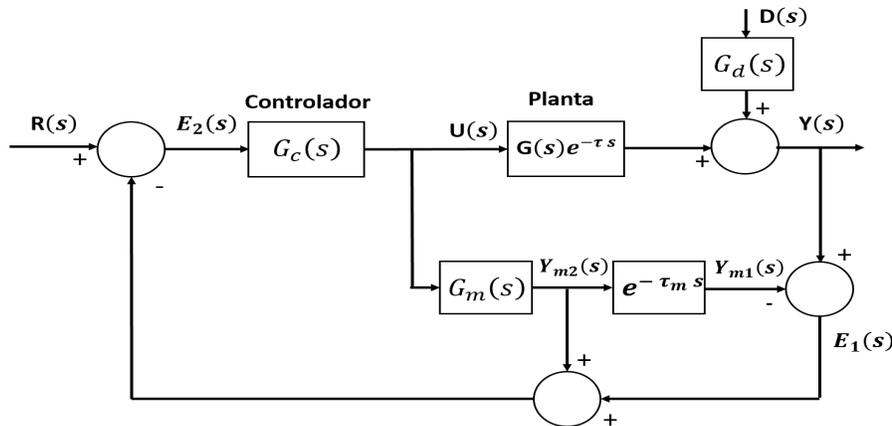


Figura 2.2: Estructura clásica del PS.

De la Figura 2.2 se definen las funciones de transferencia que relacionan la salida $Y(s)$ con la entrada $R(s)$ y la salida $Y(s)$ con la perturbación $D(s)$ para analizar cómo el PS responde frente a variaciones de la referencia o rechaza el efecto de perturbaciones, bajo la consideración de modelado perfecto.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (2.4)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \left[1 - \frac{G_c(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G(s)} \right] G_d(s) \quad (2.5)$$

El predictor de Smith posibilita:

- a) Eliminar de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado, el retardo de tiempo τ , lo cual es muy importante para el diseño y ajuste del controlador;
- b) Factorizar el comportamiento dinámico de la planta de forma implícita en dos partes: $G_m(s)$, que es la parte invertible, aunque no necesariamente propia, y $e^{-\tau s}$, que es la parte no invertible debido al retardo de tiempo.

Es importante señalar, que la estructura convencional del PS presenta el inconveniente de que si se ajusta el controlador para obtener una respuesta deseada frente a cambios en la referencia no se obtiene un buen rechazo al efecto de perturbaciones. Para resolver estas limitaciones han sido propuestas diferentes modificaciones de la estructura clásica del PS. En Huang et al. [33], para aumentar la rapidez del rechazo al efecto de las perturbaciones externas no medibles, se propone una modificación del PS que incluye un filtro con una aproximación inversa del retardo de tiempo en bajas frecuencias. Sin embargo, las mejoras no son significativas cuando el retardo de tiempo es dominante. En Hagglung [34] se propone una estructura de control PI predictivo para procesos autorregulables con retardo de tiempo, la cual puede ser considerada como un caso especial del PS con tres parámetros de ajuste, de forma similar a los controladores PID. Esta propuesta posibilita ampliar su aplicación a plantas con retardo de tiempo dominante, pero incluye restricciones en su diseño. Esta propuesta se mejora en Normey [35] mediante la aplicación de un filtro en la estructura del PS para aumentar su robustez frente a variaciones en los parámetros dinámicos de la planta. En el caso de este trabajo de tesis, se utilizará una extensión de la estructura clásica del PS, para lo cual se introduce un sistema auxiliar que es necesario para sintetizar el control. Más adelante se abordará la aplicación del PS.

2.3. Control GPI

La principal línea de desarrollo del control proporcional integral generalizado (GPI, por sus siglas en inglés: Generalized Proporcional Integral) o control basado en reconstructores integrales, descansa en los sistemas lineales de dimensión finita con algunas extensiones a sistemas diferenciales lineales con retardo y sistemas no lineales (M. Fliess et al. [36]). La motivación del control basado en observadores GPI es simplificar el diseño del controlador a partir de la cancelación de las perturbaciones y dinámicas no modeladas mediante un estimado de éstas.

Los controladores GPI se han establecido como una técnica de control lineal eficiente que presenta robustez frente a perturbaciones clásicas, i.e. escalón, rampas, parábolas, etc., (M. Fliess et al. [36]). Además, se diseñan desde el contexto del rechazo activo de perturbaciones, en el cual se usan modelos simplificados de los sistemas y se estiman y rechazan de manera conjunta y aproximada dinámicas no modeladas, perturbaciones internas y externas del sistema. Estos controladores GPI rechazan de manera efectiva términos aditivos de la dinámica existente entre la entrada del sistema y la salida de este. La metodología considera como elemento clave para el diseño del controlador el orden de integración del sistema, en el caso monovariante. Los controladores GPI incluyen de manera natural y embebida un modelo interno de la función de perturbación que constituye una aproximación polinomial en el tiempo, cuya actualización se obtiene una vez que se realiza la retroalimentación del sistema, lo que permite aproximaciones arbitrariamente cercanas a las perturbaciones desconocidas. El objetivo de control es lograr la cancelación de las perturbaciones aditivas y al mismo tiempo imponer una dinámica lineal en lazo cerrado mediante realimentación de estados estimados, los cuales se obtienen directamente del mismo observador lineal propuesto.

2.3.1. Generalización

Se define un sistema de n -ésimo orden de la forma:

$$y^n = u \quad (2.6)$$

La dinámica del error de seguimiento corresponde a una trayectoria de referencia suave $y^*(t)$ esta dada simplemente por:

$$e_y^{(n)} = e_u, \quad e_y = y - y^*, \quad e_u = u - u^*, \quad u^* = [y^*]^{(n)} \quad (2.7)$$

Los reconstructores integrales de las variables $\dot{e}_y, \dots, e_y^{(n-1)}$, junto con sus errores de reconstrucción (inestables), se proponen en la ecuación:

$$\widehat{e_y^{(n-i)}} = \int_0^t \int_0^{\sigma_1} \dots \int_0^{\sigma_{i-1}} e_u(\sigma_i) d\sigma_i \dots d\sigma_1$$

$$e_y^{(n-i)} = \widehat{e_y^{(n-i)}} + \sum_{j=1}^i e_y^{(n-i+j-1)}(0) \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}$$

$$i = 1, \dots, n-1 \quad (2.8)$$

Un controlador con retroalimentación lineal, basado en los reconstructores integrales de (2.8), requiere de una compensación aditiva a través de integraciones múltiples o iteradas realizadas en la señal de error de seguimiento de salida $e_y(t)$:

$$e_u = \sum_{i=1}^{n-1} k_{2n-i-1} \widehat{e_y^{(n-i)}} - \sum_{i=1}^n k_{n-i} \left(\int^{i-1} e_y(t) \right)$$

$$= - \left[\sum_{i=1}^{n-1} k_{2n-i-1} \left(\int^i e_u(t) \right) \right] - \sum_{i=1}^n k_{n-i} \left(\int^{i-1} e_y(t) \right)$$

$$= - \sum_{i=1}^{n-1} \left(\int^i k_{2n-i-1} e_u(t) + k_{n-i-1} e_y(t) \right) - k_{n-1} e_y \quad (2.9)$$

El diagrama de bloques en la Figura 2.3 representa el controlador GPI de seguimiento de trayectoria junto con la planta de integración.

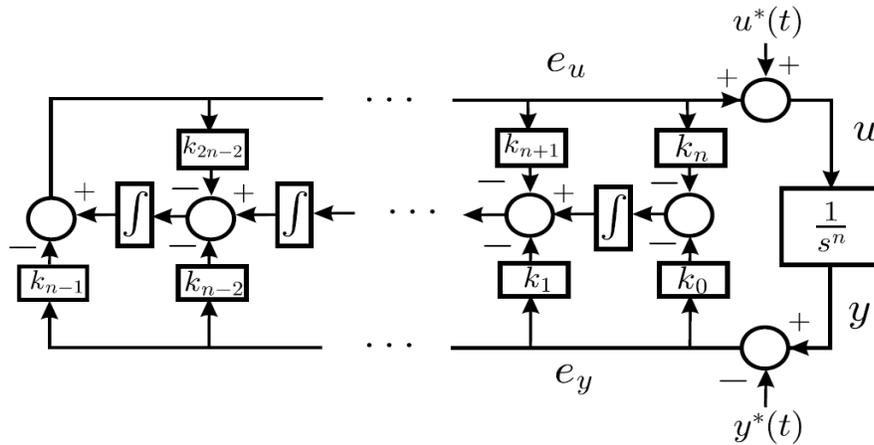


Figura 2.3: Control GPI de un sistema de orden n a través de reconstructores integrales.

De (2.8) y (2.9), se encuentra el sistema en lazo cerrado, dado por:

$$e_y^{(n)} = -k_{2n-2} \widehat{e_y^{(n-1)}} - k_{2n-3} \widehat{e_y^{(n-2)}} - \dots - k_n \widehat{e_y}$$

$$-k_{n-1}e_y - k_{n-2} \left(\int^{(1)} e_y \right) - \dots - k_1 \left(\int^{n-2} e_y \right) - k_0 \left(\int^{n-1} e_y \right) \quad (2.10)$$

Sustituyendo las expresiones de las variables de fase estimadas encontradas en (2.8) en la ecuación (2.6), obtenemos la dinámica perturbada, dada por (2.11) que incluye los efectos de las condiciones iniciales no consideradas:

$$\begin{aligned} e_y^{(n)} = & -k_{2n-2}e_y^{(n-1)} - k_{2n-3}e_y^{(n-2)} - \dots - k_n\dot{e}_y - k_{n-1}e_y \\ & - k_{n-2} \left(\int^{(1)} e_y \right) - \dots - k_0 \left(\int^{(n-1)} e_y \right) \\ & + \left(\sum_{i=1}^{(n-1)} k_{2n-i-1} \sum_{j=1}^i e_y^{(n-i+j-1)}(0) \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Se define,

$$\begin{aligned} z_1 = & \left(\int^{(1)} e_y \right) + \frac{k_{n-3}}{k_{n-2}} \left(\int^{(2)} e_y \right) + \dots \\ & + \frac{k_1}{k_{n-2}} \left(\int^{(n-1)} e_y \right) + \frac{k_0}{k_{n-1}} \left(\int^{(n-2)} e_y \right) \\ & - \left[\left(\sum_{i=1}^{(n-1)} \frac{k_{2n-i-1}}{k_{n-2}} \sum_{j=1}^i e_y^{(n-i+j-1)}(0) \frac{t^{j-1}}{(j-1)!} \right) \right] \\ z_1(0) = & \frac{k_{2n-2}}{k_{n-2}} e_y^{(n-1)}(0) \\ z_2 = & \left(\int^{(1)} e_y \right) + \frac{k_{n-4}}{k_{n-3}} \left(\int^{(2)} e_y \right) + \dots \\ & + \frac{k_1}{k_{n-2}} \left(\int^{(n-3)} e_y \right) + \frac{k_0}{k_{n-3}} \left(\int^{(n-2)} e_y \right) \\ & - \left[\left(\sum_{i=1}^{(n-1)} \frac{k_{2n-i-1}}{k_{n-3}} \sum_{j=2}^i e_y^{(n-i+j-1)}(0) \frac{t^{j-2}}{(j-2)!} \right) \right] \\ z_2(0) = & \frac{k_{2n-2}}{k_{n-3}} e_y^{(n-2)}(0) + \frac{k_{2n-3}}{k_{n-3}} e_y^{(n-1)}(0) \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{n-2} &= \left(\int^{(1)} e_y \right) + \frac{k_0}{k_1} \left(\int^{(2)} e_y \right) \\
 &\quad - \left[\left(\sum_{i=1}^{(n-1)} \frac{k_{2n-i-1}}{k_1} \sum_{j=n-2}^i e_y^{(n-i+j-1)}(0) \frac{t^{j-n+2}}{(j-n+2)!} \right) \right] \\
 z_{n-2}(0) &= \frac{k_{2n-2}}{k_1} e_y^{(2)}(0) + \frac{k_{2n-3}}{k_1} e_y^{(3)}(0) + \dots + \frac{k_{n+1}}{k_1} e_y^{(n-1)}(0) \\
 z_{n-1} &= \left(\int^{(1)} e_y \right) \\
 z_{n-1}(0) &= \frac{k_{2n-2}}{k_0} e_y^{(1)}(0) + \frac{k_{2n-3}}{k_0} e_y^{(2)}(0) + \dots + \frac{k_n}{k_1} e_y^{(n-1)}(0) \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

El sistema en lazo cerrado se obtiene como:

$$\begin{aligned}
 e_y^{(n)} &= -k_{2n-2} e_y^{(n-1)} - \dots - k_n \dot{e}_y - k_{n-1} e_y - k_{n-2} z_1 \\
 \dot{z}_1 &= e_y + \frac{k_{n-i-2}}{k_{n-i-1}} z_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-2 \\
 \dot{z}_{n-1} &= e_y \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

Eliminando la variable z a través de la diferenciación directa de la primera ecuación, $n-1$ veces, se obtiene la ecuación diferencial en lazo cerrado para el error de seguimiento e_y , como se muestra en:

$$e_y^{(2n-1)} + k_{2n-2} e_y^{(2n-2)} + \dots + k_1 \dot{e}_y + k_0 e_y = 0 \quad (2.14)$$

cuyo polinomio característico está dado por:

$$p(s) = s^{2n-1} + k_{2n-2} s^{2n-2} + \dots + k_1 s + k_0 \quad (2.15)$$

Por lo tanto, un conjunto adecuado de coeficientes de diseño $k_{2n-2}, k_{2n-1}, \dots, k_1, k_0$ pueden ser elegidos para garantizar que la ubicación de todas las raíces del polinomio de la ecuación (2.15), estén ubicadas estrictamente en la mitad izquierda del semiplano complejo, lo que garantiza la estabilidad asintótica de la trayectoria del error de seguimiento de la salida en lazo cerrado.

Note que la transformada de Laplace de la integral iterada $\left(\int^{(j)} \phi(t) \right)$ está dada por $\phi(s)/s^j$. Para la ecuación:

$$e_y^{(n)} = e_u = - \left[\sum_{i=1}^{n-1} k_{2n-i-1} \left(\int^{(i)} e_u(t) \right) \right] - \sum_{i=1}^n k_{n-i} \left(\int^{(i-1)} e_y(t) \right) \quad (2.16)$$

Después de recurrir al dominio de la frecuencia y la reorganización, se obtiene un controlador que puede describirse mediante una red de compensación clásica dada por la ecuación (2.17), (véase la Figura 2.4):

$$e_u(s) = - \left[\frac{k_{n-1}s^{n-1} + k_{n-2}s^{n-2} + \dots + k_0}{s^{n-1} + k_{2n-2}s^{2n-2} + \dots + k_n} \right] e_y(s) \quad (2.17)$$

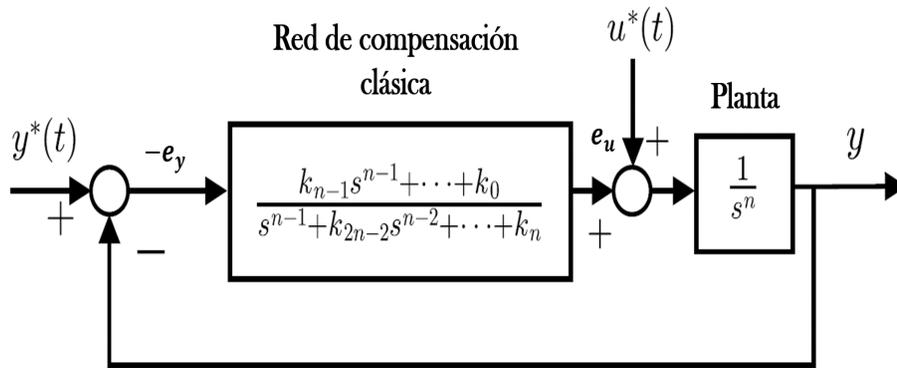


Figura 2.4: Control GPI de una planta de integración de orden n como una red de compensación clásica.

2.4. Control por Rechazo Activo de Perturbaciones

El ingeniero francés, Jean-Victor Poncelet, fue la primer persona en proponer lo que él llamaba el principio de invarianza, el cual se cita a continuación:

“Las perturbaciones deben usarse para generar una señal de activación que tenderá a cancelar el efecto de la misma perturbación”.

Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems: A flatness based approach, [26]

En los 1990s, el control por rechazo a perturbaciones fue desarrollado por el profesor Jinqing Han quien además de aplicaciones académicas, logro un sinnúmero de desarrollos industriales. Solamente existe un manuscrito en el idioma Inglés del profesor Han [20], de publicación reciente, en el IEEE Transaction on Industrial Electronics”.

Dicho método de control fue de enseñanza común en Rusia durante la primera mitad del siglo XX. Uno de los principales exponentes fue el profesor Georghe Vladimirovich Shipanov en Moscú. El método apareció en América desde los años 70, el cual se muestra en los trabajos de C. D. Johnson [37].

En los últimos años, se empieza a tener una formalización adecuada del método gracias a los trabajos de Z. Gao, H. Khalil y otros investigadores (Sira-Ramirez [38]).

De acuerdo con Xisong et al. [39] un Controlador Proporcional de Alta Ganancia, no elimina los efectos causados por la perturbación, y requiere calcular una ganancia adecuada para la perturbación; un Controlador Integral, sólo elimina los efectos originados por perturbaciones constantes. Dichos controladores no son suficientes para controlar un mecanismo sujeto a perturbaciones.

La ingeniería de control, tiene tres paradigmas: paradigma de la industria, paradigma de modelo y paradigma de rechazo a perturbaciones, este último regresa a la esencia de los controladores, con muchas implicaciones, tecnológicas y conceptuales, como podemos ver en el trabajo de Z. Gao [40].

El método de rechazo a perturbaciones radica en la estimación de la parte desconocida de la dinámica del sistema, y con ello cancelar sus efectos mediante la ley de control, como lo presenta Sira-Ramírez en [26,41].

Para poder describir este método usaremos como ejemplo un sistema regido por una ecuación diferencial:

$$\dot{y} = f(\dot{y}, y, w) + u \quad (2.18)$$

donde y es la salida, real, continua en el tiempo, u es la entrada generada por el actuador, es continua en el tiempo y real, y $f(\dot{y}, y, w)$ representa todas las perturbaciones endógenas y exógenas, siendo w una perturbación externa, donde w es real y continua en el tiempo, por lo tanto, si \dot{y} es función de $f(\dot{y}, y, w)$, $f(\dot{y}, y, w)$ es continua en el

tiempo y real.

$$\dot{y} = g(\dot{y}, y) \quad (2.19)$$

Se introduce una función que representa la dinámica deseada dada por (2.19), donde se sabe que $g(\dot{y}, y)$ es continua, el problema de control se convierte ahora en sintetizar una ley de control

$$u = l(\dot{y}, y) \quad (2.20)$$

de tal manera que el proceso en (2.18) se comporte como (2.19).

Aquí es donde termina la similitud de las dos escuelas de pensamiento sobre los controladores, el enfoque matemático y el enfoque experimental. El primero requiere que, en el caso de (2.18), la expresión matemática de $f(\dot{y}, y, w)$ sea obtenida, sobre la cual se pueden aplicar un conjunto de métodos analíticos. Por ejemplo la colocación de polos conocidos y la linealización por retroalimentación, técnicas que cancelan esencialmente la dinámica del proceso y la remplazan con la deseada, es decir;

$$u = -f(\dot{y}, y, w) + g(\dot{y}, y) \quad (2.21)$$

El ADRC es un método de diseño poco habitual, se basa en tratar a $f(\dot{y}, y, w)$ en (2.18) como una variable de estado, que es estimada por un observador.

Los menesteres para un modelo matemático han sido atribuidos, entre la teoría en diversas áreas de control por Sira-Ramírez [41].

El ADRC es eficaz en muchos casos de estudio, donde se utiliza la técnica para resolver una serie de problemas, con resultados prometedores, como se puede leer en W. Dan y C. Ken [42], Hou et al. [43] y Shaohua et al. [44]. También ofrece una construcción de un controlador robusto que requiere poca información de la planta. Basado en el ESO, este control calcula y compensa, los efectos de las perturbaciones desconocidas.

