

The logo for Cartagena99, featuring the word 'Cartagena99' in a stylized, green, cursive font. The text is set against a background of a blue and orange abstract shape that resembles a stylized 'C' or a flame.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica Industrial

CONTROL DE ESTRUCTURA VARIABLE

DR. BASIL M. AL-HADITHI

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Introducción

- En este capítulo se comienza realizando una descripción de la evolución histórica de la Teoría de Control. En la sección 2 se realiza una breve introducción al Control de Estructura Variable (VSC, Variable Structure Control) con Modos Deslizantes (SM, Sliding Mode).
- A continuación se presentan las propiedades del VSC-SM por las que ha tenido tanto éxito. En el apartado 4 se explican los pasos a seguir para diseñar el VSC-SM. Finalmente, en el último apartado se mencionan los trabajos que tratan de reducir o evitar el ruido continuo.

2

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tema: Introducción

VSC-SM.

de Estructura Variable (VSC) con modos deslizantes por la facilidad con la que se trata no linealidades e sistemas de control.

ceptibles de aplicar la teoría del VSC se tienen: sistemas con retraso, sistemas de gran escala, sistemas

ón principal, que es la estabilización de sistemas, las emenzan a aplicarse al control de sistemas de seguimiento al óptimo y al control adaptativo.

3

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



- El control VSC con el modo deslizante (SM, Sliding Mode) fue propuesto y elaborado por primera vez por [Emelyanov, 1967] y varios investigadores [Utkin, 1977], [España, 1984] donde era aplicado al control de una planta de proceso modelada en el plano de fases mediante un sistema lineal de segundo orden.
- No obstante, en sus inicios la teoría del VSC no atrajo mucha atención en aplicaciones industriales.
- La razón pudo ser doble: primero, las técnicas más populares de diseño de sistemas de control hicieron sombra al VSC; segundo, las propiedades importantes de robustez del VSC no se habían reconocido o apreciado entonces.

4

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
--
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

...rollos han incrementado en gran medida la atención [93]. El primero la existencia de un método general de temas complejos.

...cimiento total de la robustez perfecta del VSC con ...aciones. Como resultado, la investigación y el ...rado en los campos teóricos y de aplicaciones.

...una larga historia de investigación y desarrollo, el VSC ... un método general de control. Su viabilidad es cada ... los profesionales del control, aunque quedan todavía ...ar.

5

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- El VSC resulta muy atractivo para los ingenieros de control, ya que sus conceptos básicos son fáciles de comprender y ha dado un rendimiento satisfactorio en muchas áreas prácticas de la electrónica industrial.
- El VSC es aplicable a muchos sistemas de control donde no están bien desarrollados otros métodos de diseño.
- Aunque las contribuciones en el diseño y análisis teórico de sistemas con VSC continúan mejorando, resulta importante dirigir también la investigación experimental hacia toda clase de problemas industriales. Los resultados de estos estudios mejorarán indudablemente la confianza de los ingenieros en el uso del VSC [Hung, 1993].

6

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

... el SM como una continuación del VSC y el método de autovalores, porque en el método del modo deslizante los autovalores siguen la ecuación de línea de conmutación $s(x)=0$.

... uso de asignación de los autovalores, pero la diferencia es que el modo deslizante es sólo aplicable a sistemas lineales y que los autovalores dependen de los parámetros del sistema a controlar; en el SM es insensible a variaciones en los parámetros del sistema original.

... el modo deslizante (SM, Sliding Mode) es de interés reciente [Itkis, 1976], debido al progreso de la microelectrónica y de la potencia [Utkin, 1977], [Hung, 1993], [Itkis, 1976].

7

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

- Se ha implementado en aplicaciones de control de robots [Sabanovic, 1981] y control de motores, dando lugar a la publicación de muchos estudios teóricos [Hung, 1993].

4. Fundamentos y Características del VSC-SM.

Figura 1. Control de Estructura Variable.

8

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUOLA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL

generalmente en el plano de fases. La ley de control de estructura variable cambia cuando su estado cruza el eje \dot{x} , del que se hablará posteriormente.

El control se elige de forma que K cambie entre valores positivos y negativos para cada estructura del sistema en cadena cerrada y en consecuencia se obtienen trayectorias diferentes de las que se podría esperar de K fijo.

Se muestra un ejemplo de dos tipos de trayectorias que se obtienen en un sistema de segundo orden.

