

## Identificación y diseño del controlador para un sistema de control de actitud de un satélite.

Danilo Cárdenas, María José Caicedo, Martín César Ing.  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación.  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
{dafacard, aleomech, cmartin}@espol.edu.ec

### Resumen

Esta tesis busca resaltar la importancia de corregir los desplazamientos que pueden experimentar los satélites en órbita, debido a la influencia de diversos agentes tanto propios de su funcionamiento como aquellos generados por el entorno en el que operan, es por esto que la técnica de identificación de sistemas debe ser presentada como una opción bastante útil gracias a las herramientas de análisis que proporciona.

El punto clave del trabajo será desarrollar una identificación del sistema para obtener una representación fiel de la planta. De esta manera cuando se desee probar nuevas alternativas de funcionamiento, no será necesario trabajar sobre la planta real y en su lugar se podrá trabajar sobre un proceso simulado, evitando así posibles deterioros o pérdidas de tiempo de producción.

Nuestro objetivo es trasladar los conceptos al escenario de la problemática que ya definimos. Todo lo antes expuesto se verá reflejado en la entrada que habremos diseñado, la cual formará parte del sistema que será identificado no-paramétricamente con esto tendremos una noción bastante clara de cómo se comportará nuestra planta en relación a posibles perturbaciones.

Por último aplicamos la identificación paramétrica a la entrada escogida y sus datos generados como salida eligiendo un modelo simple y preciso para en el capítulo final elegir el tipo de controlador que permitirá mejorar parámetros específicos de nuestra planta ya identificada.

**Palabras Claves:** *Actitud de satélite, identificación de sistemas.*

### Abstract

This thesis seeks to highlight the importance of correcting the displacement may experience orbiting satellites, due to the influence of various actors, both typical of his performance as those generated by the environment in which they operate, which is why the identification technique systems must be presented as an option quite useful because the analysis tools it provides.

The key point of the work is to develop a system identification to obtain a faithful representation of the plant. This way when you want to try new ways of operation, you will not need to work on the real plant and instead can work on a simulated process, thus avoiding possible damage or loss of production time.

Our goal is to translate the concepts to the stage of the problem that we defined. All the above will be reflected in the input that we will have designed, which form part of the system to be identified nonparametrically with this we have a fairly clear notion of how our plant will behave in relation to potential shocks.

Finally we apply the parametric identification of the selected input and output data generated as choosing a simple and accurate model for the final chapter choose the type of driver that will improve our plant-specific parameters already identified.

## I. INTRODUCCION

Dentro de la ingeniería existe gran cantidad de procesos complejos con todo tipo de dinámicas que dificultan su comprensión, es por esto que el Control Automático tiene como premisa principal explicar la dinámica de un sistema mediante un modelo matemático, para esto se toma como referencia datos de plantas reales que serán sometidos a técnicas de análisis tales como estimaciones, predicciones, etc. Conceptos que es necesario manejar para familiarizarnos correctamente con el tema de estudio son presentados a continuación:

- Actitud

Orientación del satélite con respecto al planeta Tierra.

- Señal

Fuerzas que afectan al satélite dependiendo del entorno o mecanismo de funcionamiento.

- Sistema

Todos aquellos componentes que en conjunto constituyen un mecanismo con un fin específico.

- Unidad de Control

Componente utilizado para incrementar el rendimiento del sistema identificado.

Una de las características más importantes de la aplicación de esta técnica de identificación a procesos reales que pueden ser modelados matemáticamente se limita a dos presentadas a continuación.

**Escalabilidad:** Característica que permite incrementar la cobertura del análisis mediante la técnica de identificación.

**Índice de Complejidad:** Característica que permite al sistema un mejor análisis dentro del campo matemático y permite que su explicación sea más sencilla.

## 2. IDENTIFICACION DE UN SISTEMA DE CONTROL

A lo largo de los estudios hechos en nombre de la Ingeniería se han desarrollado una serie de procedimientos que no buscan más que simplificar el entendimiento de gran cantidad de procesos reales, esto utilizando como principal herramienta el modelamiento matemático de los mismos.

Para obtener los resultados deseados luego de la identificación, tener la problemática del sistema comprendida a detalle es fundamental. Adicional a esto tener completo conocimiento de los conceptos en los que se basa el estudio del comportamiento de un satélite es muy importante.

Dentro de la identificación de sistemas existen etapas que direccionan su aplicación, presentadas a continuación:

- Definición del sistema a Identificar
- Diseño de planta simulada
  - Diseño de señal de entrada
  - Selección de estructura del modelo
  - Estimación de parámetros
- Validación del modelo identificado
- Diseño del experimento y ejecución.