Sea $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$, $x_3 = f(\dot{y}, y, w)$, la forma de espacio aumentado de (2.18) es,

$$\dot{x} = Ax + Bu + Eh, \quad x \in R^3$$

$$y = Cz, \quad y \in R \quad (2.22)$$

$$\text{con } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0 \quad 0], \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Nótese que $x_3 = f(\dot{y}, y, w)$ es el estado aumentado y $h = \dot{f}(\dot{y}, y, w)$ es usualmente desconocida.

Basado en (2.22), se define un observador de estado:

$$\dot{z} = Az + Bu + L(y - \hat{y})$$

$$\hat{y} = Cz \quad (2.23)$$

Este observador se denota como observador ESO. Las ganancias del observador se eligen de tal forma que el polinomio característico $s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3$ sea Hurwitz.

Para simplificar la sintonización, todos los polos del observador se colocan en $-\omega_0$. Esto resulta en el polinomio característico de (2.23) para ser $\lambda_0(s) = s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3 = (s + \omega_0)^3$ donde, ω_0 es el ancho de banda del observador y $L = [3\omega_0 \ 3\omega_0^3 \ 3\omega_0^3]^T$.

Generalmente, cuanto mayor sea el ancho de banda del observador, más precisa será la estimación. Sin embargo, un ancho de banda grande aumentará la sensibilidad al ruido. Por lo tanto, la selección de un ancho de banda adecuado es un compromiso entre el rendimiento de seguimiento y la tolerancia al ruido.

Con una buena sintonización, el observador de estado z_3 seguirá de cerca $x_3 = f(\dot{y}, y, w)$.

La ley de control

$$u = -z_3 + u_0 \quad (2.24)$$

a su vez reducirá la planta (2.18) a una aproximación de ganancia unitaria de doble integrador, es decir,

$$\ddot{y} = (f - z_3) + u_0 \approx u_0 \quad (2.25)$$

Sea

$$u_0 = g(\dot{y}, y) \quad (2.26)$$

Con u_0 definido como el controlador proporcional derivativo común, dado por:

$$u_0 = k_p(r - y) - k_d(\dot{r} - \dot{y}) + \ddot{r} \quad (2.27)$$

donde r es la trayectoria deseada. Note que en (2.27) se emplea un mecanismo de prealimentación con el propósito de reducir el error de seguimiento. En la ecuación (2.27), k_p y k_d son los parámetros de ganancia del controlador seleccionados para que $s^2 + k_d s + k_p$ sea Hurwitz.

El ancho de banda, ω_c , se sintoniza en base a qué tan rápido queremos que la salida siga la referencia. Un ancho de banda grande, incrementa la velocidad de respuesta, pero esto puede conducir a oscilaciones o inestabilidad.

El ancho de banda debe ajustarse al rendimiento y margen de estabilidad. Asimismo, el ancho de banda grande aumenta la tasa de cambio en la señal de control y su magnitud, y por lo tanto, se incrementan los costos de operación.

El observador estará sintonizado de manera similar al controlador: ajustando su ancho de banda, ω_c , a requerimientos de rendimiento y sensibilidad al ruido (Z. Qing [45]).

2.4. CONTROL POR RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

La razón de este modelo de parametrización es práctica: el observador y la ganancia de retroalimentación deben ser fáciles de calcular. La convergencia para el error de estimación del ESO y del error de seguimiento del ADRC se muestra en Zheng et al. [46].

Capítulo 3

Plataforma experimental de un sistema hidráulico como cadena de suministro

La plataforma básica fue diseñada y fabricada por el estudiante Rogelio Guadarrama [47], asimismo, dicha plataforma fue utilizada para realizar el control y sincronización de cadenas de suministro (ver [48]) La plataforma a utilizar es un conjunto de tanques que se ajusta al modelo dinámico de la CS, en el cual la columna de agua en un tanque representa el inventario y el flujo de agua que ingresa a dicho tanque representa la tasa de entrada o producción y el flujo de agua saliente representa la tasa de demanda; en otras palabras, el nivel de inventario en un tanque está dado por el balance entre la producción y la demanda

El objetivo del control será entonces regular el nivel del líquido contenido en cada uno de los tanques pertenecientes a los nodos que forman parte de la CS. La acción de control la constituye: la tasa de demanda en el caso de un nodo no productor, o la tasa de producción en el caso de un nodo productor.

3.1. Funcionamiento

Cada nodo, dentro de la CS está representado por un tanque, en el cual se mide todo el tiempo el nivel de agua. El nodo recibe un flujo de entrada proveniente del nodo ubicado antes que él (tasas de demanda o de producción, según sea el tipo de nodo), y entrega un flujo a un nodo conectado después de él. A fin de obtener dicho flujo, existe una bomba hidráulica que presuriza el agua contenida en cada tanque, que está ubicada por abajo de él. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama con las conexiones que guardan entre sí el tanque, la bomba y la electroválvula dentro de un nodo. La operación de la bomba es continua, y se asume que la presión del agua a la salida de la bomba es constante. La electroválvula, ubicada arriba del tanque, permite la salida del flujo de agua, de acuerdo con la demanda o producción a la que este sometido el nodo.

Para el caso en que el nodo esté sometido a una demanda menor (el flujo de salida a través de la electroválvula sea en algunos instantes nulo, o menor al entregado por la bomba) y con motivo de proteger el funcionamiento de la bomba, el tanque cuenta con una derivación de retorno para dar paso a todo el flujo de agua excedente.

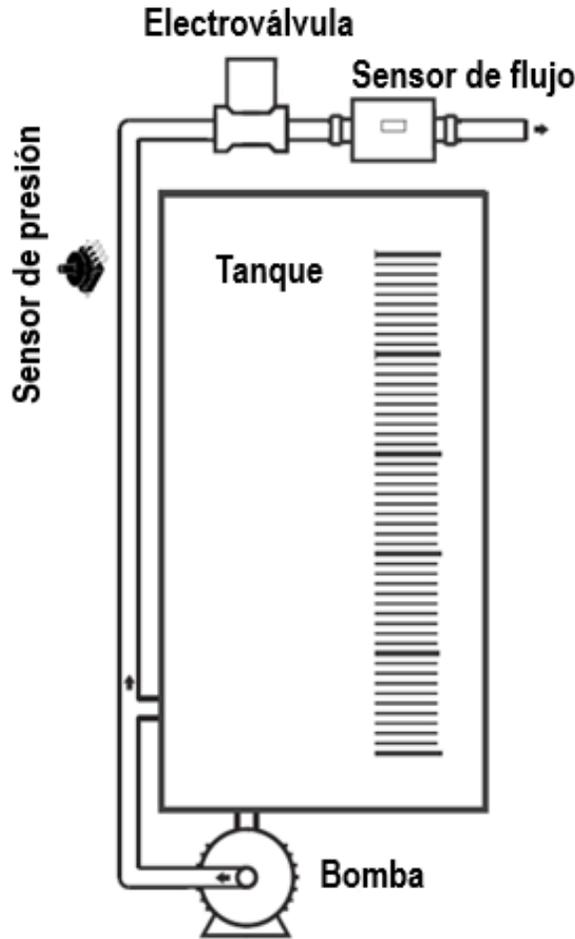


Figura 3.1: Estructura de un nodo.

Pensemos, por ejemplo, en una cadena de suministro sencilla que sea lineal como la mostrada en la Figura 3.2, la cual consta únicamente de dos nodos conectados en serie. Esta representación implicaría 2 nodos, como se muestra en la misma Figura 3.2. Primero, un nodo que funcione como suministro y luego otro nodo.

La primer electroválvula representa el flujo de suministro hacia el primer nodo, mientras que la última electroválvula representa la demanda total a la que está sujeta la cadena. Obviamente, la naturaleza del nodo en cuestión determinará si los flujos presentes en cada electroválvula corresponden con la tasa de demanda de un nodo no

CAPÍTULO 3. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HIDRÁULICO COMO CADENA DE SUMINISTRO

productor o con la tasa de producción de un nodo productor.

En la computadora se calcula la ley de control, a partir de la medición de nivel. Dicha ley genera el voltaje a ser entregado al controlador de la electroválvula, a través de una salida digital/analógica. Esta señal sufre una adecuación previa para cumplir con los rangos del controlador de la electroválvula.

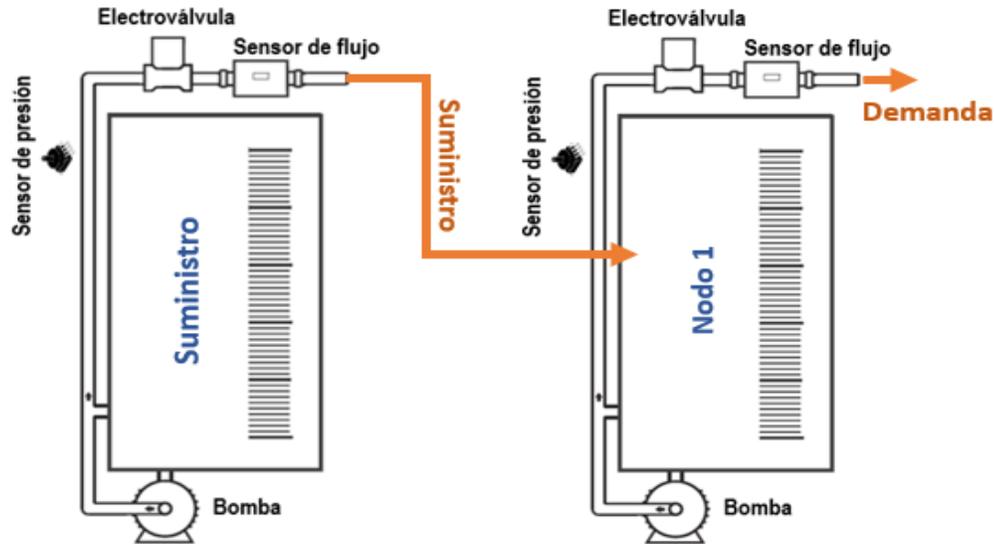


Figura 3.2: Estructura de un nodo.

Para el cálculo y la ejecución del control se utilizó Matlab Simulink[®], así como para modificar los valores de entrada, además nos proporciona una visión gráfica de la operación de la plataforma. Para la lectura de señales exteriores y para la generación de señales se utilizó Real-Time Windows Target[®].

3.2. Estructura del nodo

3.2.1. Tanque

El tanque está hecho de acrílico transparente, el cual tiene un grosor de 1/2" (ver Apéndice A). La transparencia del acrílico nos permite ver el nivel del agua contenida dentro del tanque y compararlo contra una escala graduada en una de las paredes del mismo. La capacidad de cada tanque se describe por el volumen de un prisma rectangular de 20 [cm] x 20 [cm] de base y 75 [cm] de altura, aunque sólo se toma como medida el rango de medición de 50 [cm], correspondiente a la escala graduada presente en cada tanque.

Así, la capacidad máxima aproximada del tanque es de 30 [lts]. La altura restante protege contra las situaciones de sobrellenado del tanque. Para obtener una correcta medición del nivel de líquido contenido en el tanque por el sensor de presión, el tanque está seccionado en dos partes. Una sección es utilizada para los flujos provenientes del retorno de la bomba del módulo y de otro nodo que esté alimentando al nodo en cuestión, y en la otra sección se ubica el extremo de la manguera conectada a la boquilla del sensor de presión. Las dos secciones están comunicadas en la parte inferior del tanque por un par de orificios existentes en la placa que las divide, de tal manera que el nivel en ambas secciones sea similar gracias a que el tanque está abierto en la parte superior. Por lo tanto, la turbulencia generada por la caída de los flujos de una de las secciones del tanque afecta en menor cuantía la medición de nivel realizada por el sensor de presión en la otra sección. El sensor de presión es en esencia un medidor de presión hidrostática, y es por ello que el reposo del agua circundante al extremo del medidor es de gran importancia (ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Tanque de acrílico.

CAPÍTULO 3. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HIDRÁULICO COMO CADENA DE SUMINISTRO

3.2.2. Sensor de flujo

Para medir la transferencia del material se utiliza un sensor de flujo electromagnético. Estos sensores generan una fuerza electromotriz a través de unos electrodos, cuando un líquido conductor circula a través de un campo magnético. Es importante señalar que la diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de mV, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada mediante un dispositivo secundario denominado convertidor, que proporciona una señal de salida en mA, en V o en impulsos. El sensor de flujo seleccionado es el modelo SM7000 (Figura 3.4) de la marca IFM (ver [49]).



Figura 3.4: Sensor de flujo.

Las características principales de este sensor son:

- Aplicación para líquidos conductores.
- Salida analógica de 4 a 20 mA; 0 a 10 V.
- Resolución de 0.1 l/min.
- Retardo a la disponibilidad de 5 s.
- Rango de medición 0.2 a 50 l/min.
- Terminales de 3/4" (G).
- Alimentación 19 a 30 V.

3.2.3. Tubería

Para circular el agua entre el tanque, la bomba y la electroválvula, se cuenta con tubería PVC y galvanizada (ver Figura 3.5).



Figura 3.5: Tubería.

3.2.4. Bomba hidráulica

Es una bomba de agua casera común, marca DUO, modelo PKM60 (ver Figura 3.6). La presión de salida entregada por dicha bomba es constante. Sus características son:

- Altura máxima de salida de columna de agua 35 [m]
- Caudal máximo de salida 40 [lts/min]
- Potencia de trabajo 1/2 [HP]



Figura 3.6: Bomba hidráulica modelo PKM60.

3.2.5. Electroválvula

Una electroválvula proporcional es un dispositivo electromecánico; una válvula capaz de modificar su apertura de forma gradual.

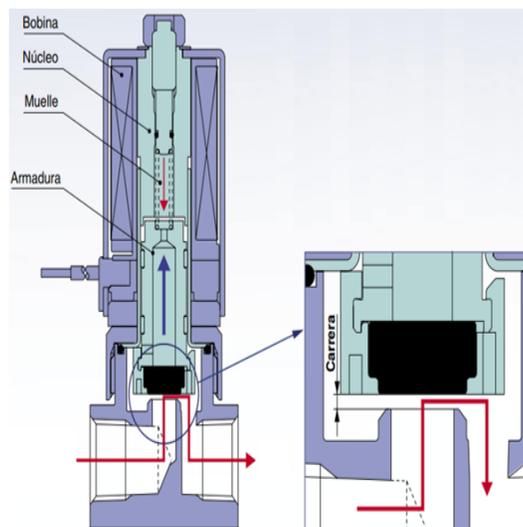


Figura 3.7: Principio de funcionamiento electroválvula.

Cuando se activa la bobina, la armadura es atraída hacia el interior del tubo por la fuerza electromagnética (ver Figura 3.7). Si la corriente varía, la fuerza de atracción variará en proporción a ésta. El caudal se controla a través del movimiento (carrera) de la armadura, dependiendo del equilibrio entre la fuerza de atracción y la carga por muelles.

La electroválvula seleccionada es el modelo 6223 de la marca Burkert (ver [50]). Una de sus características es ser una válvula de control para el control continuo del flujo de

líquidos, actuada por un solenoide. Posee una baja histéresis y alta repetibilidad. Como señal de excitación, la electroválvula recibe una señal PWM de 24 [V] de amplitud y frecuencia aproximada de 200 [Hz]. Otras características importantes de la electroválvula son:

- El cuerpo está hecho de latón
- Las conexiones de la válvula en las terminales son de 3/4 de pulgada (NPT)
- El tamaño del orificio de la válvula es de 13 mm
- La presión máxima de trabajo es de 145 psi
- La potencia consumida es de 10 W

3.2.6. Sensor de presión diferencial

En cada nodo, el nivel de agua se mide en [cm], utilizando un sensor de presión diferencial (Figura 3.8), este sensor entrega un rango de voltaje (+/- 5 [V]) a una entrada analógica/digital de la tarjeta Sensoray 626, que se comunica con el ordenador a través del bus PCI.

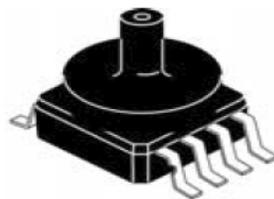


Figura 3.8: Sensor de presión de silicio.

El sensor de presión diferencial MPXV4006 (ver [51]) es el elemento transductor que convierte la presión ejercida por una columna de agua en un voltaje equivalente. Dicho sensor, es un circuito integrado completo que contiene dentro de un mismo encapsulado el transductor y la electrónica de acondicionamiento necesaria para entregar un voltaje directo de salida de un rango aproximado de 5 [Vdc]. Como se muestra en la Figura 3.9, para realizar la medición debe conectarse el extremo de una manguera a la boquilla del encapsulado del sensor, mientras que el otro extremo de la manguera deberá estar sumergido dentro del líquido. Con ello, el aire atrapado dentro de la manguera ejercerá una presión variable sobre el transductor del sensor, conforme el nivel del agua varíe.

CAPÍTULO 3. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HIDRÁULICO COMO CADENA DE SUMINISTRO

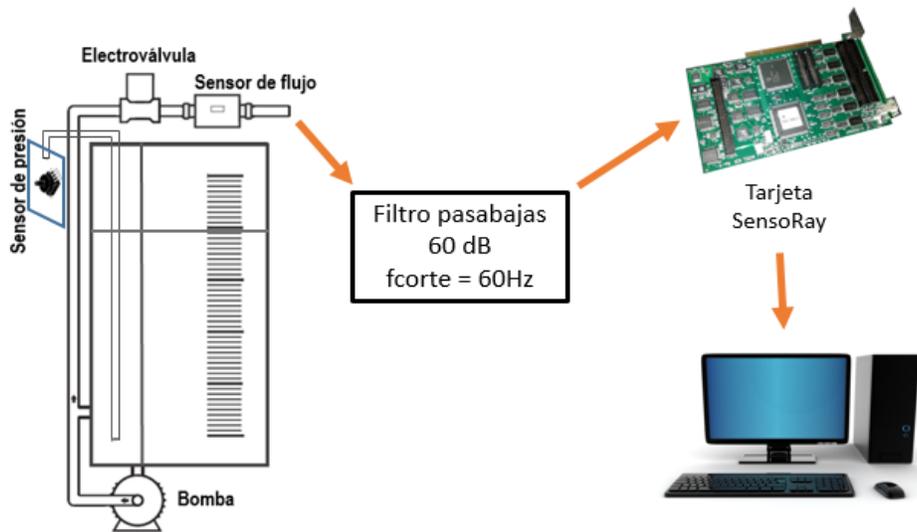


Figura 3.9: Esquema de medición de nivel.

Las principales características del sensor de presión son:

- Galga extensiométrica como elemento transductor
- Rango de medición de 0 a 61.2 [cm $H_2 O$] (0 a 6 [kPa])
- Voltaje y corriente de alimentación de 5 [Vdc] y 10 [mAdc], respectivamente
- Rango de voltaje de salida de 4.6 [V] y offset típico de 0.265 [V]
- Sensibilidad típica de 75.11 [mV/cm $H_2 O$] (766 [mV/kPa])

De acuerdo con el fabricante, para un rango de temperatura de +10[°C] a +60[°C] el sensor presenta una exactitud máxima de ± 5.0 % del rango de voltaje de medición, o hasta de ± 2.5 % en caso de utilizar ajuste de *Auto Zero*. Este ajuste consiste en almacenar la lectura del sensor a presión cero y restar este valor de la salida del sensor bajo condiciones normales de operación. El sensor tiene una respuesta lineal a lo largo de su rango de medición, tal y como lo muestra el fabricante en la Figura 3.10. Dependiendo de si se utiliza o no el ajuste de *Auto Zero*, se aprecia como la exactitud de la medición es mayor. En nuestro caso utilizamos el ajuste *Auto Zero*.