9

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUOLA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL

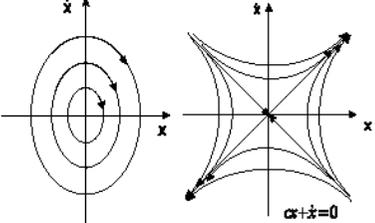


Figura 2. Planos de fase para dos valores de k distintos.

10

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

...a cómo serían las trayectorias del sistema en cadena
 ...rvar que ésta constaría de trozos de las trayectorias de
 ...ue tiene lugar la conmutación.

...cadena cerrada.

11

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- Precisamente el control VSC se basa en guiar la trayectoria de estado del sistema hacia un plano prefijado y en forzarla a deslizar sobre dicho plano mediante conmutaciones entre las estructuras resultantes de aplicar un control discontinuo.
- El plano deslizante o función de conmutación $S(X)$ pasa por el origen del plano de fase, y este punto representa el punto de estabilidad asintótica absoluta. De modo que el forzar al estado del sistema a 'deslizar' sobre dicho plano de conmutación tiene una doble función:
 - O Primero, obligar a la salida del sistema a dirigirse al origen del plano de fase.
 - O Segundo, prefijar la característica de la respuesta transitoria del sistema.

12

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

de diseño incluyen la selección de las funciones, esto es, la elección de sus parámetros. Implementa un control discontinuo que asegura la existencia en cada punto del plano deslizante $S(X) = 0$.

del VSC constan de dos condiciones: la condición de deslizante. En la primera, el objetivo es llegar al plano de modo finito desde cualquier punto.

do no deslizante. La segunda parte se denomina el modo no deslizante, el cual la trayectoria tiende asintóticamente al origen en función de los parámetros de la función de conmutación. El comportamiento final del sistema durante el modo deslizante.

13

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- Se pueden observar cuatro características del sistema de estructura variable:
- Como el origen del espacio de estados representa el estado de equilibrio del sistema, el SM representa el comportamiento del mismo durante el periodo transitorio. En otras palabras, la superficie que describe $S(x) = 0$ define la respuesta transitoria del sistema durante el SM.
- Durante el SM, las dinámicas de la trayectoria son de un orden menor que el orden del sistema original.

14

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

...ica de la trayectoria está gobernada solamente por los
 en la función deslizante.

...a que no es inherente a ninguna de las estructuras de

...can los pasos a seguir para diseñar un VSC-SM para un
 mo y de r entradas.

15

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

- **Procedimiento de Diseño de un VSC-SM.**

Se considera el diseño de un VSC con SM [Emelyanov, 1967], [Utkin, 1977], para un sistema de la siguiente forma:

[Eq.1] $\dot{x}_i = x_{i+1} \quad i = 1, \dots, n-1$
 $\dot{x}_n = -\sum_{i=1}^n a_i x_i - f(t) - u$

siendo:

u la acción de control
 a_i constantes.

16

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

de conmutación que se sigue en la propuesta por [Utkin, 1977]

$$c_i = const., c_n = 1 \quad [Eq.2]$$

de desigualdades son condiciones el modo deslizante exista

$$0 \quad y \quad \lim_{s \rightarrow +0} s < 0 \quad [Eq.3]$$

del SM con respecto a los parámetros $s=0$ para la variable X_n

17

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- y se sustituye en la ecuación 1. Las ecuaciones resultantes del SM son,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_{i+1} \quad i = 1, \dots, n-2 \\ \dot{x}_n &= -\sum_{i=1}^n c_i x_i \end{aligned} \quad [Eq.4]$$

- Las cuales dependen sólo de los parámetros c_i [Emelyanov, 1957].

18

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

basado en la propiedad de invarianza es el siguiente:

ado se construye mediante elección de los parámetros

ue un control discontinuo que garantiza la existencia de es en todos los puntos del plano s=0, también

e control debe dirigir el estado del sistema al plano explicar a continuación.

