



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**”CONTROL AUTO-DISPARADO USANDO MODO DESLIZANTE
POR RED”**

AUTOR: BYRON MARCELO DEFAZ CAIZA

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

IBARRA

JULIO 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, realizo la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:		1727465955	
APELLIDOS Y NOMBRE:		DEFAZ CAIZA BYRON MARCELO	
DIRECCIÓN		CAYAMBE-JUAN MONTALVO	
E-MAIL		bmdefazc@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO	(02)2127028	TELÉFONO MÓVIL	0992962098
FECHA		5 de agosto de 2020	
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA		PREGRADO	
TITULO POR EL QUE OPTA		INGENIERO EN MECATRÓNICA	
ASESOR/DIRECTOR		CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI	

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 5 de agosto de 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICADO

En calidad de director del trabajo de grado **“CONTROL AUTO-DISPARADO USANDO MODO DESLIZANTE POR RED”**, presentado por el egresado **BYRON MARCELO DE-FAZ CAIZA**, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 5 de agosto de 2020

CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

DIRECTOR DE TESIS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
DECLARACIÓN

Yo, **BYRON MARCELO DEFAZ CAIZA** con cédula de identidad Nro. 1727465955, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ibarra, 5 de agosto de 2020

BYRON MARCELO DEFAZ CAIZA

CI:1727465955

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

Resumen

Abstract

First paragraph

Second Paragraph

Third Paragraphy

Keywords : Keyword1, Keyword2

Índice general

Abstract	I
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
Introducción	VII
1. Revisión Literaria	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Sistemas de estructura variable	3
1.3. Control de estructura variable	3
1.3.1. Modelos matemáticos y estructurales básicos de sistemas no lineales . .	4
1.4. Control en modo deslizante (SMC)	5
1.4.1. Algoritmo del control en modo deslizante	5
1.4.2. Superficie de deslizamiento	6
1.4.3. Regimen deslizante	7
1.4.4. Estabilidad en el sentido de Lyapunov	7
1.4.5. Candidato del Lyapunov	8
1.4.6. Chattering	8
1.4.7. Condición de Alcanzabilidad	10
1.4.8. Condición de Estabilidad	11
1.4.9. Función de histéresis	12
1.5. Muestreo	13

1.5.1.	Muestreo aperiódico	14
1.6.	Control manejado por eventos	14
1.6.1.	Control Auto-disparado	15
1.7.	Sistemas de control en red (NCS)	16
1.7.1.	Ancho de banda limitado	17
1.7.2.	Retrasos de comunicación variables	17
2.	Metodología	19
2.1.	Deslizamiento básico	19
2.1.1.	Ley de control	19
2.1.2.	Superficie de deslizamiento	20
2.1.3.	Candidato Lyapunov	20
2.2.	Enfoque integrado	21
2.3.	Algoritmo de operación	22
2.3.1.	Pseudocódigo	23
2.4.	Dirección deseada	24
2.5.	Accesibilidad de banda	24
2.6.	Técnica de auto-disparado	24
2.7.	Directrices de implementación	25
2.7.1.	Protocolo CAN	25
3.	Implementación y pruebas	27
4.	Proposed Work	28
5.	Conclusiones y trabajo futuro	29

Índice de figuras

1.1. Diagrama de bloques de un sistema no lineal	4
1.2. Representación Chattering	9
1.3. Función Saturación	10
1.4. Condición de alcanzabilidad de un sistema en modo deslizante	11
1.5. Condiciones de estabilidad	12
1.6. Función de histéresis en el control en modo deslizante	13
1.7. Trayectoria en modo deslizante con la función de histéresis	13
1.8. Muestreo periódico vs Muestreo disparado por evento	14
1.9. Estructura genérica de un sistema de control en red	17
2.1. Señal del controlador en modo deslizante	20
2.2. Operación deseada	22

Índice de cuadros

Introducción

Motivación

Los sistemas de control automatizados han jugado un rol importante en el desarrollo de la ciencia en general, fundamentalmente en el área de ingeniería. Sus innumerables aplicaciones crecen día a día para facilitar y optimizar los procesos de producción industriales. El control de modo deslizante por su parte es una de las técnicas de control robustas que posee propiedades bien conocidas, como la reducción del orden del modelo, la propiedad de invariancia y el rechazo completo de perturbaciones [1].

Convencionalmente, para los sistemas de control en red, una operación de alta frecuencia de un controlador de modo deslizante en red también tiene el efecto negativo de aumentar dramáticamente el tráfico de la red.

El uso de la misma velocidad de muestreo para transitorios y en estado estable da como resultado grandes velocidades de transmisión de datos. Por otro lado, debido a la restricción del ancho de banda de la red, un uso eficiente de la infraestructura de comunicación implícita es importante desde la perspectiva de escalamiento del sistema [2],[3].

En este contexto, el empleo de intercambios de datos basados en la necesidad entre los agentes, lo que resulta en un intercambio de información “aperiódico” tiene claras ventajas en comparación con los intercambios de datos periódicos. El intercambio de datos aperiódico se puede realizar utilizando un enfoque auto-disparado [4].

Por otro lado, el control auto-disparado no puede responder de inmediato a la perturbación. Esto se debe al hecho de que la siguiente instancia de tiempo de actualización de control se calcula previamente en el instante de tiempo actual y no se observa el estado entre las dos instancias de tiempo [5]. Esos problemas hacen que el análisis de los sistemas de control en red sea más complejo e importante, y son las principales causas del deterioro del rendimiento

de los sistemas de control en red y la inestabilidad potencial del sistema. Sin embargo, estos problemas no han sido considerados por la teoría de control convencional hasta ahora.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un modelo de control auto-disparado usando modo deslizante por red

Objetivos específicos

- Determinar las características principales del control en modo deslizante auto-disparado en relación al estado del arte.
- Desarrollar una estrategia que permita controlar un sistema en modo deslizante auto-disparado en red.
- Obtener resultados referentes al uso de recursos y estabilidad de la estrategia implementada sobre un sistema de control en red.

Problema

Desde décadas pasadas, el control con información mínima se ha investigado ampliamente debido a sus numerosas ventajas. Los avances en las tecnologías de la computación y las redes de comunicación han llevado a un nuevo tipo de sistemas de control a gran escala y con recursos [6], [7]. Es deseable en estos sistemas limitar el sensado, el cómputo de la acción de control y el uso de la red de datos sólo para los casos en que el sistema necesita atención. Sin embargo, el control clásico de datos muestreados se basa en realizar la detección y el accionamiento periódicamente en lugar de cuando el sistema necesita atención [8].

Por otro lado, el control en modo deslizante auto-disparado se ha convertido en una de las soluciones seleccionadas para muchos diseños de control prácticos como dispositivos electróni-

cos, robótica, procesos químicos y similares [9]. Esta técnica se ha aplicado ampliamente debido a su simplicidad y robustez frente a variaciones de parámetros y perturbaciones. Un modo deslizante ideal requiere una frecuencia de conmutación infinita para mantener el estado en la superficie deslizante. Sin embargo, una frecuencia de conmutación infinita puede no ser aceptable en la práctica, lo que lleva a un fenómeno no deseado de oscilaciones que tienen frecuencia y amplitud finitas, lo que se conoce como chattering. El chattering no puede eliminarse en la implementación de controladores de modo deslizante debido a la limitación práctica de la frecuencia de conmutación dada por la plataforma de software / hardware.