3.2. ESTRUCTURA DEL NODO

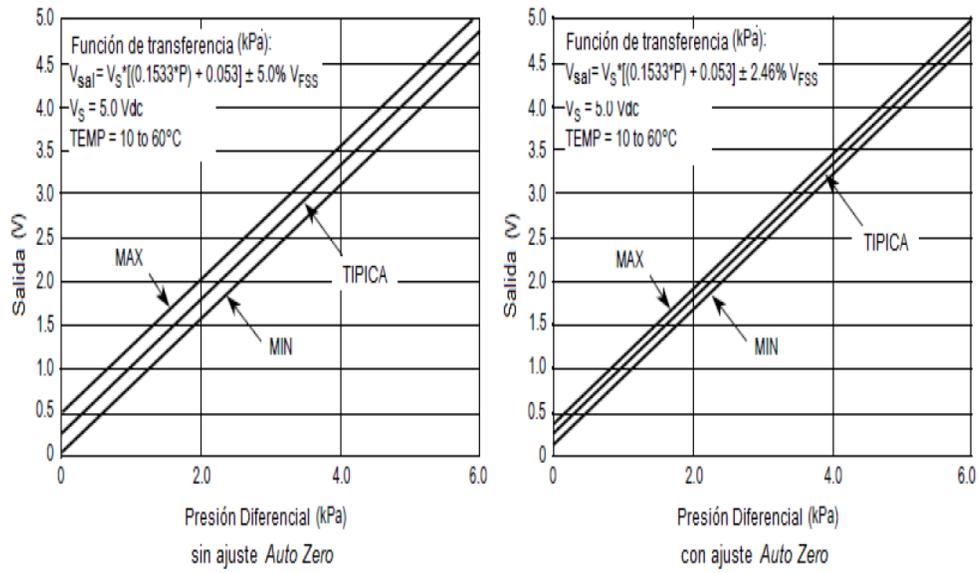


Figura 3.10: Linealidad del sensor de presión.

3.2.7. Circuito de control para la electroválvula

Para el accionamiento adecuado de la electroválvula, se requiere de una interfaz entre el canal de salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos y la electroválvula. La computadora genera, a través de la tarjeta de adquisición de datos, un voltaje directo entre 0 y 10 [Vdc]. La electroválvula requiere, una señal PWM de 24 [V] y 200 [Hz], según especificaciones del fabricante. Para resolver esta situación se usó un controlador (driver) ya disponible en el mercado: el PVD3D2R de PWM Controls (el circuito se muestra en la Figura 3.11).

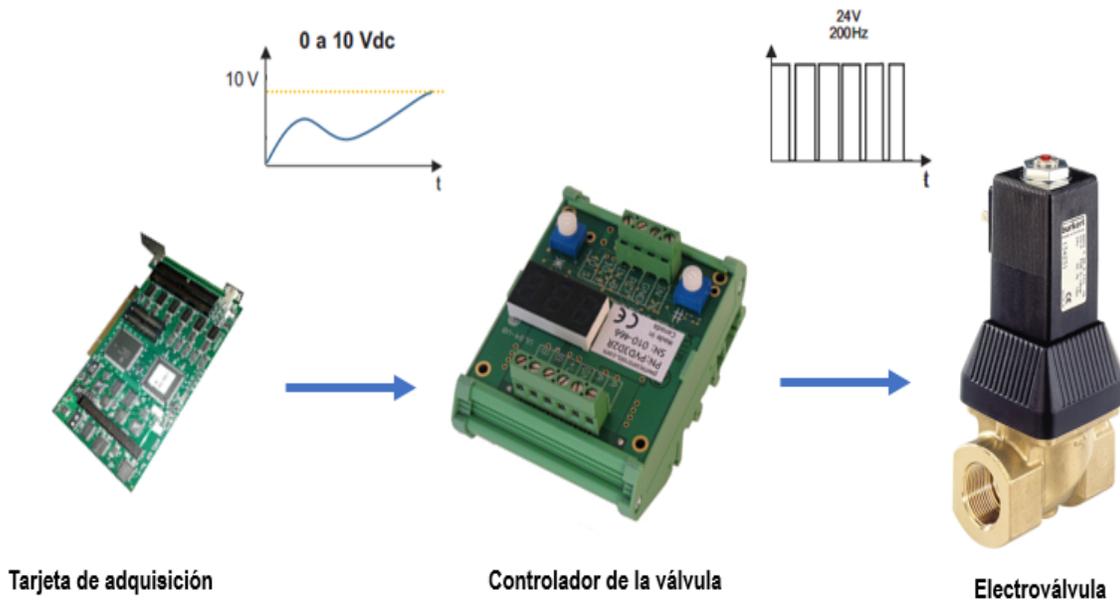


Figura 3.11: Circuito de control de la electroválvula.

El dispositivo consta de un microcontrolador completamente programable, y algunos circuitos adicionales externos de acondicionamiento. La programación del microcontrolador permite definir varios aspectos de la operación del circuito, por ejemplo, el tipo y rango de la señal de entrada, lo que nos permite seleccionar un voltaje de entrada de 0 a 10 [Vdc]. También podemos elegir la frecuencia de la señal PWM de salida, dentro de un rango de 50 a 500 [Hz]. El voltaje de alimentación, seleccionable entre 9 y 35 [Vdc], define la amplitud de la señal PWM. El PVD3D2R posee dos canales de salida que permiten su operación sobre una electroválvula de doble solenoide, o sobre dos válvulas independientes de solenoide simple. La señal PWM recibida se traduce en una corriente de control necesaria para permitir cierta apertura de la misma. La Figura 3.12 muestra el diagrama de corriente alimentada a la electroválvula contra el valor de la señal de entrada en el circuito controlador; se observa que la relación es lineal.

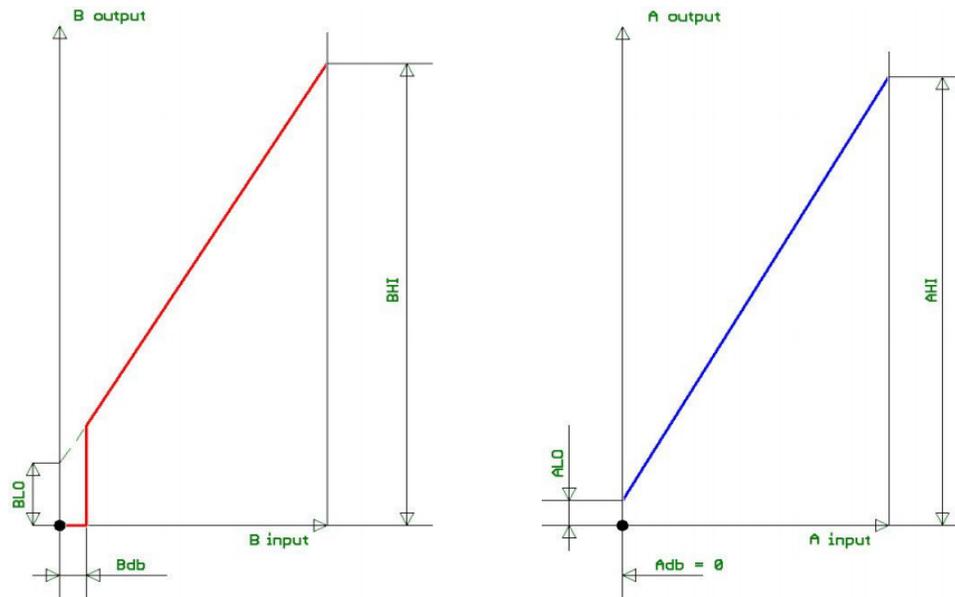


Figura 3.12: Circuito de control de la electroválvula.

Las características de la operación del circuito pueden ser modificadas por programación del microcontrolador, como son los valores de corriente mínima (ALO, BLO), corriente máxima (AHI, BHI) y banda muerta (Adb, Bdb). Con dichos valores, es posible especificar en la operación el rango de la corriente entregada a la electroválvula y del respectivo rango de flujo permitido por la electroválvula. Es importante señalar que el controlador cuenta con la capacidad de regular la corriente entregada, para que a pesar de cambios en la resistencia del solenoide de la electroválvula o de la alimentación entregada por la fuente de voltaje, se entregue siempre la misma corriente.

Es importante recordar que a pesar de la característica lineal del controlador de la electroválvula, la naturaleza de la operación de la electroválvula es no lineal.

3.2.8. Tarjeta de adquisición de datos Sensoray 626

Con esta tarjeta, la cual se comunica con la computadora personal a través del bus PCI, se pueden realizar distintas tareas de adquisición de datos y generación de señales. Además cuenta con algunos puertos de entrada para encoder y contadores, así como un perro guardián (watchdog), todos ellos programables por software, ver Figura 3.13.



Figura 3.13: Tarjeta de adquisición de datos .

Las principales características de la tarjeta son:

- La tarjeta cuenta con 16 canales diferenciales de entrada que son multiplexados a un solo convertidor de 16 bits analógico/digital
- La frecuencia máxima de muestreo es de 15 [kHz]
- El rango de voltaje de entrada es programable por software y seleccionable entre $+/- 5[V]$ y $+/- 10[V]$
- Cuenta con cuatro canales de salida digital/analógica de 14 bits, capaces de entregar una señal dentro de un rango de -10 a 10 [V], a una velocidad de 20 [kHz]

En este caso, la medición de nivel del líquido contenido dentro del tanque se realiza por uno de los canales de entrada analógico/digital. La tarjeta nos permitiría la adquisición de hasta 16 mediciones de nivel. Luego, por uno de los canales de salida digital/analógico se genera el voltaje de control necesario para actuar sobre la electrónica de control de la electroválvula, al generar una señal analógica de entre 0 y 10 [Vdc].

Capítulo 4

ADRC con Predictor de Smith

Considere la dinámica tradicional de inventario de tiempo continuo sin retardo en las órdenes de producción,

$$\frac{d}{dt}I(t) = P(t) - S(t) \quad (4.1)$$

donde la tasa de demanda $S(t)$, se supone que es incierta pero se sabe que es continua absolutamente uniformemente acotada por una cierta constante estrictamente positiva k_0 , es decir, $\sup_t |S(t)| \leq k_0$. Se supone que la tasa de producción $P(t)$, está uniformemente delimitada por el intervalo $P(t) \in (P_{max} > P_{min}, P_{min} > 0)$. Se supone que el nivel de inventario, $I(t)$, se conoce con exactitud en cada instante de tiempo t . La tasa de demanda, $S(t)$, no es necesariamente diferenciable. La suposición de continuidad implica que $\dot{S} = \frac{dS}{dt}$ está absolutamente uniformemente acotado por, digamos, un parámetro constante suficientemente grande $k_1 > 0$.

4.1. Seguimiento de inventario bajo efectos de retardo en las órdenes de producción

Ampliamos el método popular del Predictor de Smith para el control de sistemas con retardo fijo y conocido, al problema de seguimiento de trayectoria de nivel de inventario en presencia de tasas de demanda desconocidas. Considere un nodo no productor, cuya dinámica del inventario está dada por,

$$\frac{d}{dt}I(t) = P(t - T) - S(t) \quad (4.2)$$

Donde T es el retardo en el embarque, el cual es conocido y fijo. Con el fin de llevar a cabo un pronóstico de la tasa de demanda eficiente, a través del uso combinado de una extensión adecuada de ESO y una serie truncada de Taylor (también llamada polinomio

de Taylor), estaremos estimando m derivadas en el tiempo de la función de la tasa de demanda, donde $m > 1$. Por lo tanto, asumimos que la tasa de Demanda, $S(t)$, exhibe m derivadas continuas en el tiempo.

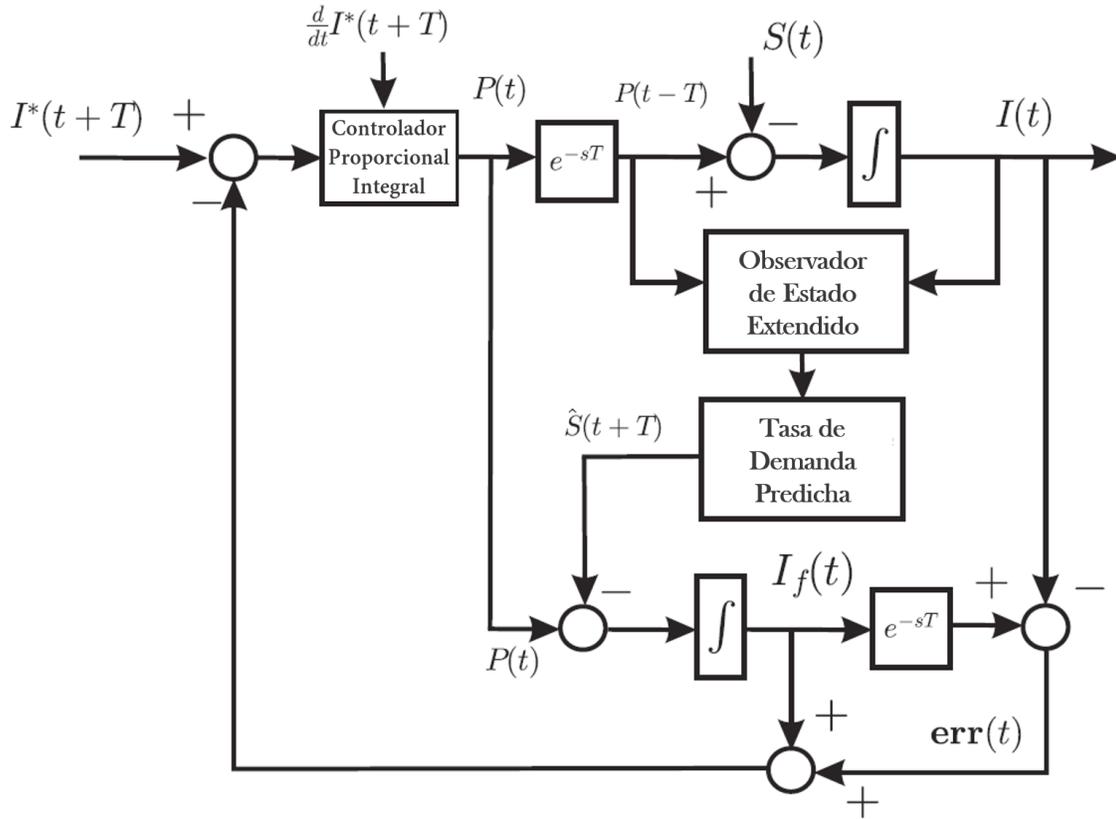


Figura 4.1: Esquema de predictor de Smith para un control de nivel de inventario en un sistema de producción/inventario con un retardo conocido.

El esquema de Predictor de Smith (ver Figura 4.1) introduce un sistema auxiliar de avance, que tratamos como la dinámica de predicción o adelanto, que se caracteriza por el estado predicho del inventario, $I_f(t)$. Este sistema se construye como el siguiente sistema no causal:

$$\frac{d}{dt}I_f(t) = P(t) - S(t+T) = P(t) - S_f(t) \quad (4.3)$$

4.1. SEGUIMIENTO DE INVENTARIO BAJO EFECTOS DE RETARDO EN LAS ÓRDENES DE PRODUCCIÓN

Por lo tanto, es necesaria una predicción de la tasa de demanda, $S(t + T)$, para sintetizar una regla de la decisión de producción virtual $P(t)$ para la dinámica del inventario predicho. Proponemos el siguiente observador de la tasa de inventario ampliado, también conocido como Observador GPI (ver [52]):

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \hat{I}(t) &= P(t - T) + z_1 + \lambda_m (I(t) - \hat{I}(t)) \\
 \frac{d}{dt} z_1 &= z_2 + \lambda_{m-1} (I(t) - \hat{I}(t)) \\
 \frac{d}{dt} z_2 &= z_3 + \lambda_{m-2} (I(t) - \hat{I}(t)) \\
 &\vdots \\
 \frac{d}{dt} z_m &= \lambda_0 (I(t) - \hat{I}(t))
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

La razón de la introducción de un número no especificado, m , de integradores en el ESO, surge del hecho que, para los coeficientes de diseño del observador correctamente elegidos $\lambda_m, \dots, \lambda_0$, mientras z_1 estima la tasa de demanda desconocida $-S(t)$, las variables, z_j , $j = 2, 3, \dots$, estiman la $(j - 1)$ -derivada en el tiempo de $-S(t)$, es decir; $z_j(t)$ converge a una trayectoria que en última instancia está arbitrariamente cerca de $-S^{j-1}(t)$, $j = 1, 2, 3, \dots$. En general, nuestro algoritmo de estimación de la tasa de demanda se basa en un modelo dinámico lineal, no homogéneo, de orden $m + 1$, del error de estimación. Este modelo depende de la m -ésima derivada de la demanda, la cual es desconocida pero se supone acotada. El error de estimación del nivel de inventario, $\tilde{e} = I(t) - \hat{I}(t)$, evoluciona obedeciendo la siguiente ecuación diferencial ordinaria perturbada:

$$\tilde{e}^{(m+1)} + \lambda_m \tilde{e}^{(m)} + \dots + \lambda_1 \dot{\tilde{e}} + \lambda_0 \tilde{e} = -S^{(m)}(t) \tag{4.5}$$

Si los coeficientes de diseño, $\{\lambda_m, \dots, \lambda_0\}$, para el ESO se eligen de manera que el sistema lineal no perturbado

$$\tilde{e}^{(m+1)} + \lambda_m \tilde{e}^{(m)} + \dots + \lambda_1 \dot{\tilde{e}} + \lambda_0 \tilde{e} = 0 \tag{4.6}$$

Tal que las raíces de su polinomio característico que están situadas muy lejos del plano complejo, entonces para una tasa de demanda uniformemente absolutamente acotada, la derivada en el tiempo de orden m , $S^{(m)}(t)$, en las cuales las variables, $\hat{I}(t)$, z_1, \dots, z_r generadas por el ESO, convergen, respectivamente, a funciones en el tiempo que, en última instancia, están arbitrariamente cerca de $I(t)$, $-S(t)$, \dots , $-S^{r-1}(t)$. La tasa de demada predicha, $S(t + T)$ puede atenderse, en el tiempo t , con el conocimiento aproximado en línea de las señales estimadas, $S(t)$, $\dot{S}(t)$, \dots , $S^{(r-1)}(t)$, a partir

de un ESO. Proponemos utilizar la siguiente fórmula de predicción de la tasa de demanda:

$$\begin{aligned}\hat{S}(t+T) &= \hat{S}_f(t) = -z_1(t) - \frac{1}{1!}z_2(t)T - \frac{1}{2!}z_3(t)T^2 - \dots \\ &= S(t) + \frac{1}{1!}\dot{S}(t)T + \dots + \frac{1}{(r-1)!}S^{(r-1)}(t)T^{r-1}\end{aligned}\quad (4.7)$$

Sea $e_f = I(t) - I_f(t - T)$ el "error de salida del nivel de inventario del sistema retardado", correspondiente al sistema de avance (4.3), el problema de seguimiento de la trayectoria de referencia de salida debe definirse en la trayectoria de referencia del nivel de inventario avanzado, $I^*(t + T)$, de manera que el sistema de producción/inventario realice correctamente la trayectoria de referencia $I^*(t)$. Bajo condiciones idealizadas, el siguiente controlador de seguimiento de trayectoria proporcional integral para el sistema de avance tendría el nivel de inventario hacia delante rastreando la trayectoria del nivel de inventario deseado,

$$\begin{aligned}P(t) &= \dot{I}^*(t + T) - \hat{S}(t + T) - k_1[I_f(t) - I^*(t + T)] \\ &\quad - k_0 \int_T^{t-T} [I_f(\sigma) - I^*(\sigma + T)]d\sigma\end{aligned}\quad (4.8)$$

donde:

$$k_1 = 2\xi\omega_n, \quad k_0 = \omega_n^2, \quad \text{con } \xi > 0 \text{ y } \omega > 0$$

con los siguientes valores propuestos:

$$\xi = 1 \text{ y } \omega_n = 0.3$$

Además, la entrada de control de la tasa de producción sintetizada, $P(t)$, debe ser compartida por el sistema de avance y el sistema retardado. Sin embargo, la regla de decisión de producción anterior (4.8) no retroalimenta el nivel de inventario real, $I(t)$, y supone que la tasa de demanda pronosticada es exactamente válida.