## 3. ESTABLECIEMINTO DE LA DINÁMICA DEL SATÉLITE.

Principios básicos como el de Nyquist, ecuaciones de movimiento de Euler entre otros, es necesario manejar con la identificación de sistemas.

La dinámicas de orbitas de un satélite tienen primero la clásica orbita Kepleriana, también hay que analizar las diferentes fuerzas que tienden a perturbar las orbitas Keplerianas ideales, la influencia de estas fuerzas se aplican a una órbita geoestacionaria, ya que en este tipo de órbita hay que mantener una posición orbital estable y estas fuerzas perturban su estacionalidad.

En el control de actitud hay que revisar sus conceptos de dinámicas y establecer un control sobre la energía cinética angular, impulso angular y movimientos relacionados al centro de masa que se basan en las ecuaciones de movimiento de Euler.

Los ángulos de Euler se definen como los ángulos rotacionales respectivos a los ejes del cuerpo de la siguiente manera:

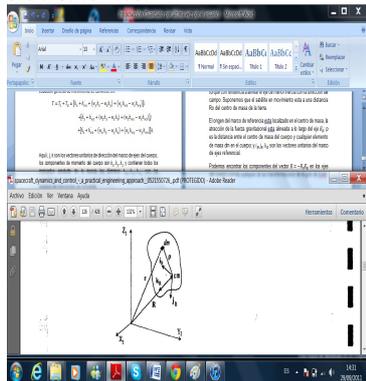
- $\gamma$  Para el eje Xb

- $\theta$  Para el eje Yb

- $\varphi$  Para el eje Zb

- Antes de que podamos escribir las ecuaciones de dinámica de actitud linealizadas, debemos expresar y analizar un importante momento externo, el cual se denomina momento gravitacional. Dicho momento es propio de

satélites de órbita baja, y no pueden ser obviados cuando tratamos control de actitud pasivo de satélites.



• **Figura 1 – Coordenadas del Sistema**

- Como es conocido existente res ejes sobre los cuales se establece la ubicación de un cuerpo en el espacio, pero para la identificación de este sistema nos enfocaremos en el eje Yb del satélite en mención.
- Siendo la actitud de un satélite la orientación del mismo con respecto a la Tierra, su aplicación varía según el tipo de satélite.
- En vista de que nuestro análisis se enfocara en la actitud de un satélite es necesario dejar claramente diferenciadas las ecuaciones para el movimiento de actitud de un satélite giratorio y uno no-giratorio.
- Asimismo es necesaria la linealización de dichas ecuaciones ya que los cálculos matemáticos con variables de alto grado dificultan la comprensión del análisis de identificación.
- La Place es una herramienta indispensable en este proceso ya que al pasar desde el dominio de tiempo al de la frecuencia el análisis de sistemas de control automático se hace posible.
- Dominio Del Tiempo
- 
- $\theta I_y + 3w_0^2 I_x - I_z \theta + w w I_w = T_{dy}$
- 
- Dominio de La Frecuencia
- 
- $\theta(S) = T_{dy} I_y S^2 + 3w_0^2 \sigma_y + S \theta_0 + \theta_0 S^2 + 3w_0^2 \sigma_y$
- Una vez aplicadas las ecuaciones del amortiguador a nuestro sistema la ecuación resultante es:

$$\theta(S) = \frac{S I_w T_{dy} / I_y + D T_{dy} / I_y}{I_w S^2 + D \left( \frac{I_w}{I_y} + 1 \right) S^2 + 3 I_w w_0^2 \sigma_y S + 3 D w_0^2 \sigma_y}$$

#### 4. IDENTIFICACION NO-PARAMETRICA

- Con los valores de las condiciones iniciales así



como las constantes tenemos:

- 
- 
- Una vez obtenido el modelo matemático de la planta a identificar el siguiente paso es la aplicación de las técnicas de identificación.
  - El proceso del diseño de la planta simulada se denomina proceso no-paramétrico y permite tener una idea mucho más precisa acerca del comportamiento que tendrá nuestro sistema una vez aplicada tipo de señal de entrada determinada.
  - Como lo mencionamos anteriormente nuestro análisis será dirigido específicamente al eje de rotación Yb puesto que los ejes Xb y Zb serán considerados fijos.
  - Como todo sistema un error es necesario para la correcta simulación, esto es necesario porque hace de este proceso una identificación mucho más cercana a la realidad.
  - Para realizar la elección de la señal de entrada más apropiada de nuestro sistema, el tipo de entrada seleccionada será la de tipo PRBS. Varios son los factores a considerar mencionados a continuación:
    - Tao alto, un bajo estimado de la constante de tiempo dominante
    - Tao bajo, un alto estimado de la constante de tiempo dominante
    - $\beta$  es un factor que representa el tiempo de establecimiento de un proceso
    - $\alpha$  es un factor que representa la velocidad de lazo cerrado como múltiplo del tiempo de respuesta en lazo abierto.
  - Sometiendo la planta virtual a una serie de procesos de prueba y error el tiempo aproximado de duración de la señal de entrada basados en los criterios de Nyquist.