En el campo de los sistemas de control en red donde los sensores, controladores y actuadores se distribuyen físicamente e intercambian datos de control a través de la red, una operación de alta frecuencia de un controlador de modo deslizante en red también tiene el efecto negativo de aumentar drásticamente el tráfico de la red. Por lo tanto, es de interés analizar las estrategias de implementación destinadas a reducir el consumo de ancho de banda de la red [10].

Justificación

En programación y control automático, afianzar que los sistemas funcionan eficientemente juega un papel fundamental en los procesos donde la precisión es vital; específicamente en el campo de los sistemas de control en red donde los sensores, controladores y actuadores se distribuyen físicamente e intercambian datos de control a través de la red. El control de estos sistemas es de gran importancia en mecatrónica y son usados ampliamente en el control digital de robots, máquinas-herramientas, motores eléctricos, coches, sistemas neumáticos e hidráulicos, entre otros. Un controlador auto-disparado, además de aplicar el control, calcula en algunas condiciones el intervalo de tiempo en el que se debe aplicar la próxima actualización de control. El ajuste de estas condiciones en el tiempo de ejecución permite regular la velocidad de ejecución del controlador y al final sus demandas de recursos (tiempo del procesador,

ancho de banda de la red). En la actualidad, gracias al desarrollo y aplicación de las técnicas modernas de control, un gran número de tareas y cálculos asociados a la manipulación de las variables han sido delegados a computadoras, controladores y accionamientos especializados para el logro de los requerimientos del sistema. Por lo tanto, en la integración de todo tipo de software y desarrollo de aplicaciones de control y gestión, es importante analizar las estrategias de implementación explícitamente con restricciones de energía, computación y comunicación.

Alcance

El presente proyecto desarrollará un modelo de control auto-disparado usando modo deslizante por red. Se propondrá una estrategia de control cuyo desempeño se ilustrará a través de ejemplos de simulación comparativa en relación a la utilización del procesador. Para la realización de este proyecto se utilizará software matemático.

Capítulo 1

Revisión Literaria

En este capítulo se presentan las ideas básicas y fundamentos del control por estructura variable, específicamente el control en modo deslizante. Además, se proporciona un enfoque sobre los sistemas de control en red y las técnicas de control manejado por eventos en relación al estado del arte.

1.1. Antecedentes

Los avances recientes de los sistemas de estructura variable y el modo deslizante se pueden encontrar en los documentos presentados en los talleres VSS patrocinados por el Comité Técnico de IEEE sobre sistemas de estructura variable y control de modo deslizante [11]. Además, en la literatura se puede resaltar las más recientes contribuciones que han extendido el paradigma de control de modo deslizante e introducido el concepto de control de modo deslizante de orden superior, donde una motivación es buscar un control suave que abarque de forma natural y precisa los beneficios del enfoque tradicional para el control de modo deslizante.

Algunos ejemplos de aplicaciones de SMC se encuentran en la literatura. Gokasan y Bogosyan desarrollaron una estrategia de gestión de energía basada en un controlador de modo deslizante para mejorar la eficiencia general de una serie de vehículos híbridos-eléctricos. Como un enfoque novedoso, se desarrollaron dos controladores en modo deslizante sin vibraciones para mantener el funcionamiento del motor en la región de eficiencia óptima, siempre que se

requiera el funcionamiento del motor debido a una caída en el nivel del estado de carga de la batería. Uno de los SMC está dedicado al control de velocidad del motor, mientras que el otro realiza el control del par motor-generador a través del convertidor de potencia. El rendimiento del nuevo controlador se comparó con un controlador existente que registra un rendimiento mejorado y una eficiencia general con emisiones y reducción del consumo de combustible en un entorno de simulación [12].

En [1] los autores discuten aquí la robusta estabilización de un sistema lineal invariante en el tiempo utilizando el control de modo deslizante (SMC) con la estrategia de auto-disparo. En la activación automática, la acción de control no se actualiza de manera periódica como en el sistema clásico de muestreo. El SMC con mecanismo de auto-disparo logra una estabilidad robusta con un mayor período de tiempo de ejecución del control. En comparación con la activación de un evento, la técnica de activación automática no requiere hardware dedicado adicional para la medición continua del estado para determinar el siguiente instante de activación posible. Aquí, se desarrolla una estrategia para encontrar el siguiente instante de activación posible utilizando únicamente información de estado muestreada en el pasado y garantizando que incluso en presencia de perturbaciones el sistema de circuito cerrado sea estable. Se ha demostrado que el rendimiento del sistema mejora en términos del número de actualizaciones de control y, por lo tanto, la ejecución del control requiere menos recursos. Los resultados de la simulación numérica se proporcionan para validar el análisis teórico.

Un enfoque diferente presenta Peng Wu, en el cual propone un método de control de activación automática basado en el control de modo deslizante de terminal no singular para garantizar la calidad de control requerida y minimizar la utilización de recursos del sistema. Para mejorar aún más el rendimiento de control, presenta un observador de perturbaciones no lineales para estimar la perturbación externa. Con la prueba de la estabilidad del sistema, se establece la condición de autocontrol basada en el tiempo de ejecución de las tareas de control. Esto no solo

mejora la capacidad de rechazo de perturbaciones, sino que también permite que el sistema de control muestre en frecuencias más bajas con garantía de rendimiento. Los resultados de la simulación muestran que, en comparación con el control periódico, el método de control auto-disparado propuesto puede reducir significativamente la utilización de recursos en los sistemas de control en red [13].

1.2. Sistemas de estructura variable

Los sistemas de estructura variable consisten en un conjunto de subsistemas continuos con una lógica de conmutación adecuada y, como resultado, las acciones de control son funciones discontinuas del estado del sistema, perturbaciones (si son accesibles para la medición) y entradas de referencia. En el curso de toda la historia de la teoría de control, la intensidad de la investigación de sistemas de control discontinuo se ha mantenido a un nivel suficientemente alto. En particular, en la primera etapa, los reguladores on-off o bang-bang se clasifican altamente debido a la facilidad de implementación y la eficiencia del hardware de control.

1.3. Control de estructura variable

Los sistemas físicos en general, y los sistemas técnicos en particular, son, por regla general, no lineales, es decir, comprenden no linealidades. Por no linealidades implicamos cualquier desviación de características lineales o de ecuaciones lineales de la dinámica del sistema. En general, el análisis de la dinámica del sistema de control automático comienza con la descripción matemática de los elementos individuales del sistema de circuito cerrado. La descripción implica ecuaciones diferenciales lineales o no lineales, que, combinadas con las cantidades externas que actúan sobre el sistema, forman el modelo matemático del rendimiento dinámico del sistema. Si el rendimiento dinámico de todos los elementos puede describirse mediante ecuaciones diferenciales lineales, entonces el sistema en su conjunto puede describirse mediante

una ecuación diferencial lineal. Esto se llama un sistema de control lineal.

1.3.1. Modelos matemáticos y estructurales básicos de sistemas no lineales

Los sistemas continuos de variante de tiempo no lineal se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales vectoriales de primer orden de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{h}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)]\end{aligned}\tag{1.1}$$

o en el caso de sistemas discretos no lineales, por ecuaciones de diferencia:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{f}[k, \mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)] \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{h}[k, \mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)]\end{aligned}\tag{1.2}$$

donde \mathbf{x} es el vector de estado $n \times 1$, $x \in \mathbb{R}^n$; \mathbf{u} es el vector de entrada $m \times 1$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ e \mathbf{y} es el vector de salida $r \times 1$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^r$ [14].