El esquema del predictor de Smith procede formalmente a incorporar la salida real del nivel de inventario del sistema, $I(t)$, al sistema de control de retroalimentación, comparando primero la señal de inventario retardada "prevista", $I_f(tT)$ con el inventario real $I(t)$, en los términos de retroalimentación proporcional e integral del controlador.

La regla final de decisión de la tasa de producción basada en el predictor de Smith, que se comparte con la planta, está dada por:

$$\begin{aligned}P(t) &= \dot{I}^*(t + T) - \hat{S}(t + T) - k_1[I_f(t) - I^*(t + T) + \mathbf{err}(t)] \\ &\quad - k_0 \int_T^{t-T} [I_f(\sigma) - I^*(\sigma + T) + \mathbf{err}(\sigma)]d\sigma\end{aligned}\quad (4.9)$$

Donde $\mathbf{err}(t)$ es el error entre el inventario pronosticado $I_f(t - T)$ con el nivel de inventario real $I(t)$, es decir; $\mathbf{err}(t) = I_f(t - T) - I(t)$

4.2. Prueba de convergencia

La dinámica del error de estimación del nivel de inventario, obtenida restando las ecuaciones (4.1) y (4.3), está dada por la siguiente dinámica lineal de segundo orden:

$$\ddot{\tilde{e}}(t) + \left(\frac{2\bar{\zeta}_o \omega_{no}}{\varepsilon} \right) \dot{\tilde{e}}(t) + \left(\frac{\omega_{no}^2}{\varepsilon^2} \right) \tilde{e}(t) = -\dot{S}(t) \quad (4.10)$$

Multiplicando (4.10) por ε^2 ,

$$\varepsilon^2 \ddot{\tilde{e}}(t) + \varepsilon (2\bar{\zeta}_o \omega_{no}) \dot{\tilde{e}}(t) + \omega_{no}^2 \tilde{e}(t) = -\varepsilon^2 \dot{S}(t) \quad (4.11)$$

Y estableciendo $\varepsilon = 0$, se obtiene una caracterización de la variedad lenta en el espacio de fase del error de estimación. La variedad lenta coincide con la línea $\dot{e} = e = 0$ en el espacio de fase del error de estimación que representa la variedad de equilibrio de las variables de fase de estimación del nivel de inventario $\bar{e} = \dot{\bar{e}} = 0$. La dinámica del error de estimación rápida se obtiene mediante un procedimiento de reescalado temporal en el que la coordenada de tiempo rápido, τ , se define simplemente como $\tau = t/\varepsilon$. Se tiene que:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} \tilde{e}(\tau) + 2\bar{\zeta}_o \omega_{no} \frac{d}{d\tau} \tilde{e}(\tau) + \omega_{no}^2 \tilde{e}(\tau) = -\varepsilon^2 \dot{S}(\tau) \quad (4.12)$$

Obsérvese que para $\varepsilon = 0$ la dinámica rápida de error de estimación singularmente perturbada, caracterizada por la variable e_f , está idealmente representada por:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} e_f(\tau) + (2\bar{\zeta}_o \omega_{no}) \frac{d}{d\tau} e_f(\tau) + \omega_{no}^2 e_f(\tau) = 0 \quad (4.13)$$

que es asintóticamente exponencialmente estable al origen del espacio de fase del error de estimación \mathcal{E} .

El estado estacionario de la dinámica rápida perturbada se obtiene formalmente estableciendo los operadores diferenciales $d/d\tau$ y $d^2/d\tau^2$ a cero. En otras palabras,

$$e(\tau) = - \left(\frac{\varepsilon}{\omega_{no}} \right)^2 \dot{S}(\tau) \quad (4.14)$$

Una estimación de la región de convergencia final del error real de estimación de inventario e viene dada por:

$$|e(\tau)| \leq \left(\frac{\varepsilon}{\omega_{no}} \right)^2 K_1 \quad (4.15)$$

Esta última igualdad establece la relación del límite δ en $|e(t)|$ con el parámetro de diseño de alta ganancia ε .

Los desarrollos anteriores implican que se cumplen todas las condiciones para la aplicación del teorema de Tikhonov (véase [53]) y, por lo tanto, la evolución real del error de estimación de las variables de fase ($e(t), \dot{e}(t)$), asintóticamente, en última instancia, evolucionan cerca de las trayectorias lentas, estacionarias, obtenidas a través del método de perturbación singular anterior.

4.3. Caso de estudio

4.3.1. Trayectoria de la tasa de demanda

La trayectoria de la tasa de demanda a considerar refleja la incertidumbre total y el comportamiento altamente fluctuante de la tasa de pedidos de productos a medida que el tiempo evoluciona. Con el fin de imponer un comportamiento bastante impredecible de la demanda, se utiliza una trayectoria obtenida a partir de un estado de un sistema caótico bien conocido, a escala de tiempo y amplitud, polarizado. A esta señal aparentemente aleatoria, se le añaden algunos factores temporales variables en el tiempo de "picos" exagerados de la tasa de demanda y "caídas" de la tasa de demanda.

La tasa de demanda, completamente desconocida para la regla de decisión de la tasa de producción, se sintetizó como la combinación de una señal caótica (generada por uno de los estados, adecuadamente polarizados y amplificados en escala, de un sistema Lorenz escalado en el tiempo) superpuesta a dos tiempos variantes, que son factores que inducen a una caída suficientemente grande f_d y un pico grande f_p en la tasa de demanda.

Se establece:

$$S(t) = 0.11(x(t) + 9)f_p(t)f_d(t) \quad (4.16)$$

con

$$f_p(x) = \begin{cases} 1 & t \in [10, 150] [s] \\ 1 - 0.75 \left[\text{sen}^8 \left(\frac{0.1\pi(t-10)}{15} \right) \right] & t \notin [10, 150] [s] \end{cases}$$

$$f_d(x) = \begin{cases} 1 & t \in [220, 350] [s] \\ 1 + 0.75 \left[\text{sen}^8 \left(\frac{0.2\pi(t-60)}{15} \right) \right] & t \notin [220, 350] [s] \end{cases}$$

Donde $x(t)$ es el primer estado del siguiente sistema escalado de Lorenz,

$$\dot{x} = \gamma(t) \sigma (y - x) \quad (4.17)$$

$$\dot{y} = \gamma(t) (x (\rho - z)) \quad (4.18)$$

$$\dot{z} = \gamma(t) (xy - \beta z) \quad (4.19)$$

El factor de escala de coordenadas de tiempo no constante, $\gamma(t)$, se estableció para ralentizar las oscilaciones del sistema de Lorenz antes de $t = 400[s]$ y acelerarlas después de $t = 400[s]$; así,

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0.075 & t < 400 [s] \\ 0.15 & t \geq 400 [s] \end{cases} \quad (4.20)$$

Los parámetros σ , ρ y β fueron elegidos respectivamente para que el sistema de Lorenz mostrara un comportamiento caótico: $\sigma = 10$, $\rho = 28$, $\beta = 8/3$.

4.3.2. Perfil de inventario deseado

Si la tasa de producción coincide perfectamente con la tasa de demanda, entonces el nivel de inventario permanece constante. Los "picos" de demanda que superan la capacidad máxima de producción se asisten a expensas de decrementos del nivel de inventario con respecto al inventario deseado. Por el contrario, caídas de la tasa de demanda severa, por debajo de la tasa de producción mínima, hacen que la tasa de producción real caiga a un mínimo, aumentando así el nivel de inventario con respecto al inventario deseado. En una situación estable, el administrador de la CS puede decidir bajar o aumentar a un nuevo nivel de seguridad el inventario de manera controlada. El inventario deseado está dado por:

- Caso descendente

$$I^*(t) = \begin{cases} 35 \text{ cm} & t \in [0, 100] [s] \\ f_{int}(t) \text{ cm} & t \in [100, 280] [s] \\ 28 \text{ cm} & t \in [280, \infty) [s] \end{cases} \quad (4.21)$$

- Caso ascendente

$$I^*(t) = \begin{cases} 28 \text{ cm} & t \in [0, 100] [s] \\ f_{int}(t) \text{ cm} & t \in [100, 280] [s] \\ 35 \text{ cm} & t \in [280, \infty) [s] \end{cases} \quad (4.22)$$

con,

$$f_{int}(t) = f_s + \frac{(f_e - f_s) |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \left[r_1 - \frac{r_2 |t - t_1|}{(t_2 - t_1)} + \dots - \frac{r_6 |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \right]$$

donde,

$$\begin{aligned} f_s &= 35 \text{ cm}, f_e = 28 \text{ cm} \\ t_1 &= 100 - T, t_2 = 280 - T, T = 1.2 \text{ seg} \\ r_1 &= 252, r_2 = 1050, r_3 = 1800 \\ r_4 &= 1575, r_5 = 700, r_6 = 126 \end{aligned}$$

4.3.3. Simulación y resultados experimentales

Por razones de comparación, se realizaron experimentos y simulaciones en un sistema de producción/inventario con una trayectoria caótica de la tasa de demanda, $S(t)$, dada por (4.16). El pronóstico de la tasa de demanda, $\hat{S}(t + T)$, se logró a través del ESO incluyendo 5 integradores adicionales, es decir, $m = 5$, mientras que el número de términos en el polinomio de Taylor se estableció en $r = 3$ (es decir, dos derivadas de tiempo de la tasa de demanda, $S(t)$, se estimaron). La disponibilidad de capacidad de producción correspondiente inducida temporalmente por la disminución del nivel de inventario ayuda a suministrar la tasa de demanda y, por lo tanto, se observa que la tasa de producción sigue la tasa de demanda durante el período de prueba a un nivel de magnitud menor.

Para la parte experimental, el retardo de embarque T se estableció en $0.6[s]$, el parámetro k_1 se modificó a un valor de $k_1 = 8$ para obtener un resultado eficiente en la trayectoria deseada; dado que la plataforma tiene un retardo (tiempo de respuesta física).

Caso descendente

Para este caso se propone un perfil de inventario deseado utilizando la ecuación (4.21) el cual se muestra en la Figura 4.2:

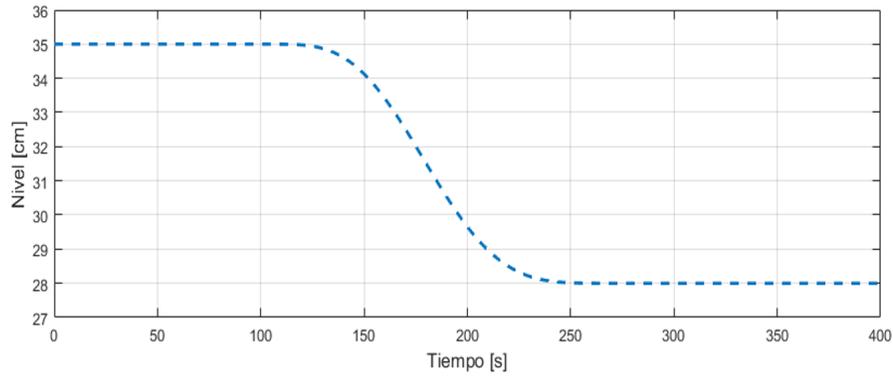


Figura 4.2: Inventario deseado para el caso descendente

La figura 4.3 muestra el seguimiento de la trayectoria en simulación y las señales de producción y demanda.

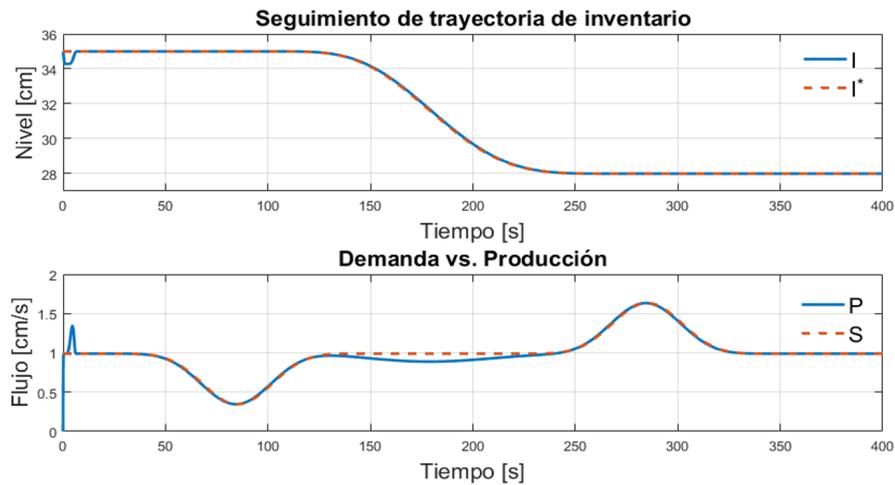


Figura 4.3: Resultados de simulación

La figura 4.4 muestra el seguimiento de la trayectoria experimental y las señales de producción y demanda.

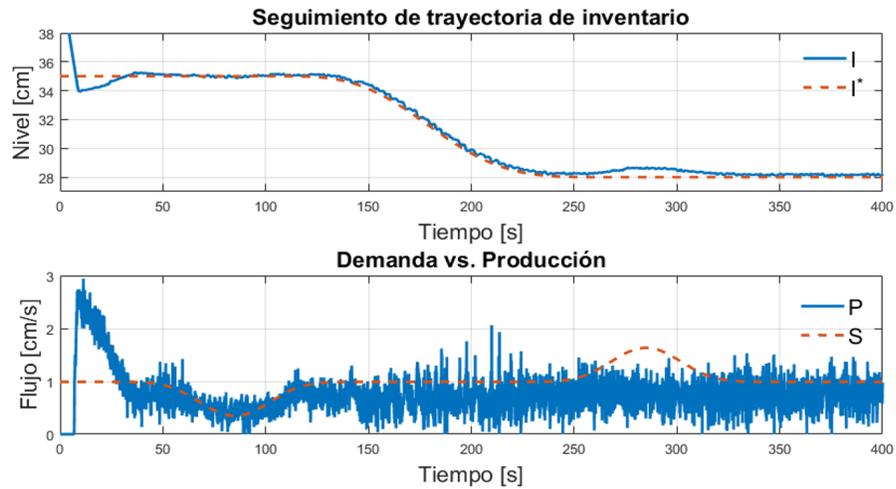


Figura 4.4: Resultados experimentales

La Figura 4.5 muestra el error de seguimiento del inventario obtenido en la simulación y en los experimentos.

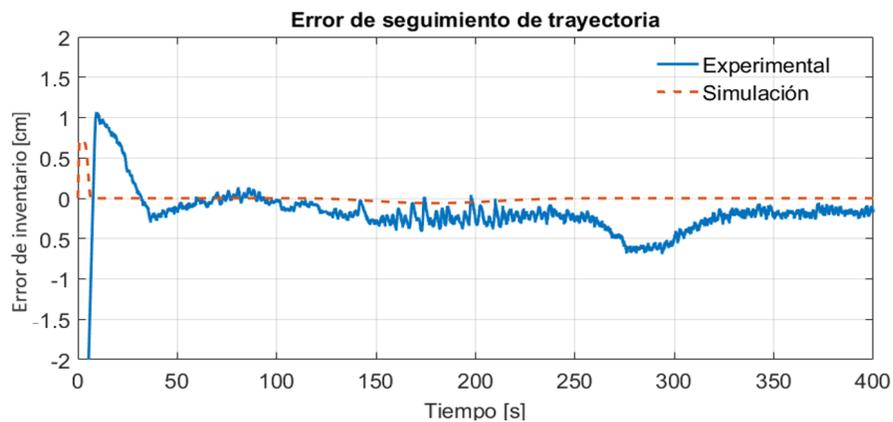


Figura 4.5: Resultados experimentales

Caso ascendente

Para este caso se propone un perfil de inventario deseado utilizando la ecuación (4.22) el cual se muestra en la Figura 4.6:

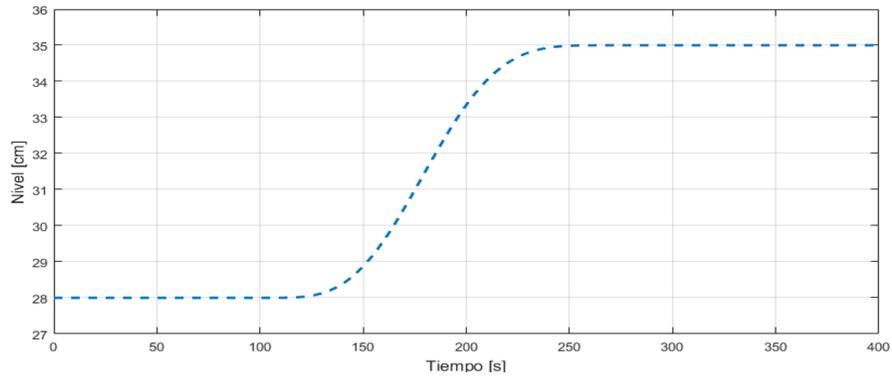


Figura 4.6: Inventario deseado para el caso descendente

La figura 4.7 muestra el seguimiento de la trayectoria en simulación y las señales de producción y demanda.

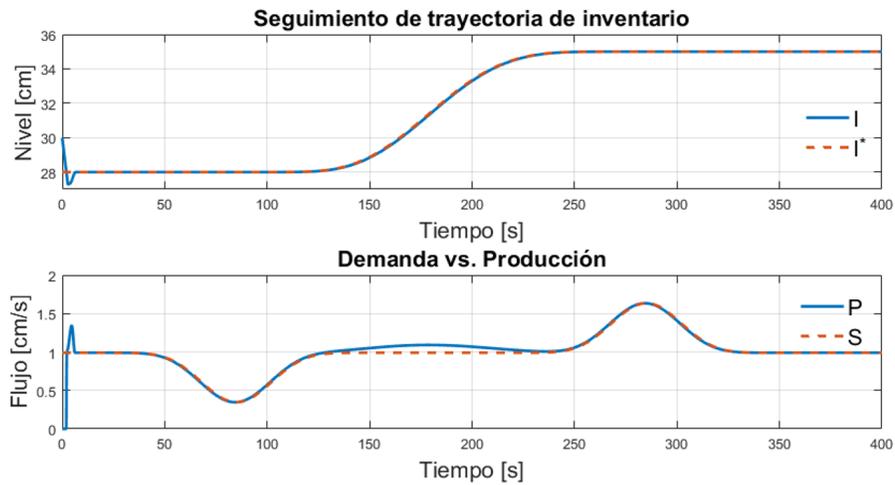


Figura 4.7: Resultados de simulación

CAPÍTULO 4. ADRC CON PREDICTOR DE SMITH

La figura 4.8 muestra el seguimiento de la trayectoria experimental y las señales de producción y demanda. Se puede observar la histéresis producida por la electroválvula, es decir; dependiendo del grado de repetitividad de la electroválvula, también influye si se llega al mismo valor desde un valor superior o uno inferior. Se denomina histéresis al error que se introduce a igual señal de entrada, cuando se llega desde el valor mínimo o cuando se llega desde el valor máximo.

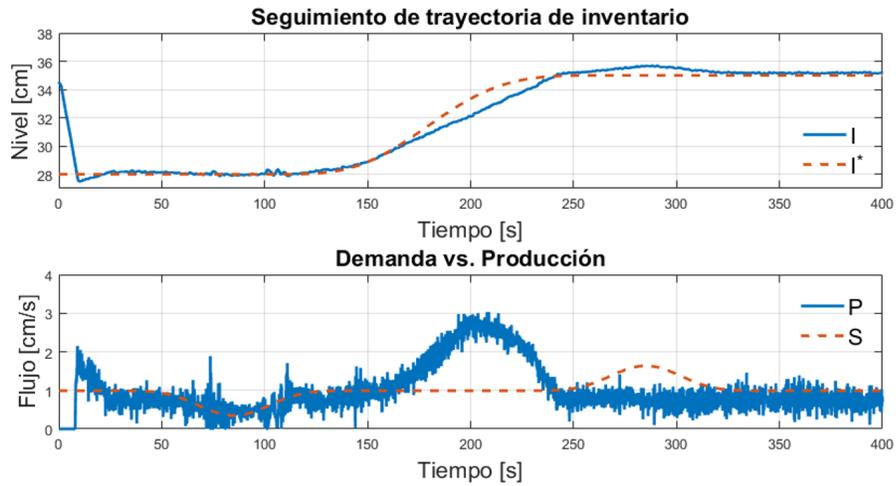


Figura 4.8: Resultados experimentales

La Figura 4.9 muestra el error de seguimiento del inventario obtenido en la simulación y en los experimentos.