19

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- Se supone que la acción de control es una función lineal por tramos de x con coeficientes discontinuos [Utkin, 1977]

$$u = -\sum_{i=1}^n \psi_i x_i - \delta \operatorname{sgn} s, \quad 1 \leq k \leq n-1$$

$$\psi = \begin{cases} \alpha & \text{si } x_i s > 0 \\ \beta_i & \text{si } x_i s < 0 \end{cases} \quad \operatorname{sgn} s = \begin{cases} +1 & \text{si } s > 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases}$$

[Eq.5]

$\alpha_i, \beta_i, \delta_0 - \text{const.}$

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

En 3, está claro que las condiciones para que el modo deslizante exista

$$c_i a_n \quad i = 1, \dots, k, c_0 = 0 \quad [\text{Eq.6}]$$

$$c_i a_n \quad i = k + 1, \dots, n -$$

21

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

6. Reducción del Ruido Continuo.

- Una de las características del diseño y análisis de sistemas de vsc es que la acción de control puede conmutar de un valor a otro de forma infinitamente rápida.
- sin embargo, en sistemas prácticos, el ruido continuo es indeseable, porque es imposible conseguir el control de alta conmutación necesario en la mayoría de diseños de vsc, debido a muchas razones.
- una de ellas es la existencia de un retraso en el cómputo de control. la segunda razón es la limitación de los actuadores físicos.
- El ruido continuo siempre ocurre en los modos deslizantes y en régimen permanente.
- En régimen permanente, el ruido continuo aparece como una oscilación de alta frecuencia alrededor del punto deseado de equilibrio y puede resultar una fuente de excitación de las dinámicas de alta frecuencia del sistema no modeladas [Flugge-Lotz, 1959], [Kwantny y Young, 1987] y [Slotine y Li, 1991].

22

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- Existen distintas aproximaciones para eliminar el ruido continuo. En varios diseños del VSC, el control tiene términos similares a un relé. Las propiedades ideales de un relé son casi imposibles de conseguir. Por ello un enfoque para reducir ruido continuo es reemplazar el relé por una saturación (aproximación continua [Slotine y Li, 1991]).
- Otro enfoque es el de [Li, 1997] y [Slotine y Li, 1991] , que sugirieron añadir una capa límite alrededor de la superficie de conmutación para alisar la discontinuidad del control como se ve en la figura 2.5.
- Dentro de esta capa el control se elige para ser una aproximación continua de la función de conmutación.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

23

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Otro método de continuación reemplaza el control [Ambrosino et al., n.d], [Brierley y Longchamp, 1990]

$$u = \frac{c^T x}{|c^T x|} \quad \text{por} \quad u = \frac{c^T x}{|c^T x| + \delta}$$

siendo δ una constante positiva que hace que el control sea continuo.

- Los enfoques de continuación eliminan el ruido continuo de alta frecuencia a cambio de perder la invarianza.

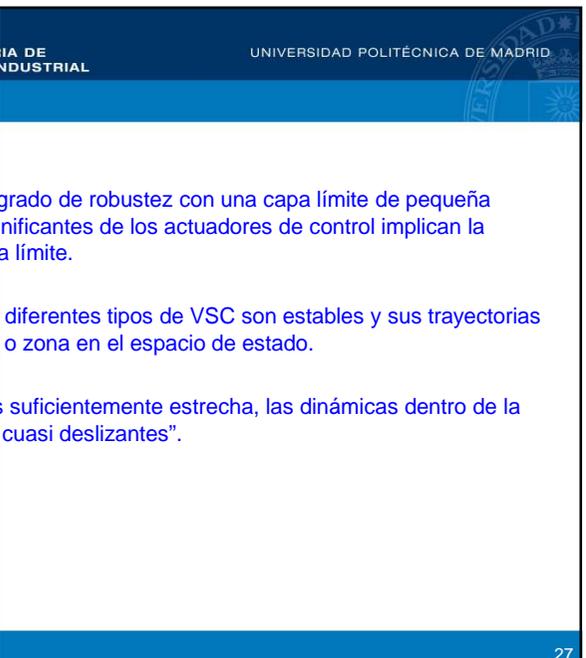
26

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, cursive font. The text is set against a background of a light blue sky with a white cloud and a yellow and orange sunburst or arrow shape pointing upwards.A slide from the Universidad Politécnica de Madrid. The header includes 'IA DE INDUSTRIAL' and 'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID' with the university's seal. The main text discusses the robustness of VSC systems, mentioning that different types are stable and their trajectories are within a specific state space zone. It also notes that if the zone is sufficiently narrow, the dynamics are 'quasi-sliding'. The slide number '27' is in the bottom right corner.

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

grado de robustez con una capa límite de pequeña
nificantes de los actuadores de control implican la
a límite.

diferentes tipos de VSC son estables y sus trayectorias
o zona en el espacio de estado.

s suficientemente estrecha, las dinámicas dentro de la
cuasi deslizantes".

27

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

--

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**