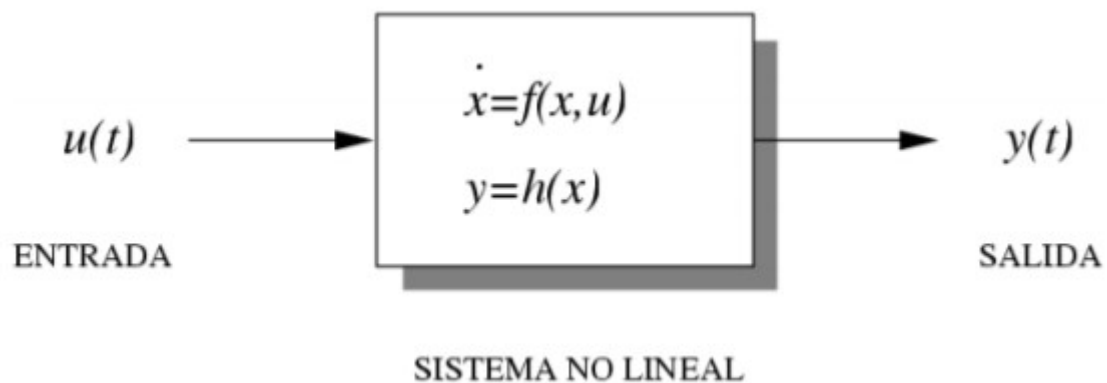


Figura 1.1: Diagrama de bloques de un sistema no lineal

El sistema de Control de Estructura Variable (VSC) ha sido estudiado por un investigador ruso en forma de modo deslizante, los detalles de la historia se pueden encontrar en [15].

1.4. Control en modo deslizante (SMC)

El control de modo deslizante es un tipo particular de Sistema de Estructura Variable que se caracteriza por una serie de leyes de control de retroalimentación y una regla de decisión. La regla de decisión, denominada función de conmutación que tiene como entrada alguna medida del comportamiento del sistema actual y produce como salida del controlador de retroalimentación particular que debe usarse en ese instante en el tiempo. En el control de modo deslizante, los sistemas de control de estructura variable están diseñados para conducir y luego restringir el estado del sistema para que se encuentre dentro de una superficie de la función de conmutación.

Los sistemas con modos deslizantes han demostrado ser eficaces para controlar plantas dinámicas no lineales complejas de alto orden que operan en condiciones de incertidumbre, un problema común para muchos procesos de tecnología moderna. Esto explica el alto nivel de actividad de investigación y publicación en el área y el interés incesante de los ingenieros en ejercicio en el control de modo deslizante durante las últimas dos décadas [16].

1.4.1. Algoritmo del control en modo deslizante

El algoritmo de control en modo deslizante está diseñado en dos fases. Estas fases incluyen el diseño de una superficie deslizante y una ley de control discontinuo [17].

1. Diseño de superficie deslizante: la superficie deslizante puede tener una de las siguientes formas, según las especificaciones de diseño del controlador.

a) Polinomio de Hurwitz como superficie: la superficie deslizante (S) es un polinomio mónico y es una combinación lineal de los estados del sistema. Estas superficies se utilizan normalmente para fines de regulación (estabilización).

b) Seguimiento de superficie deslizante específica: la opción habitual, como superficie, para fines de seguimiento es el error, por ejemplo, $S = E = R - Y$, donde E es el

error, Y es la salida correspondiente del sistema subyacente y R es la señal deseada, trayectoria, ruta, etc., que se debe rastrear.

- c) Una consideración crítica en el diseño de una superficie deslizante es asegurar la existencia de modos deslizantes estables. En otras palabras, una superficie debe diseñarse de modo que cuando se complete la fase de alcance, las trayectorias del sistema se deslicen hacia el origen. Esta discusión produce la siguiente definición de modos deslizantes.

2. Diseño de la Ley de Control: La ley de control utilizada en los algoritmos SMC es generalmente una función de retroalimentación discontinua de los estados del sistema. Esto debe diseñarse de modo que la fase de alcance se realice en un tiempo finito y las trayectorias del sistema se limiten a la superficie y mantenga el rendimiento deseado.

1.4.2. Superficie de deslizamiento

Existen múltiples propuestas para determinar la superficie de deslizamiento y en general puede ser cualquier función del estado tal que el error de regulación o seguimiento se haga cero en régimen permanente. Que comprenda una superficie, conocida como superficie de deslizamiento, en el espacio de estados. $S(x)$ tal que $S(x) = 0$ Por simplicidad consideraremos lo siguiente:

$$S(x) \cong x_i - k = 0 \quad (1.3)$$

Donde x_i es una de las variables de estado del sistema y k es una constante de tipo real, tal que en régimen permanente x_i llegue a ser el valor deseado k . En muchos sistemas no basta que se siga una sola consigna en una variable de estado y $S(x)$ debe considerar todas las variables de estado, o formas más complejas. Suelen usarse hiperplanos (combinaciones lineales de las

variables de estado) como superficies.

$$S(x) \cong \sum_i k_i x_i - k = 0 \quad (1.4)$$

1.4.3. Regimen deslizando

La idea básica del control por modo deslizando consiste en llevar las trayectorias del sistema sobre una variedad o superficie de deslizamiento y forzarlas a evolucionar sobre ella. Así, el comportamiento dinámico del sistema en estas condiciones queda determinado por las ecuaciones que definen dicha superficie en el espacio de estados. De este modo, plasmando los objetivos de control en tales ecuaciones mediante un diseño adecuado de las mismas, es posible lograr la estabilización del sistema, el seguimiento de referencias y la regulación de variables.

1.4.4. Estabilidad en el sentido de Lyapunov

La teoría de estabilidad juega un rol central en teoría de sistemas e ingeniería. En sistemas dinámicos existen distintos tipos de problemas de estabilidad. La estabilidad de puntos de equilibrio generalmente se caracteriza en el sentido de Lyapunov, un matemático e ingeniero ruso que estableció las bases de la teoría que hoy lleva su nombre. Un punto de equilibrio se dice estable si todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en las cercanías del punto de equilibrio; de otro modo el punto de equilibrio es inestable. Un punto de equilibrio se dice asintóticamente estable si todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto de equilibrio no sólo permanecen en las cercanías del punto de equilibrio, sino que además tienden hacia el equilibrio a medida que el tiempo se aproxima a infinito. Análisis de Lyapunov: la teoría de Lyapunov es la herramienta más poderosa para el análisis de sistemas no lineales. El análisis de Lyapunov se usa de dos maneras, a saber, Método directo y Método indirecto. El método indirecto proporciona la estabilidad de un sistema no lineal en la vecindad de un punto operativo mediante el uso de técnicas de control lineal. El método directo

utiliza el concepto de energía para reclamar la estabilidad. Una desventaja es que encontrar una función similar a la energía para un sistema específico es una tarea difícil.