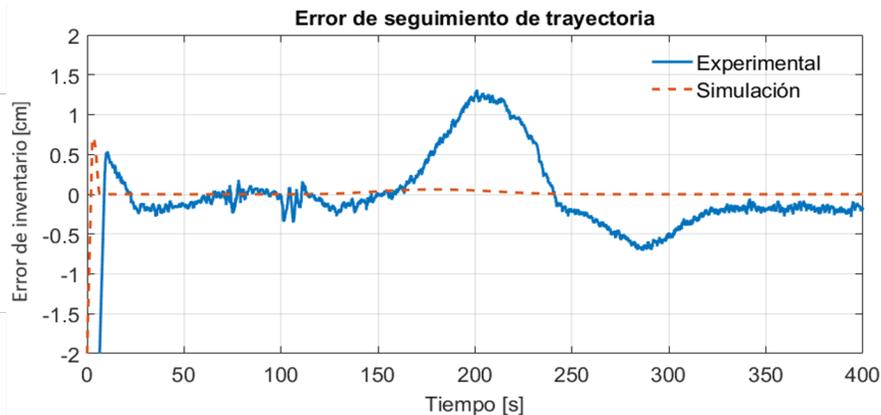


Figura 4.9: Error de seguimiento del inventario

4.3.4. Conclusiones

En este capítulo, se propone una regla de decisión de la tasa de producción lineal basada en un observador para el control de seguimiento de la trayectoria de retroalimentación de un perfil de trayectoria de nivel de inventario deseado. La tasa de demanda incierta es vista como una entrada de perturbación que afecta la dinámica del inventario. Dicha perturbación debe ser, en línea, estimada y generada por medio del ESO. El enfoque propuesto se basa en gran medida en los principios de ADRC que se han desarrollado ampliamente en un paradigma para el control de una gran clase de sistemas de ingeniería inestables, plagados de no linealidades no modeladas y dinámicas no modeladas. Los efectos de un retardo conocido en el programa de tasas de producción se compensaron mediante una estrategia adecuada de satisfacción de la tasa de demanda basada en un pronóstico preciso de la tasa de demanda. El pronóstico se basa en un ESO de dimensión más alta que es capaz de estimar en línea un número razonable de derivadas en el tiempo de la tasa de demanda. Estas derivadas se utilizan en una serie truncada de la expansión de Taylor de la tasa de demanda pronosticada. Esta última característica enseña fácilmente el uso de una variación del popular esquema de control del predictor de Smith.

Capítulo 5

ADRC con control PI^2D para nodo no productor

5.1. Formulación de problema

Dado un perfil de nivel de inventario deseado suficientemente suave, en función del tiempo: $I^*(t)$ sobre un horizonte de planificación infinito, encuentre una regla de decisión de tasa de producción $P(t) = P(I(t), I^*(t))$, basado únicamente en las mediciones del nivel de inventario en el tiempo t y en una trayectoria de nivel de inventario deseado, $I^*(t)$, tal que el nivel de inventario actual, $I(t)$ rastree con precisión la trayectoria deseada, $I^*(t)$, independientemente de las variaciones en el tiempo de la tasa de demanda, $S(t)$, la cual respeta los límites de la tasa de producción fija a priori. Además, bajo saturaciones temporales de la tasa de producción debido a picos excesivos de demanda o a caídas en la demanda (es decir, $P(t) \notin (P_{max} > P_{min}, P_{min} > 0)$ durante un intervalo abierto de la línea real), la regla de decisión, $P(t)$, es automáticamente restaurada al nivel de inventario prescrito.

5.2. Diseño del controlador

Se propone el siguiente ESO, también conocido como observador GPI (ver [8]):

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\hat{I}(t) &= P(t) - z_1 + \lambda_1 (I(t) - \hat{I}(t)) \\ \frac{d}{dt}z_1 &= -\lambda_0 (I(t) - \hat{I}(t))\end{aligned}\tag{5.1}$$

Donde z_1 representa la estimación de la demanda. El error de estimación del nivel de inventario, $\tilde{e} = I(t) - \hat{I}(t)$, evoluciona obedeciendo la siguiente ecuación diferencial ordinaria perturbada:

$$\lambda_1 \dot{\tilde{e}} + \lambda_0 \tilde{e} = -S(t) \quad (5.2)$$

Si los coeficientes de diseño, $\{\lambda_1, \lambda_0\}$, para el ESO se eligen de manera que el sistema lineal no perturbado.

$$\lambda_1 \dot{\tilde{e}} + \lambda_0 \tilde{e} = 0 \quad (5.3)$$

Tal que las raíces de su polinomio característico situadas muy lejos del plano complejo, entonces para una tasa de demanda uniformemente absolutamente acotada, la derivada en el tiempo de orden m , $S^{(m)}(t)$, en las cuales las variables, $\hat{I}(t)$, z_1, \dots, z_r generadas por el ESO, convergen, respectivamente, a funciones en el tiempo que, en última instancia, están arbitrariamente cerca de $I(t)$, $-S(t)$, \dots , $-S^{r-1}(t)$.

Un controlador clásico se establece como una regla de decisión de la tasa de producción con posibles saturaciones inferiores y superiores impuestas por P_{min} and P_{max} . Bajo condiciones idealizadas, el siguiente controlador de seguimiento de trayectoria proporcional doble integral para el sistema debería llevar al nivel de inventario a realizar un seguimiento de la trayectoria deseada,

$$\begin{aligned} P(t) = & \dot{I}^*(t) - \kappa_2 [I(t) - I^*(t)] - \kappa_1 \int [I(\sigma) - I^*(\sigma)] d\sigma \\ & - \kappa_0 \int \int [I(\gamma) - I^*(\gamma)] d\gamma d\sigma + z_1 \end{aligned} \quad (5.4)$$

con

$$\begin{aligned} \kappa_2 = & (2\tilde{\zeta}\omega_n p_c) / \varepsilon, \quad \kappa_1 = (2\tilde{\zeta}\omega_n p_c + \omega_n^2) / \varepsilon^2, \\ \kappa_0 = & (\omega_n^2 p_c) / \varepsilon^3 \text{ con } \tilde{\zeta} > 0 \text{ y } \omega_n > 0 \end{aligned}$$

donde $\tilde{\zeta}$ es el factor de amortiguamiento, ω_n es la frecuencia natural, p_c es una raíz estable y el parámetro ε es un factor de alta ganancia escalado. El efecto del doble integrador en la ecuación (5.4) es mejorar el tiempo de convergencia y disminuir el error de estado estacionario. Una característica importante del ESO es que no necesita el modelo del sistema y también tiene una buena convergencia debido a la dinámica lenta del sistema.

5.3. Prueba de convergencia

Sea:

$$\begin{aligned} \tilde{e}^{(3)}(t) + \left(\frac{2\zeta w_n p_c}{\varepsilon}\right)\ddot{\tilde{e}}(t) + \left(\frac{2\zeta w_n p_c + w_n^2}{\varepsilon^2}\right)\dot{\tilde{e}}(t) \\ + \left(\frac{w_n^2 p_c}{\varepsilon^3}\right)\tilde{e}(t) = -\dot{S}(t) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Multiplicando (5.5) por ε^3 , obtenemos:

$$\begin{aligned} \varepsilon^3 \tilde{e}^{(3)}(t) + \varepsilon^2 (2\zeta w_n p_c) \ddot{\tilde{e}}(t) + \varepsilon (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \dot{\tilde{e}}(t) \\ + (w_n^2 p_c) \tilde{e}(t) = -\varepsilon^3 \dot{S}(t) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Se establece $\varepsilon = 0$, y se obtiene una caracterización de la variedad lenta en el espacio de fase del error de estimación. La variedad lenta coincide con la línea $\dot{e} = e = 0$ en el espacio de fase del error de estimación que representa la variedad de equilibrio de las variables de fase de estimación del nivel de inventario $\bar{e} = \dot{\bar{e}} = 0$. La dinámica del error de estimación rápida se obtiene mediante un procedimiento de reescalado temporal en el que la coordenada de tiempo rápido, τ , se define simplemente como $\tau = t/\varepsilon$. Se obtiene de (5.6):

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{d\tau^3} \tilde{e}(\tau) + (2\zeta w_n p_c) \frac{d^2}{d\tau^2} \tilde{e}(\tau) + (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \frac{d}{d\tau} \tilde{e}(\tau) \\ + (w_n^2 p_c) \tilde{e}(\tau) = -\varepsilon^3 \dot{S}(\tau) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Obsérvese que para $\varepsilon = 0$ la dinámica rápida de error de estimación singularmente perturbada, caracterizada por la variable e_f , está idealmente representada por:

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{d\tau^3} e_f(\tau) + (2\zeta w_n p_c) \frac{d^2}{d\tau^2} e_f(\tau) + (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \frac{d}{d\tau} e_f(\tau) \\ + (w_n^2 p_c) e_f(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

que es asintóticamente exponencialmente estable al origen del espacio de fase del error de estimación \mathcal{E} .

El estado estacionario de la dinámica rápida perturbada se obtiene formalmente estableciendo los operadores diferenciales $d/d\tau$, $d^2/d\tau^2$ y $d^3/d\tau^3$ a cero. En otras palabras,

$$e(\tau) = - \left(\frac{\varepsilon^3}{w_n^2 p_c} \right) \dot{S}(\tau) \quad (5.9)$$

Una estimación de la región de convergencia final del error real de estimación de inventario e viene dada por:

$$|e(\tau)| \leq \left(\frac{\varepsilon^3}{w_n^2 p_c} \right) K_1 \quad (5.10)$$

Esta última igualdad establece la relación del límite δ en $|e(t)|$ con el parámetro de diseño de alta ganancia ε .

5.4. Caso de estudio

5.4.1. Trayectoria de la tasa de demanda

La trayectoria de la tasa de demanda a considerar refleja la incertidumbre total y el comportamiento altamente fluctuante de la tasa de pedidos de productos a medida que el tiempo evoluciona. Establecemos:

$$S(t) = 0.6 \left(1 + e^{(-c \operatorname{sen}^2(at))} \right) \quad (5.11)$$

donde

$$c = \cos(bt) \operatorname{sen}((a-b)t),$$

$$a = 1.5\pi/650 \text{ y } b = 3.5\pi/520$$

5.4.2. Perfil de inventario deseado

Si la tasa de producción coincide perfectamente con la tasa de demanda, entonces el nivel de inventario permanece constante y sólo reacciona a saturaciones temporales de velocidad de producción. Los "picos" de demanda que superan la capacidad máxima de producción son atendidos a expensas de decrementos del nivel de inventario con respecto al inventario deseado. Por el contrario, caídas de la tasa de demanda severa, por debajo de la tasa de producción mínima, hacen que la tasa de producción real caiga a un mínimo, aumentando así el nivel de inventario con respecto al inventario deseado. En una situación estable, el administrador de la CS puede decidir bajar o aumentar a un nuevo nivel de seguridad el inventario de manera controlada. El inventario deseado está dado por:

$$I^*(t) = \begin{cases} 35 \text{ cm} & t \in [0, 100] \text{ [s]} \\ f_{int}(t) \text{ cm} & t \in [100, 280] \text{ [s]} \\ 28 \text{ cm} & t \in [280, \infty) \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.12)$$

con

$$f_{int}(t) = f_s + \frac{(f_e - f_s) |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \left[r_1 - \frac{r_2 |t - t_1|}{(t_2 - t_1)} + \dots - \frac{r_6 |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \right]$$

donde

$$\begin{aligned} f_s &= 35 \text{ cm}, f_e = 28 \text{ cm} \\ t_1 &= 100 - T, t_2 = 280 - T, T = 1.2 \text{ seg} \\ r_1 &= 252, r_2 = 1050, r_3 = 1800 \\ r_4 &= 1575, r_5 = 700, r_6 = 126 \end{aligned}$$

5.4.3. Simulación y resultados experimentales

Para fines de comparación, se realizaron experimentos y simulaciones en un sistema de producción/inventario con una trayectoria fluctuante de la tasa de demanda, $S(t)$, dada por (5.12). Las restricciones de la tasa de producción, se establecieron en $P_{min} = 0[\text{cm/s}]$ y $P_{max} = 24[\text{cm/s}]$. La tasa de producción sigue de cerca la tasa de demanda, excepto durante los intervalos de saturación de la producción. Evidentemente, durante la saturación superior de la producción, debido a las tasas de demanda excesivas, el nivel de inventario disminuye temporalmente con respecto al inventario deseado y durante una menor saturación de la producción, debido a la ausencia de demanda, el nivel de inventario aumenta con respecto al inventario deseado. La velocidad de reposición del nivel de inventario es bastante razonable. Dos casos se muestran a continuación: caso sin saturación y caso con saturación, que se obtienen mediante la selección de las ganancias de control en (5.4). Los parámetros ξ , w_n , p_c y ε fueron elegidos de la siguiente manera:

$$\xi = 0.707, w_n = 1, p_c = 1; \text{ y } \varepsilon = 0.7$$

Donde ξ , se elige para ser aproximadamente 1, típicamente $w_n = 1, 2$ y p_c es de magnitud similar a w_n , y típicamente $\varepsilon = 1, 0.7, 0.1, 0.01$.

Caso sin saturación

El parámetro κ_1 se estableció a un valor de $\kappa_1 = 1$, vea (5.4). Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la trayectoria en simulación y experimentos en el sistema sin saturación.

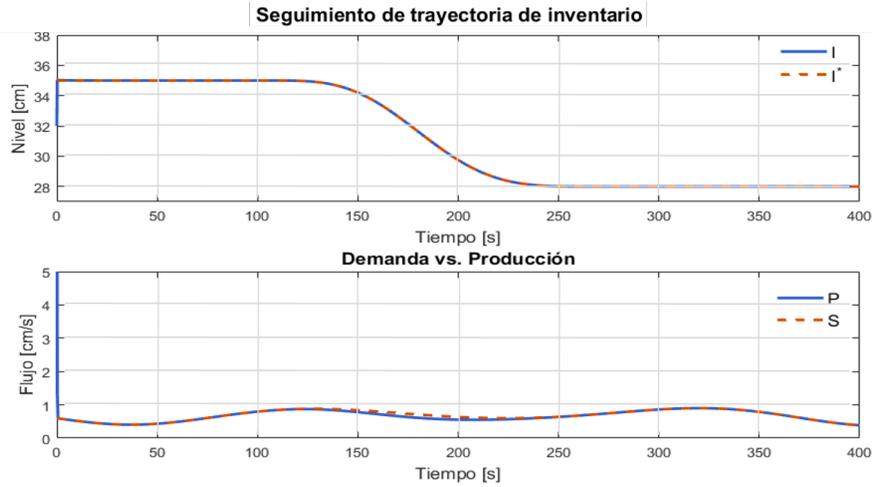


Figura 5.1: Resultados de simulación

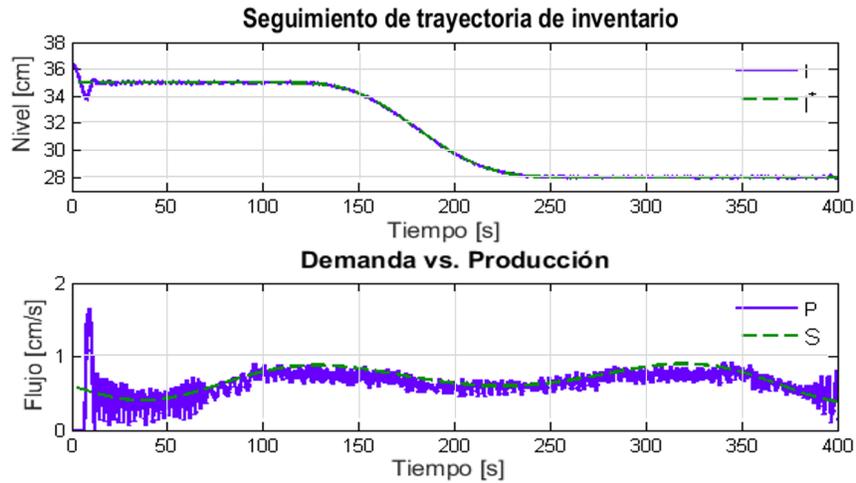


Figura 5.2: Resultados experimentales

La figura 5.3 muestra el error de seguimiento del inventario obtenido en la simulación y los experimentos.

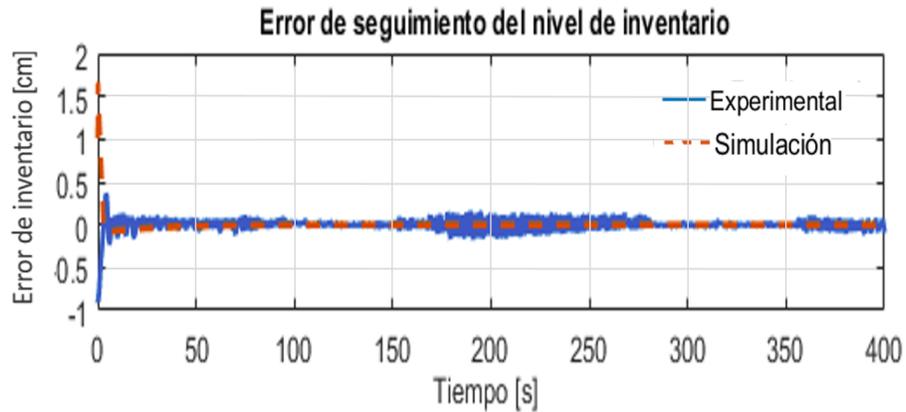


Figura 5.3: Error de seguimiento del inventario

Caso con saturación

Los parámetros κ_1 y κ_2 fueron modificados a un valor de $\kappa_1 = 4.2$ y $\kappa_2 = 28$, véase (5.4).

Las figuras 5.4 y 5.5 muestran el seguimiento de trayectorias y los intervalos de saturación en simulación y experimentos en el sistema con saturación.

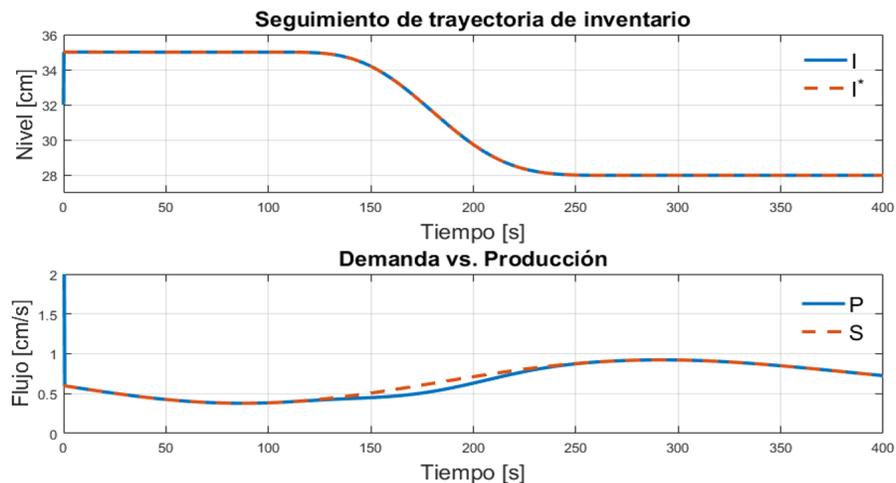


Figura 5.4: Resultados de simulación

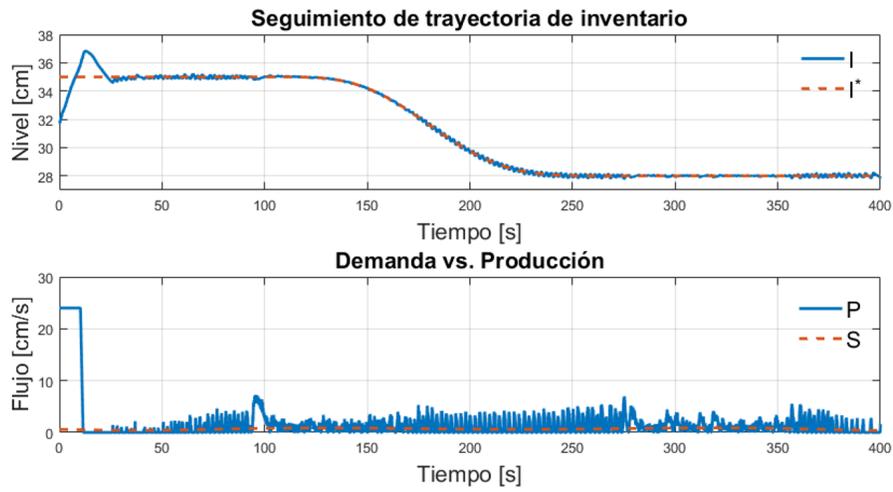


Figura 5.5: Resultados experimentales

La Figura 5.6 muestra el error de seguimiento del inventario obtenido en la simulación y los experimentos.