1.4.5. Candidato del Lyapunov

Una función $V(x)$ que cumple con las condiciones impuestas en el método directo de Lyapunov, se denomina “función de Lyapunov“. La cual consiste en hacer una función escalar positiva de la ecuación (1.5), para las variables de estado del sistema y luego elegir la ley de control que disminuirá esta función [18]

$$\dot{V}(x) < 0 \quad \text{con} \quad V > 0 \quad (1.5)$$

de manera general la función candidata de Lapunov puede considerarse como:

$$V(x) = \frac{1}{2}s(x, t)^2 \quad (1.6)$$

entonces, la derivada de esta función anterior es negativa cuando se verifica la siguiente expresión:

$$s(x, t)\dot{s}(x, t) < 0 \quad (1.7)$$

Este método es una herramienta de análisis muy poderosa. Sin embargo, presenta dos desventajas. La primera es que no hay un método sistemático para hallar una función de Lyapunov por lo tanto hay que proponer una función candidata a función de Lyapunov y probar si la misma cumple con los requisitos de estabilidad. La segunda es que el teorema solo brinda condiciones suficientes por lo tanto el hecho de no encontrar una función candidata a Lyapunov que satisfaga las condiciones de estabilidad o de estabilidad asintótica no significa que el origen es inestable o asintóticamente estable.

1.4.6. Chattering

No existe un modo de deslizamiento ideal en la práctica, ya que implicaría que el control conmute a una frecuencia infinita. En presencia de imperfecciones de conmutación, como

retrasos en el tiempo de conmutación y pequeñas constantes de tiempo en los actuadores, la discontinuidad en el control de retroalimentación produce un comportamiento dinámico particular en las proximidades de la superficie, lo que comúnmente se conoce como chattering.

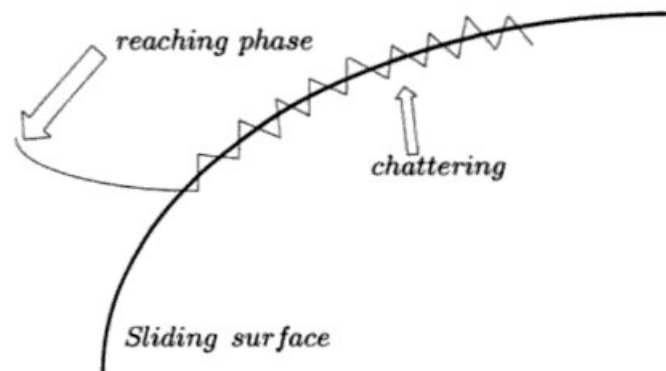


Figura 1.2: Representación Chattering

Este fenómeno es un inconveniente ya que, incluso si se filtra a la salida del proceso, puede excitar modos de alta frecuencia no modelados, lo que degrada el rendimiento del sistema e incluso puede provocar inestabilidad. El chattering también provoca un alto desgaste de las piezas mecánicas móviles y grandes pérdidas de calor en los circuitos de energía eléctrica. Es por eso por lo que muchos procedimientos han sido diseñados para reducir o eliminar este chattering. Uno de ellos consiste en un esquema de regulación en alguna vecindad de la superficie de conmutación que, en el caso más simple, consiste simplemente en reemplazar la función de signo por una aproximación continua con una alta ganancia en la capa límite: por ejemplo, funciones sigmoideas o funciones de saturación como se muestra en la Figura 1.3. Sin embargo, aunque se pueden eliminar las vibraciones, la robustez del modo deslizante también se ve comprometida [19].

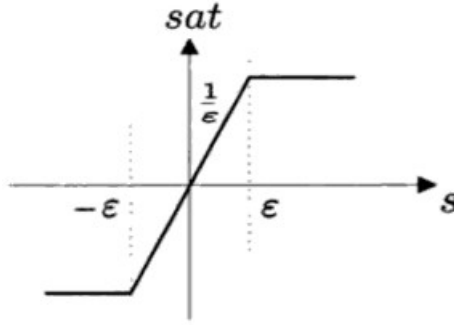


Figura 1.3: Función Saturación

1.4.7. Condición de Alcanzabilidad

Este paso del proceso de diseño trata con la prueba matemática de la existencia de modos deslizantes en el régimen deslizante, definido anteriormente, con la aplicación del controlador discontinuo. Esto se puede afirmar de manera equivalente si se logran o no los modos deslizantes, dinámica $S = 0$, es decir, se logra la fase de alcance. La propiedad que se busca en un sistema de control es la posible existencia de modos deslizantes en las superficies de discontinuidad de la estructura. Si la trayectoria del sistema alcanza las proximidades la superficie de deslizamiento en la que existe un modo deslizante, el movimiento ya no se alejará de la región excepto posiblemente en las fronteras de la región. Por ejemplo, supongamos que en un sistema de estructura variable de segundo orden existe un modo deslizante en $S(x)$. Entonces, las trayectorias que alcanzan la región de deslizamiento $S(x)$ permanecen sobre $S(x)$ excepto si llegan a los extremos de la superficie de deslizamiento, donde, posiblemente puedan escapar de la región. Una condición necesaria y suficiente para alcanzar la superficie viene dado por la siguiente ecuación

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \nabla s, f_a^+ \rangle < 0 \\ \langle \nabla s, f_a^- \rangle > 0 \end{array} \right\} \quad (1.8)$$

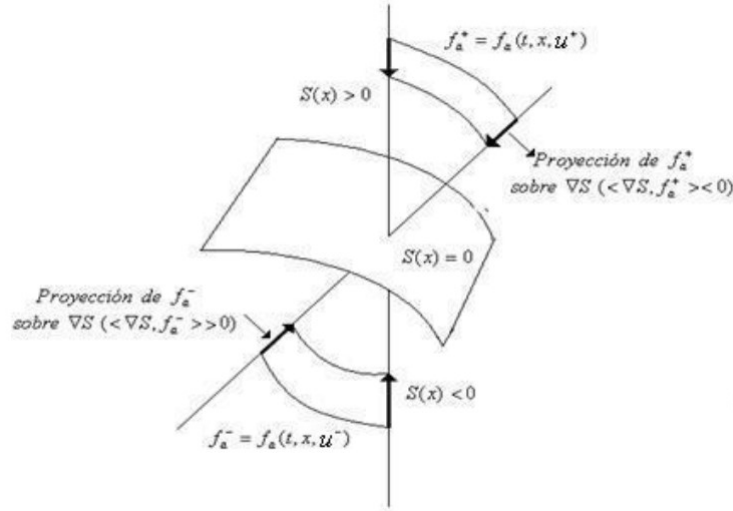


Figura 1.4: Condición de alcanzabilidad de un sistema en modo deslizante

1.4.8. Condición de Estabilidad

Además de la condición de existencia, la acción de control y los coeficientes deslizantes deben diseñarse para cumplir con la condición de estabilidad. Esto es para garantizar que, en caso de operar en la fase de deslizamiento, el colector de deslizamiento deseado siempre dirigirá la trayectoria hacia un punto de equilibrio estable. Si no se logra esto, se generará un sistema de modo deslizante inestable. La figura (a) muestra la trayectoria de un sistema bajo operación en modo deslizante que se estabiliza en el punto deseado de equilibrio O cuando se cumple la condición de estabilidad, y la figura (b) muestra la misma trayectoria que el paso de movimiento O cuando no se cumple la condición de estabilidad.

La trayectoria S se mueve sobre el régimen deslizante y (a) converge al punto deseado de equilibrio “ O ” cuando se cumple la condición de estabilidad, y (b) pasa y no se detiene en el punto deseado de equilibrio “ O ” cuando no se cumple la condición de estabilidad. En general, la estabilidad de un sistema se obtiene asegurando que los valores propios de los jacobianos del sistema en la región de estado estacionario tengan partes reales negativas [20].

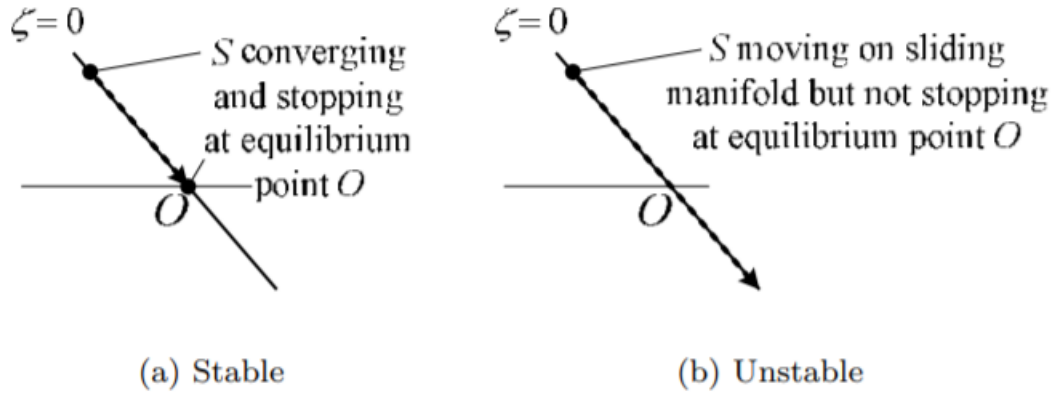


Figura 1.5: Condiciones de estabilidad

1.4.9. Función de histéresis

La implementación del control en modo deslizante través de la función de histéresis no requiere computación adicional o circuitos auxiliares, y su implementación se logra fácilmente mediante la ley de control dada por:

$$u(t) = \begin{cases} U^+, & \text{si, } S(x,t) > \Delta \\ U^-, & \text{si, } S(x,t) < -\Delta \\ \text{Previous state} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1.9)$$

donde Δ es un valor arbitrariamente pequeño. La introducción de una banda de histéresis con las condiciones de contorno $S = \Delta$ y $S = -\Delta$ proporciona una forma de control a la frecuencia de conmutación del sistema, resolviendo así el problema práctico de la operación de conmutación de muy alta frecuencia ya que el período de tiempo para el intercambio de estados ahora.

Como resultado, la trayectoria S del sistema operará precisamente en las proximidades de " $\pm \Delta$ " de la región de deslizamiento con una oscilación controlada como se ilustra en la Figura 1.7. El efecto de chattering ahora se vuelve controlable y es una función de " Δ ".

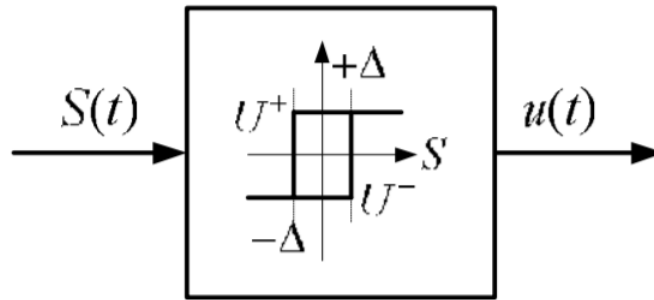


Figura 1.6: Función de histéresis en el control en modo deslizante

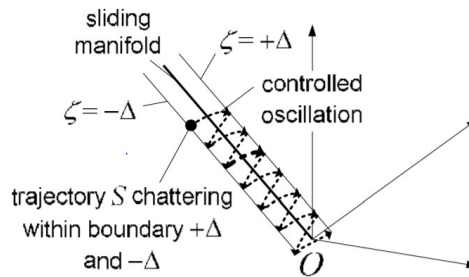


Figura 1.7: Trayectoria en modo deslizante con la función de histéresis

1.5. Muestreo

El muestreo de datos es esencial para la implementación digitalizada de estrategias de control. El muestreo periódico de datos resume los sistemas de tiempo continuo en instantes de tiempo aritméticos predeterminados, y ha desempeñado un papel central en la fructífera literatura de control de datos muestreados. Dado que todos los intervalos de muestreo deben ser iguales y lo suficientemente pequeños como para garantizar el rendimiento del "peor de los casos", el control periódico de los datos muestreados puede no ser rentable para los sistemas sujetos a restricciones de información. Esto, hasta cierto punto, motiva la última ola de interés de investigación en el control desencadenado por eventos. Las aplicaciones específicas incluyen control de retroalimentación de relé, control de modulación de ancho de pulso, control de altitud de satélite, control basado en interrupciones, control de motor de combustión interna, y así sucesivamente.

1.5.1. Muestreo aperiódico

Una de las propiedades cruciales en el desarrollo de la teoría de control de datos muestreados es la periodicidad de los sistemas de circuito cerrado que proviene del muestreo periódico. De hecho, es razonable asumir el muestreo periódico en la implementación convencional de los sistemas de datos muestreados. Sin embargo, nos encontramos con aplicaciones donde el muestreo periódico es casi imposible recientemente. Por ejemplo, los recursos para la medición y el control están restringidos en los sistemas de control en red y o integrados, por lo tanto, la operación de muestreo resulta aperiódica e incierta. Los sistemas con muestreo aperiódico pueden verse como sistemas de retardo de tiempo, sistemas híbridos, interconexiones de entrada-salida, sistemas de tiempo discreto con parámetros que varían en el tiempo, etc.

1.6. Control manejado por eventos

El desarrollo reciente de la literatura ha evidenciado las nuevas oportunidades y los nuevos desafíos creados por el control activado por eventos, especialmente cuando los sistemas controlados involucran dinámicas no lineales e inciertas. Con respecto a la ventaja resultante en la resolución de problemas de control, el siguiente ejemplo muestra que, para algunos sistemas no lineales para los cuales el control periódico de datos muestreados solo puede prometer estabilización semi-global, el control activado por eventos logra la estabilización global.

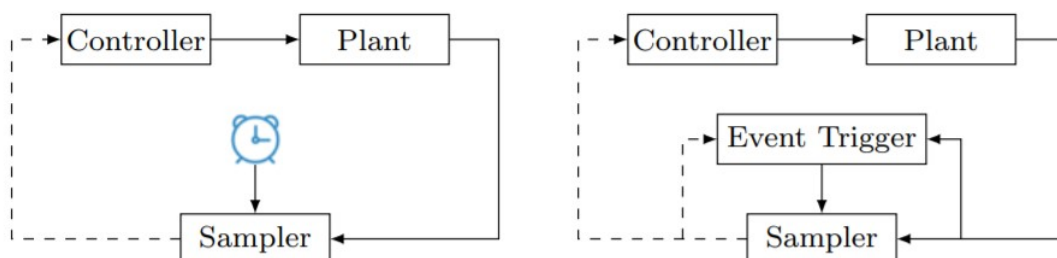


Figura 1.8: Muestreo periódico vs Muestreo disparado por evento

La activación de eventos generalmente requiere alguna forma de detector de eventos de

hardware para generar una interrupción de hardware para liberar la tarea de control. Esto se puede hacer utilizando circuitos integrados analógicos personalizados (ASIC) o procesadores de matriz de compuerta de punto flotante (FPGA). La activación de eventos proporciona una forma útil de ajustar adaptativamente los períodos de tareas en tiempo de ejecución, siempre que el costo asociado con el uso de hardware ASIC / FPGA sea aceptable. Sin embargo, en algunas aplicaciones, puede no ser razonable o poco práctico adaptar un sistema existente con tales "detectores de eventos". En estos casos, puede ser más apropiado utilizar un enfoque de software como el auto-disparado donde cada tarea determina la liberación de su próximo trabajo [21].