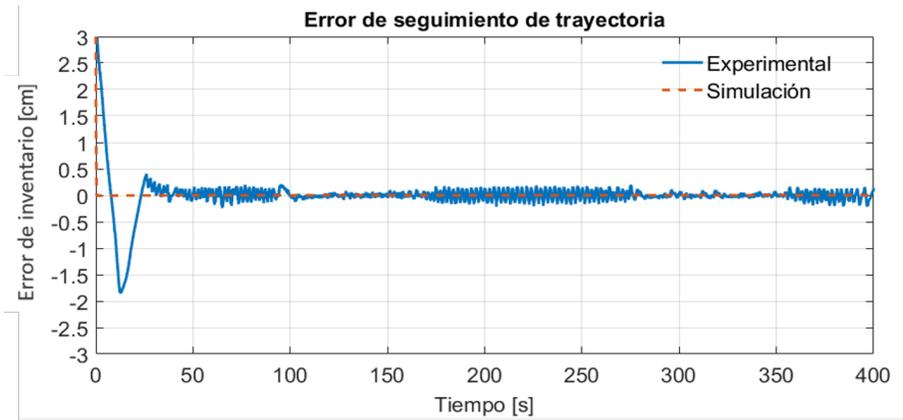


Figura 5.6: Error de seguimiento del inventario

5.4.4. Conclusiones

En este capítulo, se propone una regla de decisión para la tasa de producción lineal basada en un observador para el control de seguimiento de la trayectoria de retroalimentación de un perfil de trayectoria de nivel de inventario deseado. La tasa de demanda incierta es vista como una entrada de perturbación que afecta la dinámica del inventario. El enfoque propuesto se basa en gran medida en los principios de ADRC que se ha desarrollado ampliamente en un paradigma para el control de una gran clase de sistemas de ingeniería inestables plagado de no linealidades no modeladas y dinámica no modelada.

Capítulo 6

ADRC con control PID para nodo productor

Consideremos la planta con control w y la variable de salida $I(t)$,

$$\frac{d}{dt}I(t) = P(t) - S(t) \quad (6.1)$$

$$\frac{d}{dt}P(t) = \frac{1}{\gamma}(w(t) - P(t)) \quad (6.2)$$

donde $S(t)$ es la tasa de demanda, considerada como una perturbación desconocida pero suave, $P(t)$ es la tasa de producción, es la variable con la que se puede modificar el comportamiento del inventario, $I(t)$ se supone que se conoce con exactitud en cada instante de tiempo t , γ es el tiempo de adaptación y w actúa como una entrada de control.

6.1. Problema de control de inventario

Dada una trayectoria de nivel de inventario deseada y suave, $I^*(t)$, se desea tener un seguimiento de la señal de referencia dada, independientemente de la naturaleza desconocida de la tasa de demanda $S(t)$.

La planta puede ser descrita como

$$\ddot{I}(t) = -\frac{1}{\tau}\dot{I}(t) + \frac{1}{\tau}w(t) - \left[\dot{S}(t) + \frac{1}{\tau}S(t) \right] \quad (6.3)$$

donde el término $\frac{1}{\tau}\dot{I}(t)$ representa un amortiguamiento ficticio o artificial en el sistema, se considera que el término $\left[\dot{S}(t) + \frac{1}{\tau}S(t) \right]$ es una perturbación relacionada con la demanda que es de naturaleza anticipatoria.

Consideraremos que la planta controlada debe ser descrita por la siguiente dinámica simplificada:

$$\ddot{I}(t) = \frac{1}{\tau}w(t) - \zeta(t) \quad (6.4)$$

donde $\zeta(t)$ es la **perturbación total** incluyendo el término de amortiguamiento artificial, posiblemente desconocido

$$\zeta(t) = \left[\dot{S}(t) + \frac{1}{\tau}S(t) + \frac{1}{\tau}\dot{I}(t) \right] \quad (6.5)$$

6.2. Diseño del controlador y observador

Sea γ_2 , γ_1 y γ_0 coeficientes reales, de manera que el siguiente polinomio, $p_{con}(s)$, sea un polinomio Hurwitz

$$p_{con}(S) = s^3 + \gamma_2s^2 + \gamma_1s + \gamma_0 \quad (6.6)$$

que puede ser elegido por simple identificación de término a término de $p_{con}(s)$ con un polinomio Hurwitz deseado, $p_d(s)$, de la forma:

$$p_d(s) = s^3 + (p_c + 2\zeta_c\omega_{nc})s^2 + (2\zeta_c\omega_{nc}p_c + \omega_{nc}^2)s + \omega_{nc}^2p_c \quad (6.7)$$

Donde ζ_c es el factor de amortiguamiento y ω_{nc} es la frecuencia natural y p_c es una raíz estable. Es decir,

- $\gamma_2 = p_c + 2\zeta_c\omega_{nc}$
- $\gamma_1 = 2\zeta_c\omega_{nc}p_c + \omega_{nc}^2$
- $\gamma_0 = \omega_{nc}^2p_c$

Considere el siguiente Observador de Estado Extendido (ESO) basado en el controlador:

$$w(t) = \tau \left[\dot{I}^*(t) - \gamma_2(\hat{I}_2(t) - I^*(t)) - \gamma_1(I(t) - I^*(t)) - \gamma_0 \int_0^t (I(\sigma) - I^*(\sigma)) d\sigma - z(t) \right] \quad (6.8)$$

donde $\hat{I}_2(t)$ y $z(t)$ son obtenidos del ESO:

$$\frac{d}{dt}\hat{I}_1 = \hat{I}_2(t) + \lambda_2(I(t) - \hat{I}_1(t))$$

$$\frac{d}{dt}\hat{I}_2 = \frac{1}{\tau}w(t) + z(t) + \lambda_1(I(t) - \hat{I}_1(t))$$

$$\frac{d}{dt}z(t) = \lambda_0(I(t) - \hat{I}_1(t)) \quad (6.9)$$

Los errores de estimación de estado $e_1 = I(t) - \hat{I}_1(t)$ y $e_2 = \dot{I}(t) - \hat{I}_2(t)$ evolucionan de acuerdo con:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}e_1(t) &= e_2(t) - \lambda_2 e_1(t) \\ \frac{d}{dt}e_2(t) &= \zeta(t) - z(t) - \lambda_1 e_1(t) \\ \frac{d}{dt}z(t) &= \lambda_0 e_1(t) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Se observa que el error de estimación de salida $e_1(t) = I(t) - \hat{I}_1(t)$ evoluciona como el siguiente sistema de tercer orden perturbado:

$$e_1^{(3)} + \lambda_2 \dot{e}_1(t) + \lambda_1 \dot{e}_1(t) + \lambda_0 e_1(t) = \dot{\zeta}(t) \quad (6.11)$$

El conjunto de coeficientes reales: $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, de la dinámica de error de estimación de tercer orden inyectada, se eligen forzando el siguiente polinomio característico de la dinámica de error de observación no perturbada a ser un polinomio Hurwitz.

$$\begin{aligned} s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 &\equiv \\ \left(s^2 + \frac{2\zeta_o \omega_{no}}{\varepsilon} + \frac{\omega_{no}^2}{\varepsilon^2} \right) \left(s + \frac{p_o}{\varepsilon} \right) &\quad (6.12) \end{aligned}$$

donde ζ_o es el factor de amortiguamiento, ω_{no} es la frecuencia natural, y p_o es una raíz estable, el parámetro ε es un factor de alta ganancia de escala.

Por lo cual, tenemos para el ESO, los siguientes parámetros:

$$\lambda_2 = \frac{p_o + 2\zeta_o \omega_{no}}{\varepsilon} \quad (6.13)$$

$$\lambda_1 = \frac{\omega_{no}^2 + 2\zeta_o \omega_{no} p_o}{\varepsilon^2} \quad (6.14)$$

$$\lambda_0 = \frac{\omega_{no}^2 p_o}{\varepsilon^3} \quad (6.15)$$

6.3. Prueba de convergencia

Sea:

$$\begin{aligned} \tilde{e}^{(3)}(t) + \left(\frac{2\zeta w_n p_c}{\varepsilon}\right)\ddot{\tilde{e}}(t) + \left(\frac{2\zeta w_n p_c + w_n^2}{\varepsilon^2}\right)\dot{\tilde{e}}(t) \\ + \left(\frac{w_n^2 p_c}{\varepsilon^3}\right)\tilde{e}(t) = -\dot{S}(t) \end{aligned} \quad (6.16)$$

Multiplicando (5.5) por ε^3 , obtenemos:

$$\begin{aligned} \varepsilon^3 \tilde{e}^{(3)}(t) + \varepsilon^2 (2\zeta w_n p_c) \ddot{\tilde{e}}(t) + \varepsilon (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \dot{\tilde{e}}(t) \\ + (w_n^2 p_c) \tilde{e}(t) = -\varepsilon^3 \dot{S}(t) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Se establece $\varepsilon = 0$, y se obtiene una caracterización de la variedad lenta en el espacio de fase del error de estimación. La variedad lenta coincide con la línea $\dot{e} = e = 0$ en el espacio de fase del error de estimación que representa la variedad de equilibrio de las variables de fase de estimación del nivel de inventario $\bar{e} = \dot{\bar{e}} = 0$. La dinámica del error de estimación rápida se obtiene mediante un procedimiento de reescalado temporal en el que la coordenada de tiempo rápido, τ , se define simplemente como $\tau = t/\varepsilon$. Se obtiene de (5.6):

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{d\tau^3} \tilde{e}(\tau) + (2\zeta w_n p_c) \frac{d^2}{d\tau^2} \tilde{e}(\tau) + (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \frac{d}{d\tau} \tilde{e}(\tau) \\ + (w_n^2 p_c) \tilde{e}(\tau) = -\varepsilon^3 \dot{S}(\tau) \end{aligned} \quad (6.18)$$

Obsérvese que para $\varepsilon = 0$ la dinámica rápida de error de estimación singularmente perturbada, caracterizada por la variable e_f , está idealmente representada por:

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{d\tau^3} e_f(\tau) + (2\zeta w_n p_c) \frac{d^2}{d\tau^2} e_f(\tau) + (2\zeta w_n p_c + w_n^2) \frac{d}{d\tau} e_f(\tau) \\ + (w_n^2 p_c) e_f(\tau) = 0 \end{aligned} \quad (6.19)$$

que es asintóticamente exponencialmente estable al origen del espacio de fase del error de estimación.

El estado estacionario de la dinámica rápida perturbada se obtiene formalmente estableciendo los operadores diferenciales $d/d\tau$, $d^2/d\tau^2$ y $d^3/d\tau^3$ a cero. En otras palabras,

$$e(\tau) = - \left(\frac{\varepsilon^3}{w_n^2 p_c} \right) \dot{S}(\tau) \quad (6.20)$$

Una estimación de la región de convergencia final del error real de estimación de inventario e viene dada por:

$$|e(\tau)| \leq \left(\frac{\varepsilon^3}{w_n^2 p_c} \right) K_1 \quad (6.21)$$

Esta última igualdad establece la relación del límite δ en $|e(t)|$ con el parámetro de diseño de alta ganancia ε .

6.4. Caso de estudio

6.4.1. Trayectoria de la tasa de demanda

La trayectoria de la tasa de demanda a considerar refleja la incertidumbre total y el comportamiento altamente fluctuante de la tasa de pedidos de productos a medida que el tiempo evoluciona. Establecemos:

$$S(t) = 0.6 \left(1 + e^{(-c \text{sen}^2(at))} \right) \quad (6.22)$$

donde

$$c = \cos(bt) \text{sen}((a-b)t),$$
$$a = 1.5\pi/650 \text{ y } b = 3.5\pi/520$$

6.4.2. Perfil de inventario deseado

Si la tasa de producción coincide perfectamente con la tasa de demanda, entonces el nivel de inventario permanece constante y sólo reacciona a saturaciones temporales de velocidad de producción. Los "picos" de demanda que superan la capacidad máxima de producción son atendidos a expensas de decrementos del nivel de inventario con respecto al inventario deseado.

Por el contrario, "caídas" de la tasa de demanda severa, por debajo de la tasa de producción mínima, hacen que la tasa de producción real caiga a un mínimo, aumentando así el nivel de inventario con respecto al inventario deseado. En una situación estable, el administrador de la CS puede decidir bajar o aumentar a un nuevo nivel de seguridad el inventario de manera controlada. El inventario deseado está dado por:

$$I^*(t) = \begin{cases} 29 \text{ cm} & t \in [0, 100] [s] \\ f_{int}(t) \text{ cm} & t \in [100, 280] [s] \\ 22 \text{ cm} & t \in [280, \infty) [s] \end{cases} \quad (6.23)$$

con

$$f_{int}(t) = f_s + \frac{(f_e - f_s) |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \left[r_1 - \frac{r_2 |t - t_1|}{(t_2 - t_1)} + \dots - \frac{r_6 |t - t_1|^5}{(t_2 - t_1)^5} \right]$$

donde

$$\begin{aligned} f_s &= 35 \text{ cm}, f_e = 28 \text{ cm} \\ t_1 &= 100 - T, t_2 = 280 - T, T = 1.2 \text{ seg} \\ r_1 &= 252, r_2 = 1050, r_3 = 1800 \\ r_4 &= 1575, r_5 = 700, r_6 = 126 \end{aligned}$$

6.4.3. Simulación y resultados experimentales

Para fines de comparación, se realizaron experimentos y simulaciones en un sistema de producción / inventario con una trayectoria fluctuante de la tasa de demanda, $S(t)$, dada por (6.22). La disponibilidad de capacidad de producción correspondiente, inducida temporalmente por la disminución del nivel de inventario, ayuda a suministrar la tasa de demanda y, por lo tanto, se observa que la tasa de producción sigue la tasa de demanda durante el período de prueba a un nivel de magnitud menor. Las restricciones de la tasa de producción, se establecieron en $P_{min} = 0[cm/s]$ y $P_{max} = 24[cm/s]$. La tasa de producción sigue de cerca la tasa de demanda, excepto durante los intervalos de saturación de la producción.

Los parámetros ξ_c , w_{nc} , y p_c fueron elegidos de la siguiente manera:

$$\xi = 0.707, w_n = 2, y p_c = 2$$

Donde ξ , se elige para ser aproximadamente 1, típicamente $w_n = 1,2$ y p_c es de magnitud similar a w_n . El tiempo de adaptación γ se estableció en 1.4 segundos.

Las figuras 6.1 y 6.2 muestran la trayectoria en simulación y experimentos en el sistema sin saturación.

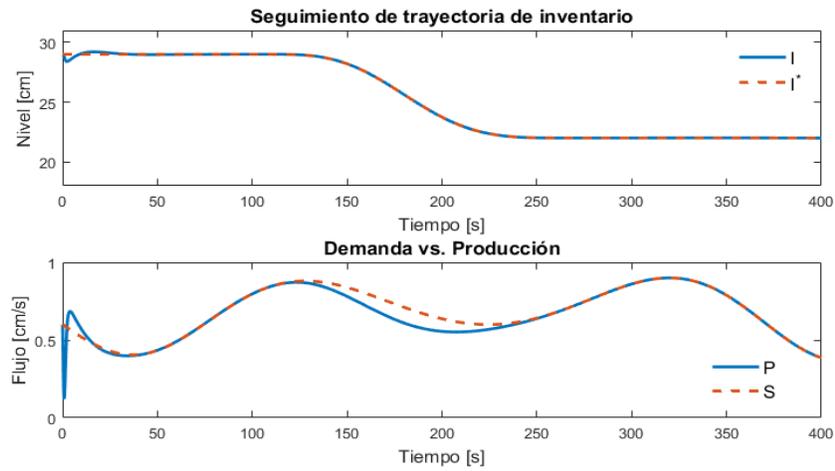


Figura 6.1: Resultados de simulación

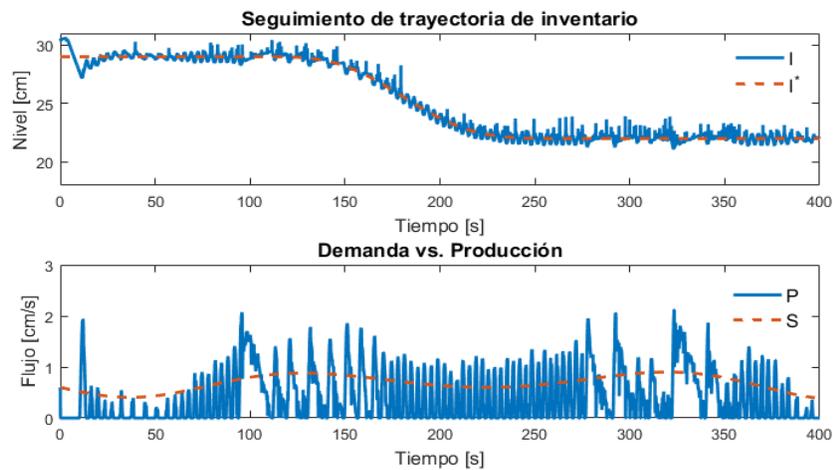


Figura 6.2: Resultados experimentales

La figura 6.3 muestra el error de seguimiento del inventario obtenido en la simulación y los experimentos.

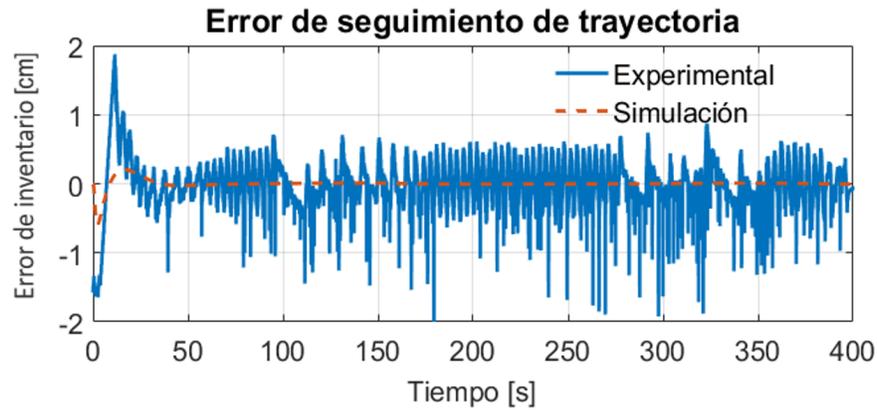


Figura 6.3: Error de seguimiento del inventario

6.4.4. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un esquema de control ADRC. La aproximación propuesta incluye el uso de un ESO, el cual estima las perturbaciones endógenas y exógenas del sistema.

Dicho estimado permite cancelar las perturbaciones, para de ese modo realizar la prueba de control deseada.

En los resultados de simulación se puede observar que la producción tiene un cambio súbito al inicio del experimento lo cual, al realizar el experimento, genera una saturación en la producción. La elección de los parámetros $\zeta = 0.707$, $\omega_n = 2$ y $p_c = 2$, representó un error de seguimiento de trayectoria menor en las pruebas realizadas.

Capítulo 7

Conclusiones

El estudio de las CS desde el punto de vista del control, es sin duda muy rudimentario, pero cada vez más presente en publicaciones relacionadas con el tema. Las leyes de control propuestas en este trabajo cumplieron con el objetivo propuesto:

- La combinación del esquema del predictor de Smith y la satisfacción de la demanda mostraron la predicción de la tasa de demanda desconocida y se procedía a resolver eficientemente el problema de seguimiento de la trayectoria del inventario, incluso en condiciones de saturación temporal de la tasa de producción.
- La perturbación, que afectaba la dinámica del inventario, dada por la demanda incierta, fue eliminada de manera eficiente por la aplicación del doble integrador en la ley de control. Pese a la saturación que se presentó, el tiempo de convergencia disminuyó.
- Los desempeños mostrados en casos de nodos no productores y productores, resaltaron las diferencias entre ambos tipos de nodo. El dominio de la dinámica de la tasa de producción, junto con su tiempo de adaptación, en el comportamiento de un nodo productor, quedó también mostrado en los resultados experimentales.

En función de los resultados se puede afirmar que los modelos de Evento Discreto son los más empleados para las CS y los programas de simulación desarrollados corren, en su mayoría, en un solo ordenador como un conjunto monolítico (enfoque de simulación Local). Sin embargo, en este trabajo se demuestra que la aplicación de modelos continuos con una estrategia de control bien diseñada, generan resultados satisfactorios que pueden ser aplicados eficientemente en la industria.

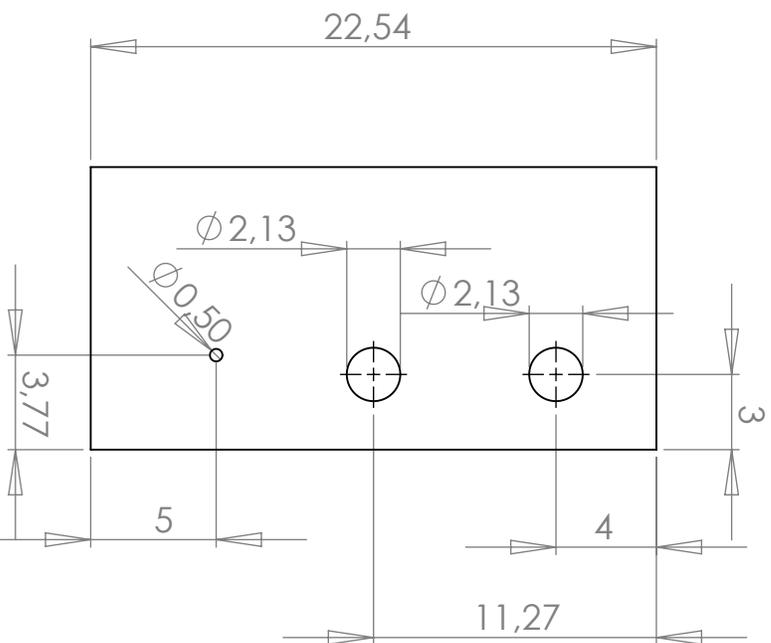
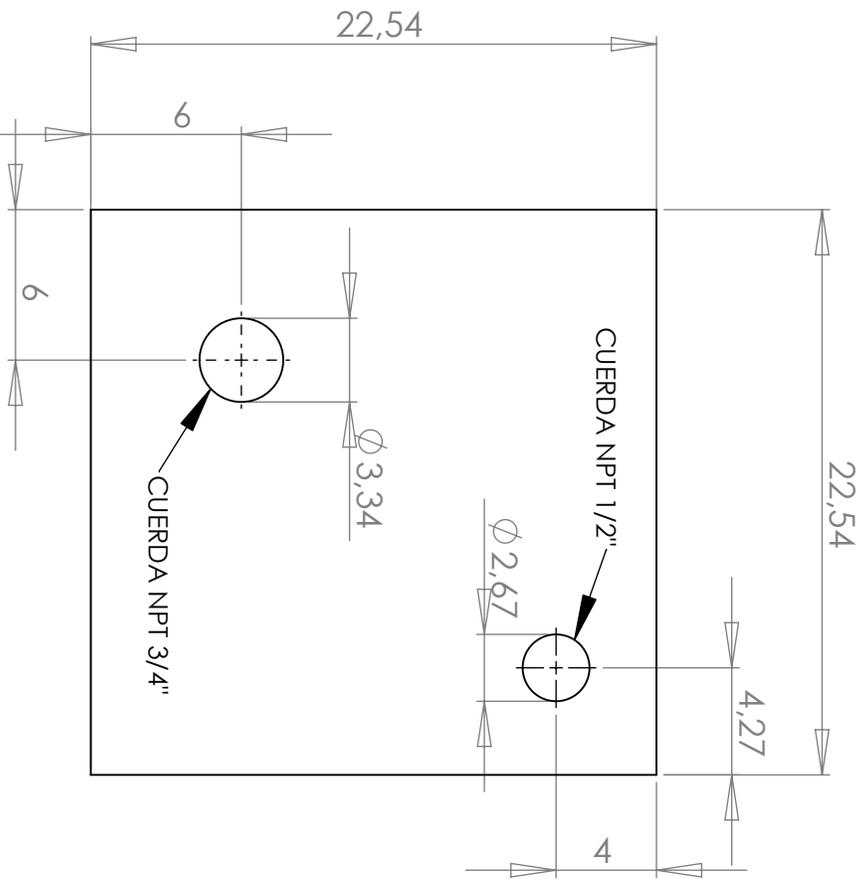
7.1. Trabajo futuro

Como trabajo futuro de este proyecto, se propone como punto más importante, implementar el sistema embebido, y que esto generaría muchas ventajas:

- Su programación estaría basada en derivados de C++, no en lenguajes derivados de entornos gráficos.
- Al estar compuesto de módulos electrónicos, le permite reducir enormemente sus costes, facilitándole asimismo su mantenimiento.
- Se pueden insertar tantos nodos como sean necesarios.
- A nivel de programación, se dispondría de múltiples posibilidades, al aumentar exponencialmente ésta, disfrutar de un control total sobre cada una de las funciones del software, y acrecentando además su velocidad de gestión.
- Podría obtenerse una interfaz gráfica con el usuario tan representativo como se desee (dispositivo móvil, computadora personal, etc.).

Asimismo, se propone la reparación o en su defecto cambio de los tanques dañados, para poder hacer pruebas con las leyes de control propuesto en varios tanques, conformando así una CS más compleja, donde se pueda observar el efecto bullwhip o látigo, que describe el incremento en la variación de los niveles de inventario de los nodos de la cadena más cercanos al inicio de la misma respecto a la variación de aquellos más cercanos al final de la cadena.

Apéndice A: Estructura del tanque

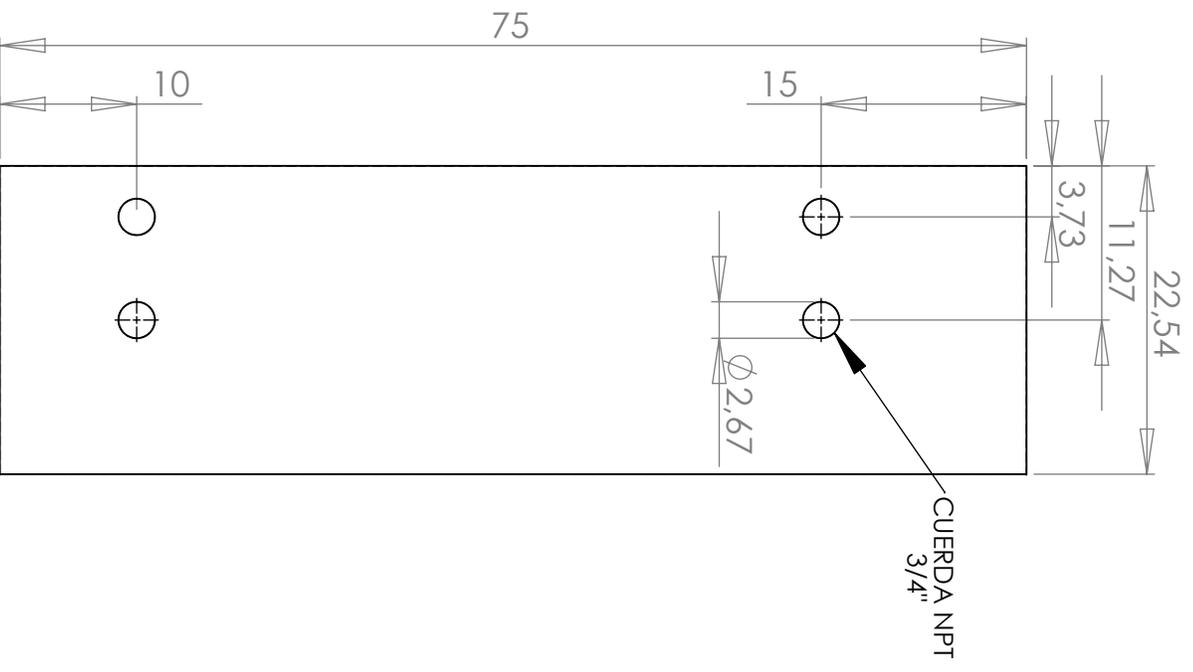
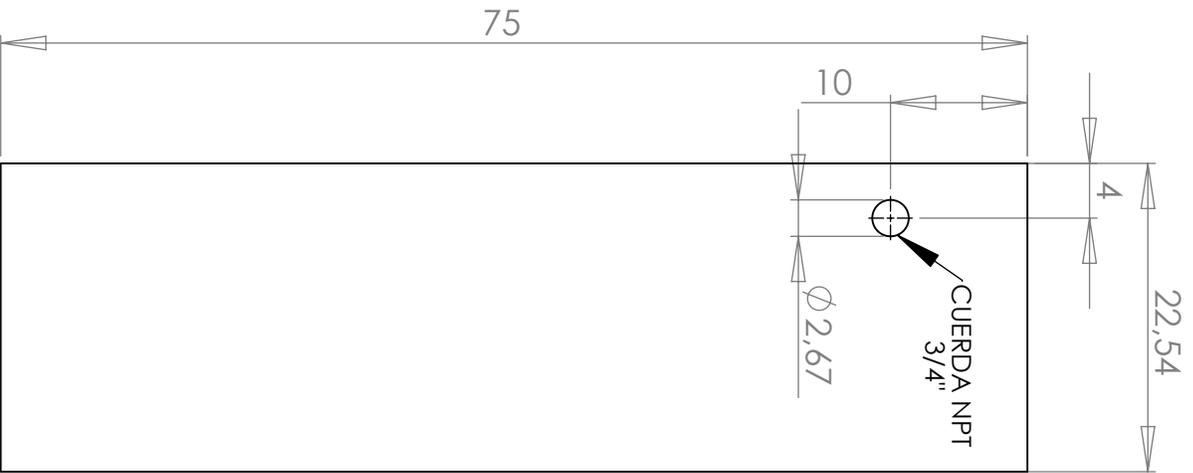


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
 DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

BASE TANQUE - TAPA TANQUE

DIMENSIONES EN CENTÍMETROS

MATERIAL: Lámina de acrílico de 1/2"

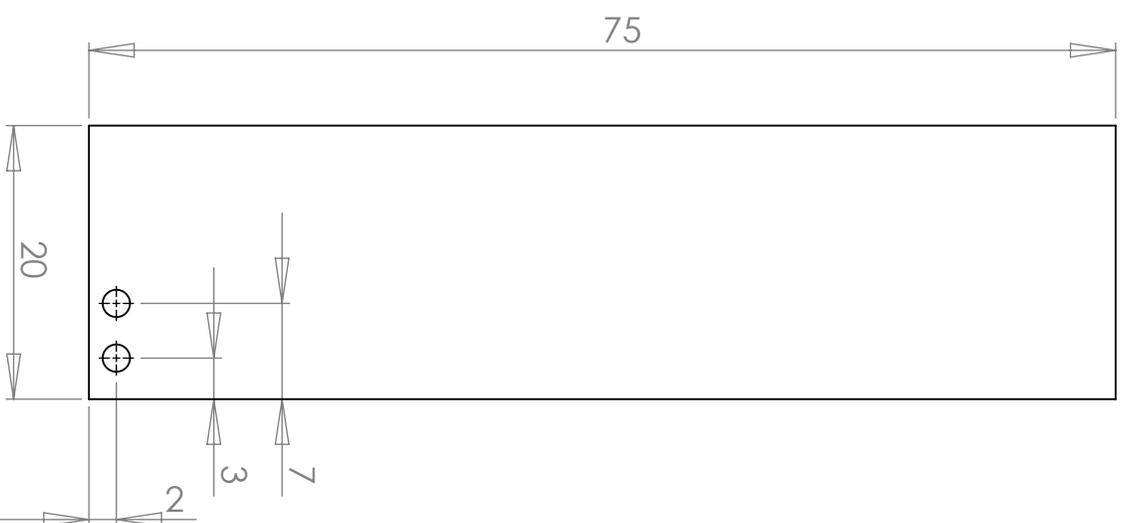
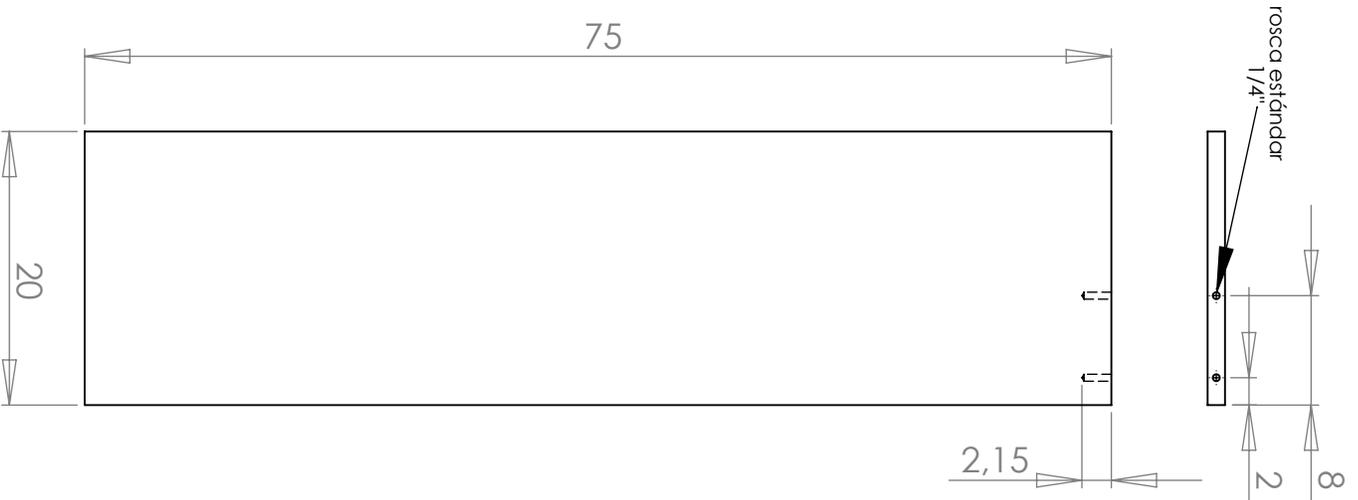


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
 DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

FRONTAL TANQUE - TRASERA TANQUE

DIMENSIONES EN CENTÍMETROS

MATERIAL: Lámina de acrílico de 1/2"

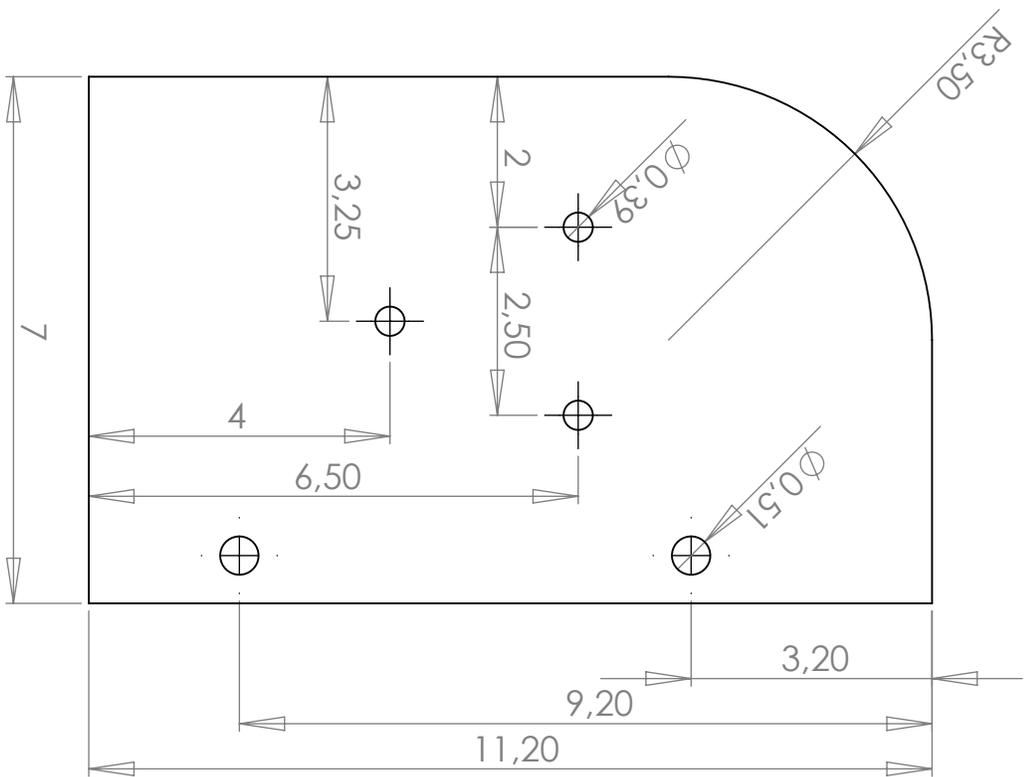
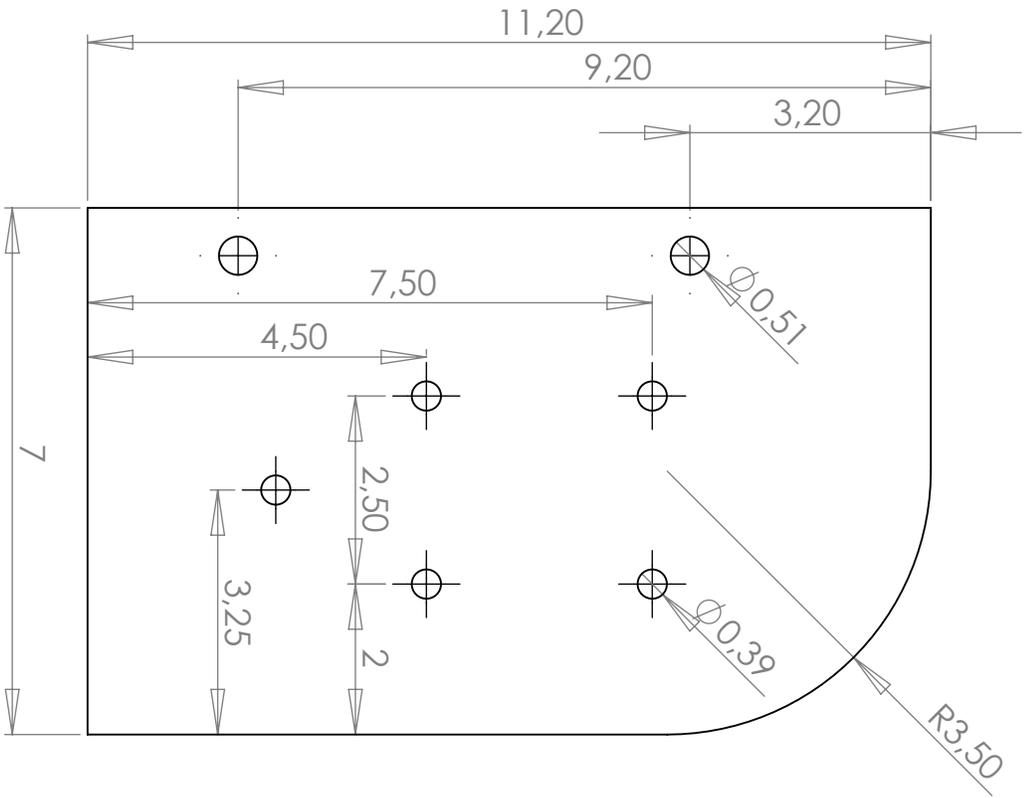