1.6.1. Control Auto-disparado

Una implementación auto-disparada de la ley de control de retroalimentación tiene como objetivo el cálculo de los valores del actuador, así como el cálculo del siguiente instante de tiempo en el que la ley de control debe ser recalculada. Según este paradigma, además de utilizar el estado actual para calcular el controlador, el estado actual también se utiliza para calcular el siguiente tiempo de ejecución del controlador. Para indicar las diferencias entre varias implementaciones digitales de leyes de control de retroalimentación, considere el control de la planta no lineal

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1.10)$$

con $x \in \mathbb{R}^{n_x}$ siendo la variable de estado y $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ la variable de entrada. El sistema está controlado por una ley de retroalimentación de estado no lineal

$$u = h(x) \quad (1.11)$$

El siguiente tiempo de ejecución se determina de manera proactiva en función del estado $x(t_k)$ medido en el tiempo de ejecución anterior. En particular, hay una función que especifica el

siguiente tiempo de ejecución como

$$t_{k+1} = t_k - M(x(t_k)) \quad (1.12)$$

con $t_0 = 0$. Como consecuencia, en el control autoactivado, tanto el valor de control $u(t_k)$ como el siguiente tiempo de ejecución t_{k+1} se calculan en el tiempo de ejecución t_k . Entre t_k y t_{k+1} , no se requieren más acciones del controlador. De la ecuación anterior $M(x(t_k))$ es estrictamente mayor que cero [22].

1.7. Sistemas de control en red (NCS)

El desarrollo de la tecnología de red en las últimas décadas ha hecho posible su aplicación a los sistemas de control. En los sistemas de control en red, los sensores, actuadores y controladores están conectados a través de una red de comunicación digital en tiempo real y de ancho de banda compartida limitada.

Para los sistemas de control en red, la activación de eventos se utiliza para decidir cuándo transmitir o difundir el estado del sistema a los elementos de un controlador local. El uso de eventos para desencadenar la comunicación en realidad proporciona una motivación mucho más fuerte para el control desencadenado por eventos. La razón de esto es que, en muchos casos, la energía o el costo asociado con la transmisión de un bit de información es mucho más que la energía asociada con el uso de ese bit para calcular la ley de control. El control manejado por eventos, por lo tanto, proporciona una forma realista de reducir la congestión del tráfico en las redes de comunicación utilizadas por un sistema de control en red [23].

Las teorías de control convencionales con muchos supuestos ideales, tales como control sincronizado, detección y actuación no retardada y ancho de banda ilimitado, deben reevaluarse antes de aplicarse a NCS. Mejorar las redes y protocolos de comunicación para aumentar la confiabilidad es una solución parcial. Por lo tanto, se deben desarrollar nuevos algoritmos de

control para hacer frente a las imperfecciones y restricciones de la comunicación, que se pueden resumir de la siguiente manera

1.7.1. Ancho de banda limitado

Cualquier red de comunicación solo puede transportar una cantidad finita de información por unidad de tiempo y esto puede tener un efecto severo en el sistema de control. En la mayoría de las redes digitales, los datos se transmiten en unidades atómicas llamadas paquetes. Los paquetes se pueden dividir en la carga útil (datos del usuario) y la información de control (encabezados) necesarios para la transmisión [24].

1.7.2. Retrasos de comunicación variables

La transmisión de un paquete de un nodo en la red a otro nodo no es instantánea y puede llevar una cantidad de tiempo variable que depende de condiciones de red muy variables como la congestión, la calidad del canal o el protocolo. Esto puede afectar el rendimiento del control de varias maneras. Primero, la información transmitida se retrasa. En segundo lugar, los retrasos pueden inducir intervalos de muestreo variables. Un número significativo de resultados ha intentado caracterizar un límite superior máximo en el intervalo de muestreo para el que se puede garantizar la estabilidad del sistema.

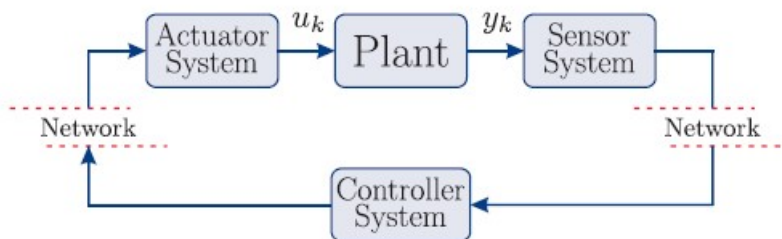


Figura 1.9: Estructura genérica de un sistema de control en red

Los sensores de la planta transmiten sus mediciones al controlador, y el controlador transmite los datos de control a los actuadores a través de una red compartida, posiblemente inalámbrica.

ca, para la cual los recursos de comunicación y energía son limitados. Por esta razón, es deseable reducir las transmisiones sobre los canales de sensor a controlador y de controlador a actuador tanto como sea posible, al tiempo que se garantiza un comportamiento de lazo cerrado deseable.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se presenta la obtención del modelo de control y la descripción de su matemática.

2.1. Deslizamiento básico

Considere el sistema lineal invariante en el tiempo representado por

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u \in \mathbb{R}^p$ es la señal de control, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz del sistema, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ representa la matriz de entrada y $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ es la matriz de salida

2.1.1. Ley de control

El proceso de diseño del controlador de modo deslizante tiene como objetivo determinar la posición del interruptor u con la forma

$$u(t) = \begin{cases} u = u^+ \Leftrightarrow s(x) > 0 \\ u = u^- \Leftrightarrow s(x) < 0 \end{cases}\tag{2.2}$$

Es decir, si las dinámicas del sistema se encuentran por encima de la región de deslizamiento, el control conmutará al valor con el fin de llevar las dinámicas del sistema hacia la

región de deslizamiento, en el caso contrario, si nos encontramos por debajo de la región de deslizamiento, el sistema de control conmutará al valor para llevar nuevamente la dinámica del sistema hacia la superficie de deslizamiento. En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento de la señal de control.

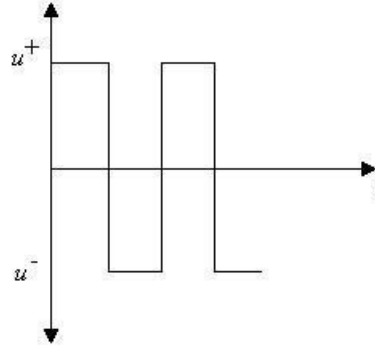


Figura 2.1: Señal del controlador en modo deslizante

2.1.2. Superficie de deslizamiento

Elegir a es una tarea de ensayo y error. Por ejemplo, agregando términos integrales o derivativos pueden obtenerse mejoras en la respuesta transitoria deseada. En general la superficie de deslizamiento está definida por:

$$S(x) = Kx \quad (2.3)$$

Con $K \in \mathbb{R}^{p \times n}$.

2.1.3. Candidato Lyapunov

En controlador en modo deslizante debe elegirse de tal manera que una función de Lyapunov candidata satisfaga el criterio de estabilidad de Lyapunov

Una función de Lyapunov para evaluar la estabilidad es:

$$V(x) = \frac{1}{2}S(x)^2 \quad (2.4)$$

Que es definida positiva

Para estabilidad $\dot{V}(x)$ tiene que ser definida negativa, por lo tanto

$$\dot{V}(x) < 0 \quad (2.5)$$

Tomando en cuenta la fórmula (2.4), el criterio de estabilidad de Lyapunov se simplifica a

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (2.6)$$

El cuál es la condición para la existencia del modo deslizante en una zona de la superficie $S(x) = 0$ Además, la condición de accesibilidad también juega un papel importante, rol porque garantiza que el modo deslizante $S(x) = 0$ sea alcanzado en tiempo finito desde cualquier estado inicial. Para valores escalares funciones de conmutación, una condición suficiente para alcanzar [25]

$$S(x)\dot{S} \leq -\mu|S(x)| \quad (2.7)$$

el cual es equivalente a

$$|S(x)| \geq \mu > 0 \quad (2.8)$$

cuando

$$\text{sgn}(S(x)) \neq \text{sgn}(\dot{S}(x)) \quad (2.9)$$

2.2. Enfoque integrado

Para aplicar técnicas de auto-disparado, se adopta el control de modo deslizante con histéresis. La función de un modulador de histéresis es garantizar una frecuencia de conmutación finita, que en una configuración de sistemas de control en red implica regular la cantidad de mensajes.

Para el enfoque adoptado en este documento, las actualizaciones de control se ven obligadas a tener lugar solo cuando la trayectoria alcanza la banda de histéresis. La ley de control en (2.2)

se puede redefinir para expresar la operación deseada como:

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x) = h \\ u^- & \text{si } S(x) = -h \end{cases} \quad (2.10)$$

donde h representa la banda de histéresis, con u manteniéndose constante entre actualizaciones de control consecutivas. Las actualizaciones de control solo tienen lugar cuando la trayectoria del sistema llega a la banda de histéresis opuesta (representada por círculos sólidos numerados como (1), (2), etc.). En cada banda de histéresis, la señal de control que se aplica también está representada por u^+ y u^- [26]. La Figura (2.2) también presenta la notación que se utilizará en el presente documento. En particular, la banda de histéresis superior se denota por $S^+(x) = S(x) - h$, y la banda de histéresis inferior por $S^-(x) = S(x) + h$.

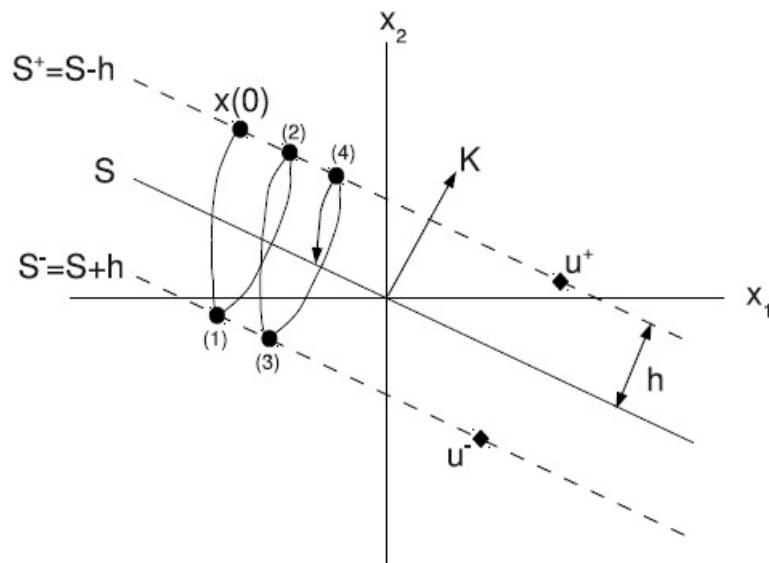


Figura 2.2: Operación deseada

2.3. Algoritmo de operación

Teniendo en cuenta el uso del enfoque auto-disparado en la configuración en red, la ecuación de control y la operación deseada que se muestra en la Figura (2.2) deben seguir los siguientes pasos:

1. Al estar en una banda de histéresis, digamos S^+ el nodo sensor muestrea la planta y envía la muestra al nodo controlador. El nodo del sensor también calcula el siguiente tiempo de activación, definido como el intervalo de tiempo que transcurrirá desde el momento actual hasta el momento en que la trayectoria del sistema alcanzará la banda de histéresis opuesta, S^- , y duerme hasta que este intervalo de tiempo termine.
2. El nodo controlador calcula la señal de control según lo ordenado por (2.10), en este caso $u = u^+$, y envía este valor al actuador.
3. El actuador aplica la señal de control a la planta.
4. Cuando el nodo sensor se despierta, la trayectoria del sistema está en S^- , y la operación del bucle de control comienza nuevamente en el paso 1.

Para lograr la operación deseada, se deben resolver varios problemas como la dirección deseada, accesibilidad de banda y la técnica de auto-disparo [27].

2.3.1. Pseudocódigo

Algorithm 1 Nodo sensor

Require: x_1, x_2

- 1: $(x_1, x_2) :=$ Sensor lee el estado de la planta;
 - 2: Calcula si se encuentra en S^+ o en S^- ;
 - 3: Calcula T_k tiempo de la siguiente muestra;
 - 4: Envía el mensaje al controlador (x_1, x_2, T_k) ;
 - 5: Se establece en 1 el siguiente segmento que se ejecuta en la función de código;
 - 6: El nodo sensor duerme hasta que el tiempo T_k expira;
-

Algorithm 2 Nodo controlador

Require: x_1, x_2, T_k

- 1: mientras (no haya mensaje del sensor) hacer (nada);
 - 2: $(x_1, x_2, T_k) :=$ leer el mensaje del nodo sensor
 - 3: **if** $S > 0$ **then**;
 - 4: $u :=$ envía el mensaje al actuador (u^+, t_k) ;
 - 5: **else**
 - 6: $u :=$ envía el mensaje al actuador (u^-, t_k) ;
-

Algorithm 3 Nodo actuador

Require: u, t_k

- 1: lee el mensaje del controlador
 - 2: Aplica la señal de control u
 - 3: $T_k :=$ tiempo de ejecución de u
-