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
 DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

LATERAL TANQUE - PLACA DIVISORA

DIMENSIONES EN CENTÍMETROS

MATERIAL: Lámina de
 acrílico de 1/2"

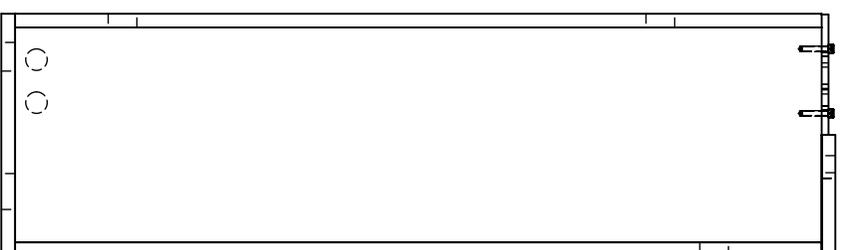
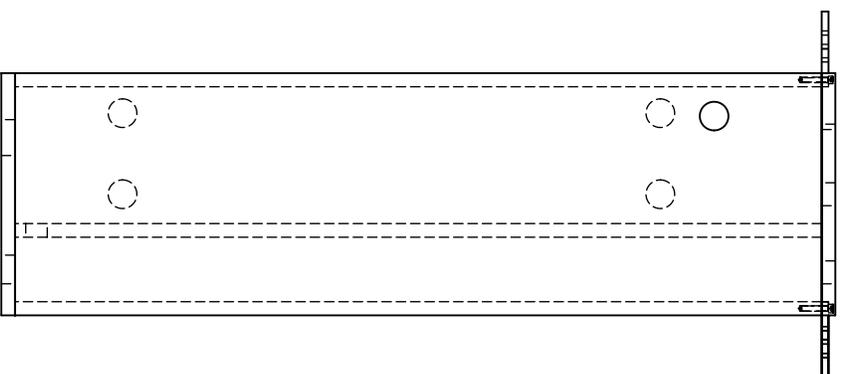
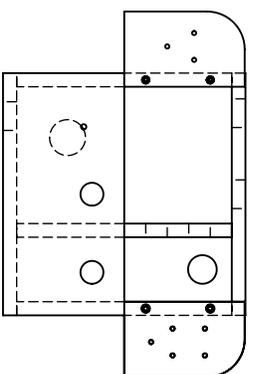


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
 DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

BÁSE CONECTORÁ
MEDICIÓN - ELECTROVALVULA

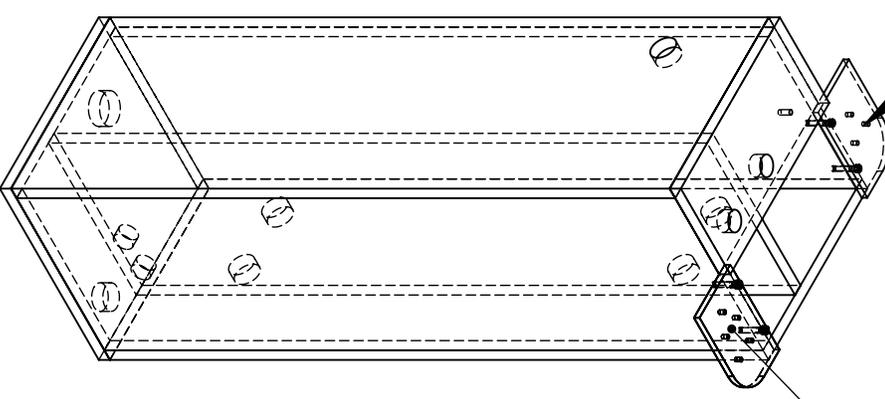
DIMENSIONES EN CENTÍMETROS

MATERIAL: Lámina de acrílico de 1/4"



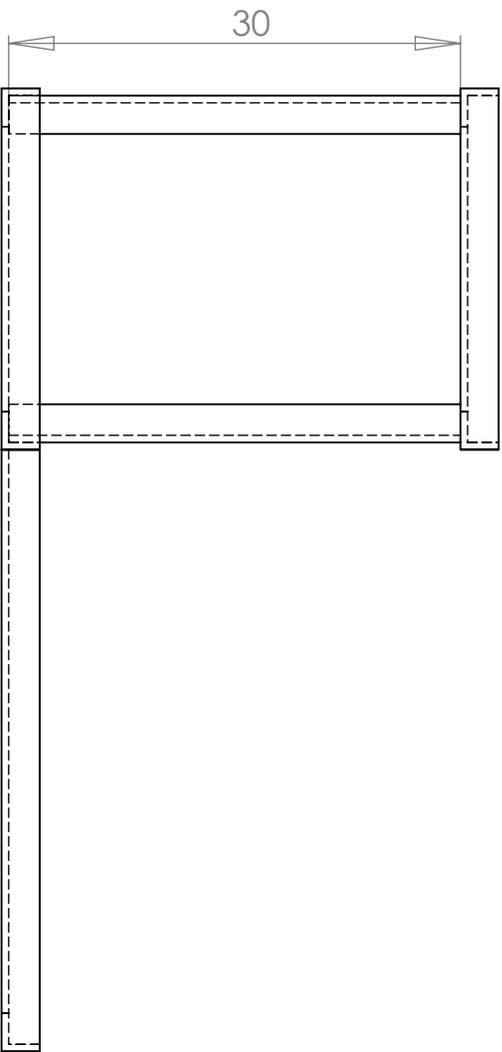
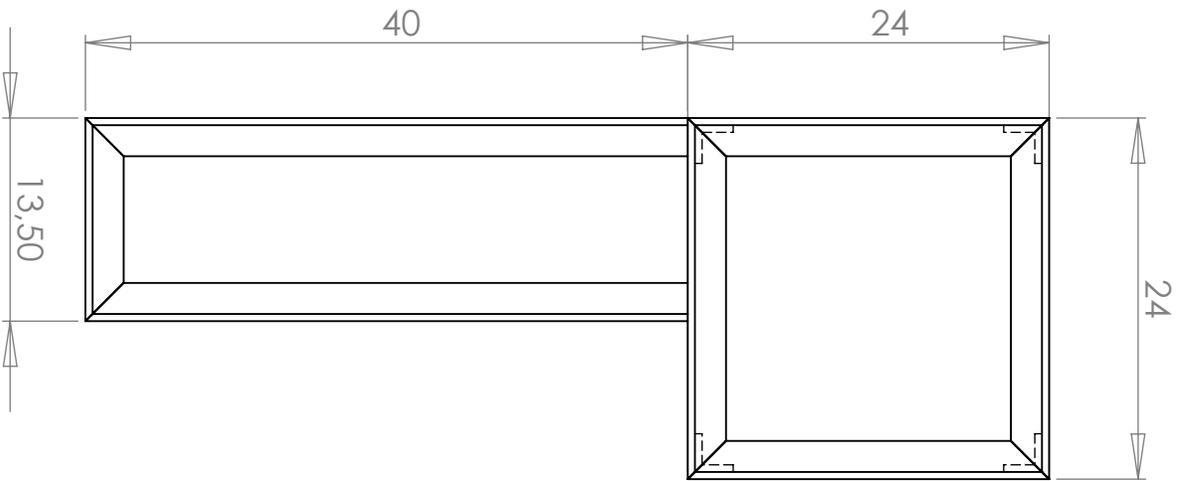
electroválvula

medición



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
 DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

TANQUE

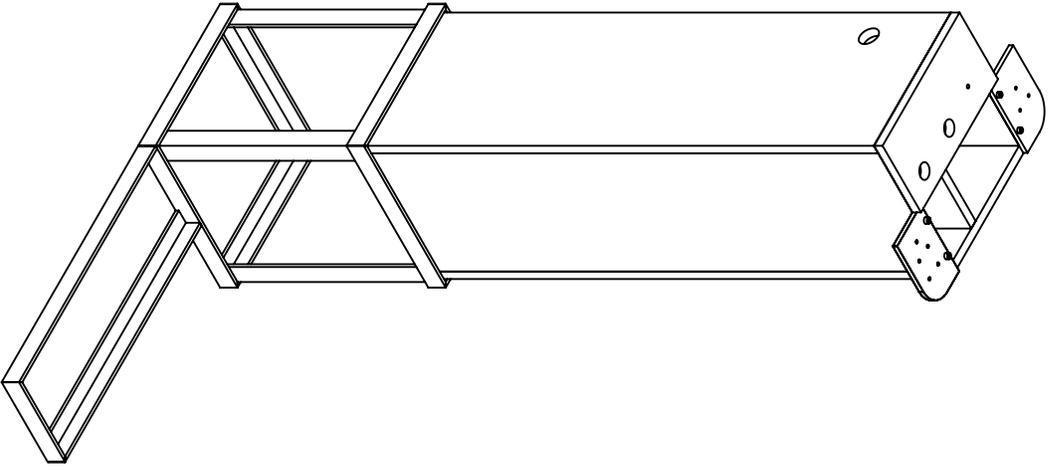
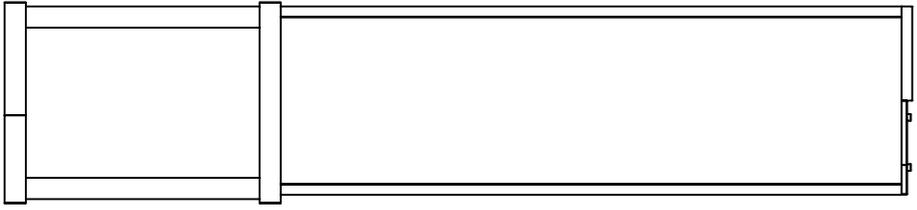
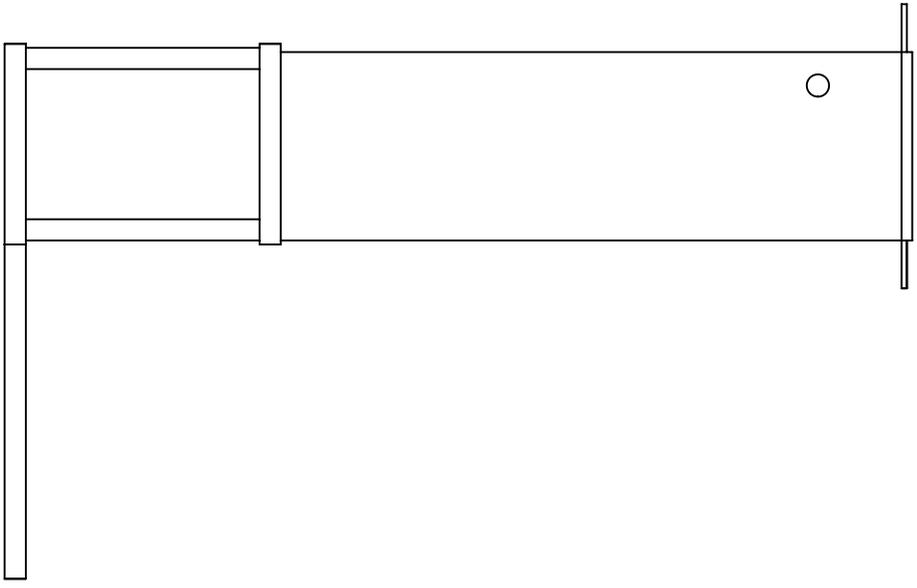
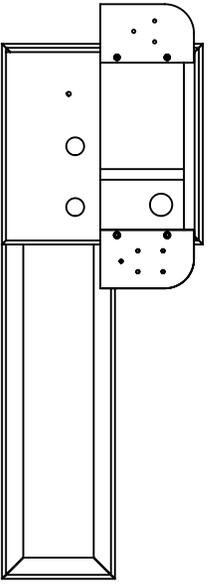


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECATRONICA

BASE METÁLICA

DIMENSIONES EN CENTÍMETROS

MATERIAL: ángulo de fierro
3/16 x 1 1/2 pulgadas



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
DPTO. INGENIERIA ELECTRICA SEC. MECAATRONICA

MÓDULO

Bibliografía

- [1] W. Thawornchak. Equation-Based and Agent-Based Modeling of Supply Networks. *Division of Informatics*, 2001.
- [2] L. Fredendall E. Hill. Basics of Supply Chain Management. *Estados Unidos: St Lucide Press/APICS series or resource management*, 2001.
- [3] B. M. Baemon. Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, pages 281–294, 1998.
- [4] C. Cassandras. Introduction to discrete event systems. *Kluwer Academic Publishers*, pages 455–458, 1999.
- [5] E. Lefeber. Nonlinear models for control of manufacturing systems. *Wiley-VCH*, pages 71–83, 2004.
- [6] D. Helbing. Modeling supply networks and business cycles as unstable transport phenomena. *New Journal of Physics* 5, pages 90.1–90.28.
- [7] E. Perea-López B. Ydstie E. Grossmann. A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 27:1201–1218, 2003.
- [8] E. Perea-López B. Ydstie E. Grossmann. Dynamic modeling and decentralized control of supply chains. *Pittsburgh Pennsylvania, American Chemical Society*, 2001.
- [9] A. Morales A. Rodriguez-Angeles. Inventory regulation and synchronization of dynamic supply chains by nonlinear bounded PI control. *8th International IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, 2:123–128, 2007.
- [10] A. Rodriguez-Angeles A. Sanchez M. Duarte-Lobo. Modeling and inventory regulation of dynamic supply chains through ordering policies. *4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pages 278–281, 2007.
- [11] M. Dotoli M. Fanti. Modelling systems by hybrid petri nets: an application to supply chains. *Petri Net: Theory and Applications. Vedran Kordic*, pages 91–121, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

- [12] P. Lin D. Won Jang Shi-Shang Shieh Shyan-Shu Chu Ji-Zheng. Controller design and reduction of bullwhip for a model supply chain system using Z-transform analysis. *Tao-Yuan, Taiwan, Journal of Process Control*, 14:487–499, 2004.
- [13] H. Simon. On the application of servomechanism theory in the study of production control. *Econometrica*, 20:247–268, 1952.
- [14] H.J. Vassian. Application of discrete variable servo theory to inventory control. *Operations Research*, 23:272–282, 1955.
- [15] M. Ortega Lin. Control theory applications to the production/inventory problem: a review. *International Journal of Production Research*, 42:2303–2322, 2004.
- [16] S. Axater. *Inventory Control*. Springer Science + Bussiness Media, New York, 2006.
- [17] S.M. Disney D.R. Towill. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research*, 40:567–590, 2002.
- [18] D.R. Towill. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research*, 20:671–687, 2005.
- [19] J. Dejonckheere S.M. Disney M. Lambrecht and D.R. Towill. Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, 147:567–590, 2003.
- [20] J. Han. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:900–906, 1995.
- [21] B. Sun Z. Gao. A DSP - based active disturbance rejection control design for a 1 KW H-Bridge DC-DC power converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52:1271–1277, 2005.
- [22] S.M. Disney D.R. Towill. Active Disturbance Rejection Control: A paradigm shift in feedback control system design. *Proc. of the 2006 American Control Conference*, page 7, 2006.
- [23] J. Han. An anthology on active disturbance rejection control. *Key Laboratory of Systems and Control, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*, 2014.
- [24] B.Z. Guo Z.L. Zhao. On the convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems. *SIAM J. Control and Optimization*, 51:1727–1757, 2013.

- [25] H. Sira-Ramirez F. Gonzalez-Montanez J. Cortes-Romero A. Luviano-Juarez. A robust linear field oriented voltage control for the induction motor: Experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 8:3025–3033, 2013.
- [26] H. Sira-Ramirez A. Luviano-Juárez M. Ramírez-Neira E. W. Zurita-Bustamante. *Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems: A flatness based approach*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K, 2017.
- [27] P. Ignaciuk A. Bartoszewicz. Smith predictor based control of continuous-review perishable inventory systems with multiple supply alternatives. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis Corfu Holiday Palace*, 56:900–906, 2011.
- [28] O.J.C. Smith. A controller to overcome dead time. *ISA Journal*, 6:28–33, 1959.
- [29] M. Ramirez-Neria H. Sira-Ramirez A. Rodriguez-Angeles. Smith predictor based generalized PI control for a class of input delayed nonlinear mechanical systems. *European Control Conference, Zurich, Switzerland*, 2013.
- [30] Y. Kuang. Delay differential equations with applications in population dynamics. *New York: Academic Press*, 1993.
- [31] J.E. Normey-Rico E.F. Camacho. Control of dead-time processes. *Berlin: Springer*, 2007.
- [32] O. J. Smith. Closer control of loops with dead time. *Chemistry Engineering Progress*, 53:217–219, 1957.
- [33] H. Huang C. Chen Y. Chao P. Chen. A modified smith predictor with an approximate inverse of dead time. *AIChE Journal*, pages 1025–1031, 1990.
- [34] T. Hagglung. An industrial dead-time compensating pi controller. *Control Engineering Practice*, pages 749–756, 1996.
- [35] J. Normey. Predicción para control. *Universidad de Sevilla*, 1999.
- [36] M. Fliess R. Marquez Emmanuel Delaleau H. Sira-Ramirez. Correcteurs proportionnels-intégraux généralisés. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 7:23–41, 2002.
- [37] C. D. Johnson. Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971.
- [38] H. Sira-Ramirez. *Control mediante rechazo activo de perturbaciones, perspectiva histórica y nuevos horizontes*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 2014.

BIBLIOGRAFÍA

- [39] C. Xisong L. Shihua Chen J. Yang. Disturbance observer-based control. 978-1-4665-1580-2. CRC Press, 2014.
- [40] Z. Gao. On disturbance rejection paradigm in control engineering. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, 2010.
- [41] H. Sira-Ramírez J. Linares-Flores A. Luviano-Juárez J. Cortés-Romero. Ultramodulos globales y el control por rechazo activo de perturbaciones en sistemas no lineales diferencialmente planos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 12, 2015.
- [42] W. Dan C. Ken. Design and analysis of precision active disturbance rejection control for noncircular turning process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009.
- [43] Y. Hou Z. Gao J. Fangjun T. Boulter. Active disturbance rejection control for web tension regulation. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.
- [44] Z. Gao H. Shaohua J. Fangjun. A novel motion control design approach based on active disturbance rejection. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.
- [45] Z. Qing Z. Gao. On practical application of active disturbance rejection control. *Proceeding of the 29th Chinese Control Conference*, 2010.
- [46] Q. Zheng Q. Linda Gao Z. Gao. On estimation of plant dynamics and disturbance from input-output data in real time. *IEEE International Conference on Control Applications*, pages 1167–1172, 2007.
- [47] Rogelio Gabriel Guadarrama Mendoza. Diseño y construcción de una plataforma de pruebas para el control y sincronización de cadenas de suministro. *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, Zacatenco, Ciudad de México*, 2010.
- [48] Ramiro Loza Chávez. Control y sincronización de Cadenas de Suministro. *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, Zacatenco, Ciudad de México*, 2012.
- [49] IFM. Ficha técnica detector de caudal. [urlhttps://www.ifm.com/mx](https://www.ifm.com/mx), 2016.
- [50] Burkert. Proportional valve with control electronics. [urlhttps://www.burkert.com/en/Media/plm/DTS/DS/DS6223-Standard-EU-EN.pdf?id=DTS00000000000000001000011057ENH](https://www.burkert.com/en/Media/plm/DTS/DS/DS6223-Standard-EU-EN.pdf?id=DTS00000000000000001000011057ENH), 2017.

- [51] Inc. Motorola, Freescale Semiconductor. Integrated silicon pressure sensor on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated. urlpdf.datasheetcatalog.net/datasheet2/1/02je4qkto9x292kriz269qcuzgpy.pdf, 2017.
- [52] H. Sira-Ramirez F. Gonzalez-Montanez J. Cortes-Romero. *State observers for active disturbance rejection in induction motor control*. AC Motors control - Advanced Design Techniques and Applications F. Giri, N.J., USA, 2014.
- [53] L. Noethen S. Walcher. Tikhonov's theorem and quasi-steady state. *Discrete Contin. Dyn. Syst*, pages 945–961, 2011.