2.4. Dirección deseada

Cada acción de control que ocurre en una banda de histéresis debe dirigir la trayectoria hacia la banda de histéresis opuesta. Esta condición, considerando la trayectoria del sistema a partir de la banda de histéresis superior e inferior respectivamente y considerando la dirección de K como se representa en la Figura (2.2), puede formularse como:

$$K\dot{x} \leq 0 \quad si \quad x \in S^+ \quad (2.11)$$

$$K\dot{x} \geq 0 \quad si \quad x \in S^- \quad (2.12)$$

2.5. Accesibilidad de banda

Desde cualquier estado perteneciente a una banda de histéresis, la banda de histéresis opuesta debe ser accesible. Usando la fórmula (2.8), esta condición se puede formular como:

$$\forall x_0 \in S^-, |\dot{S}^+(t, x_0)| \geq \mu \quad (2.13)$$

$$\forall x_0 \in S^+, |\dot{S}^-(t, x_0)| \geq \mu \quad (2.14)$$

2.6. Técnica de auto-disparado

Para aplicar una técnica de control auto-disparado se debe tomar en cuenta que desde cualquier estado que pertenezca a una banda de histéresis, el controlador debe poder calcular el

tiempo en el que la trayectoria alcanzará la banda de histéresis opuesta. Esta condición puede formularse como:

$$\forall x_0 \in S^-, t = f(\dot{S}^+(x), x_0) \quad (2.15)$$

$$\forall x_0 \in S^+, t = f(\dot{S}^-(x), x_0) \quad (2.16)$$

2.7. Directrices de implementación

2.7.1. Protocolo CAN

En un sistema de control en red CAN se basa en el mecanismo de comunicación de difusión, donde cada mensaje tiene un identificador, que es único dentro de toda la red. El identificador define el contenido y también la prioridad del mensaje. El número binario más bajo tiene la máxima prioridad. Los conflictos de acceso al bus se resuelven mediante el arbitraje en bits de los identificadores involucrados. Por lo tanto, las solicitudes de transmisión se manejan en orden de importancia para el sistema en su conjunto [27].

Nodos

Se definen tres tipos de nodos.

- Nodo sensor: toma muestras de la planta e intenta enviar esta información (estado de planta) sobre el bus.
- Nodo controlador: el nodo de controlador recibe un mensaje de muestra, calculará la señal de control (usando el estado de la planta) y enviarlo al actuador correspondiente.
- Nodo actuador: aplica la señal de control a la planta al recibir el mensaje de señal de control.

Mensajes

Tomando en cuenta esta regla se determina a los identificadores de mensaje de la siguiente forma:

- Todos los mensajes enviados por el nodo actuador tienen el nivel de prioridad más alto, debido a que estos mensajes disparan la acción de operación de cada lazo de control.
- Los mensajes enviados por el nodo sensor tienen el siguiente nivel de prioridad.
- Por último, los mensajes enviados por el nodo controlador tienen el ultimo nivel de prioridad.

Capítulo 3

Implementación y pruebas

En este capítulo, la teoría hasta ahora desarrollada es comprobada a través de ejemplos de simulación numéricos, específicamente se utilizará la plataforma de Matlab. Se describe tanto la metodología adoptada como las matemáticas utilizadas. Además, se explican y analizan las pruebas comparativas en relación a la utilización del procesador.

Capítulo 4

Proposed Work

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

In this work, a novel Scheme has been proposed and implemented. Rest of conclusion here.

Future work here.

Bibliografía

- [1] A. K. Behera y B. Bandyopadhyay. “Self-triggering-based sliding-mode control for linear systems”. En: *IET Control Theory Applications* 9.17 (2015), págs. 2541-2547.
- [2] Q. Yang, J. A. Barria y T. C. Green. “Communication Infrastructures for Distributed Control of Power Distribution Networks”. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7.2 (2011), págs. 316-327.
- [3] S. K. Mazumder, K. Acharya y M. Tahir. “Joint Optimization of Control Performance and Network Resource Utilization in Homogeneous Power Networks”. En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.5 (2009), págs. 1736-1745.
- [4] D. V. Dimarogonas, E. Frazzoli y K. H. Johansson. “Distributed Event-Triggered Control for Multi-Agent Systems”. En: *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), págs. 1291-1297.
- [5] M. Tahir y S. K. Mazumder. “Self-Triggered Communication Enabled Control of Distributed Generation in Microgrids”. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11.2 (2015), págs. 441-449.
- [6] N. Elia y S. K. Mitter. “Stabilization of linear systems with limited information”. En: *IEEE Transactions on Automatic Control* 46.9 (2001), págs. 1384-1400.
- [7] V. Utkin. “Variable structure systems with sliding modes”. En: *IEEE Transactions on Automatic Control* 22.2 (1977), págs. 212-222.
- [8] W. P. M. H. Heemels, K. H. Johansson y P. Tabuada. “An introduction to event-triggered and self-triggered control”. En: *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2012, págs. 3270-3285.
- [9] Tom Gommans y W.P.M.H. (Maurice) Heemels. “Resource-aware MPC for constrained nonlinear systems: A self-triggered control approach”. En: *Systems Control Letters* 79 (2015).
- [10] Yu Xinghuo y Xu Jian-Xin; *Variable structure systems: Towards the 21st Century*. Springer, 2002.
- [11] Katsuhisa Furuta. “Variable Structure System and Its Applications”. En: 2017, págs. 3-19.
- [12] M. Gokasan, S. Bogosyan y D. J. Goering. “Sliding mode based powertrain control for efficiency improvement in series hybrid-electric vehicles”. En: *IEEE Transactions on Power Electronics* 21.3 (2006), págs. 779-790.
- [13] P. Wu, W. Zhang y S. Han. “Self-triggered Nonsingular Terminal Sliding Mode Control”. En: *2018 Annual American Control Conference (ACC)*. 2018, págs. 6513-6520.
- [14] Zoran Vukić y col. *NONLINEAR CONTROL SYSTEMS*. New York: Marcel Dekker, 2003.

- [15] V. Utkin. *Sliding Modes in Control and Optimization*. Heidelberg: Springer, 1992.
- [16] V. Utkin, J. Guldner y J. Shi. *Sliding Mode Control In Electro-Mechanical Systems*. New York: CRC Press, 2009.
- [17] Liu Jianxing y col. *Sliding Mode Control Methodology in the Applications of Industrial Power Systems*. New York: Springer, 2019.
- [18] Vaidyanathan Sundarapandian y Chang-Hua Lien. *Applications of Sliding Mode Control in Science and Engineering*. Cham: Springer, 2017.
- [19] Perruquetti Wilfrid y Barbot Jean Pierre. *SLIDING MODE CONTROL IN ENGINEERING*. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [20] Siew Chong Tan, Yuk Ming Lai y Chi Kong Tse. *Sliding Mode Control of Switching Power Converters*. New York: Taylor Francis Group, 2012.
- [21] Xiaofeng Wang y Michael Lemmon. “State Based Self-Triggered Feedback Control Systems with L2 Stability”. En: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 17 (jul. de 2008). DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02577.
- [22] Heemelsa W.P.M.H.and Johansson Karl H. y Paulo Tabuada. *Encyclopedia of Systems and Control*. Londres: Springer, 2014.
- [23] Bemporad Alberto, Johansson Mikael y Heemels Maurice. *Networked Control Systems*. Springer, 2010.
- [24] Guinaldo Losada María. *Contributions to Networked and Event-Triggered Control of Linear Systems*. Madrid: Springer, 2016.
- [25] Hansruedi Bühler. *Réglage par mode de glissement*. Lausanne: Presses Polytechniques Romandes, 1986.
- [26] P. Martí y col. “Networked sliding mode control of the double integrator system using the event-driven self-triggered approach”. En: *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2011, págs. 2031-2036.
- [27] M. Velasco y col. “A CAN Application Profile for Control Optimization in Networked Embedded Systems”. En: *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. 2006, págs. 4638-4643.