$$\omega_n = \frac{\pi}{T}$$

- **Figura 2 – Criterio de Nyquist**
- Las limitantes de tiempo de duración de la señal de entrada a nuestro sistema son:

- $\tau_{min} \approx 185000[\text{seg}]$

- $\tau_{max} \approx 198000\text{seg}$

## 5. IDENTIFICACION PARAMETRICA

La identificación paramétrica con estimación de error de predicción sirve para identificar la función de transferencia y su orden, las estructuras de modelo de predicción de error son: ARX, ARMAX, FIR, Error Salida y Box-Jenkins.

- Todas estas técnicas de identificación tienen el objetivo de proporcionar al sistema un análisis más completo en base a mediciones de error así como también de comportamiento según su respuesta a la señal de entrada diseñada exclusivamente para este sistema de control.
- Lo que se busca es lograr encontrar el modelo más simple que tenga un ajuste adecuado para la elección de estructura final del modelo.
- Dentro de los modelos paramétricos más utilizados tenemos:

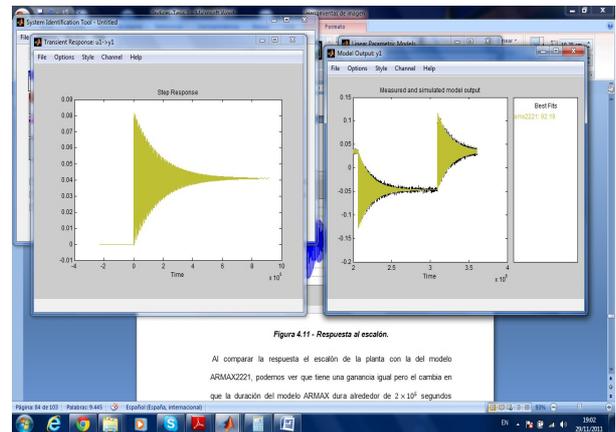
Modelo	$\hat{F}(z)$	$\hat{G}(z)$
ARMAX	$\frac{B(z)}{A(z)}$	$\frac{C(z)}{D(z)}$
FIR	$D(z)z^{-k}$	1
Box-jenkins	$\frac{B(z)}{A(z)}$	$\frac{C(z)}{D(z)}$
Output Error	$\frac{B(z)}{A(z)}$	1
ARX	$\frac{B(z)}{A(z)}$	$D(z)$

$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$   
 $B(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$   
 $C(z) = c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_p z^{-p}$   
 $D(z) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_q z^{-q}$   
 $y(t) = \hat{F}(z)u(t) + A(z)^{-1}e(t)$

• **Figura 3 – Modelos Paramétricos**

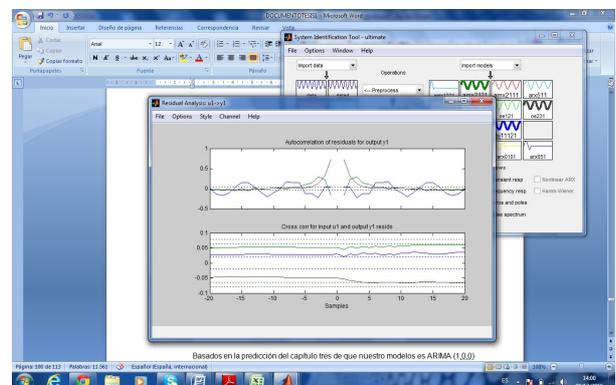
- Al realizar una estimación con todos los modelos antes mencionados y al compararlos tenemos que

FIR y ARX tienen una baja aproximación y para mejorarlo se necesita un orden más alto. Los modelos ARMAX, OE y Box Jenkins tienen la mayor aproximación, con un estimación de 94.38% para OE, 93.41% para Box Jenkins y 93.41% para ARMAX. En la respuesta al escalón el modelo ARMAX tiene una duración menor comparada con la respuesta al escalón propia de la planta.



• **Figura 4 – Respuesta al escalón modelo ARMAX**

• Uno de los análisis decisivos al momento de elegir un modelo paramétrico para nuestro sistema es el Análisis Residual.



• **Figura 5 – Resultado de análisis Residual**

- Basados en la predicción de que nuestro modelos es ARIMA (1,0,0) auto regresivo, y que de los tres mejores modelos BJ OE y ARMAX tengan similitud en todos los parámetros menos en los residuos donde solo el modelo ARMAX me asegura que no exista auto correlación de los residuos con la salida, por lo que la elección es del modelo ARMAX 2121.

## 6. DISEÑO DEL CONTROLADOR

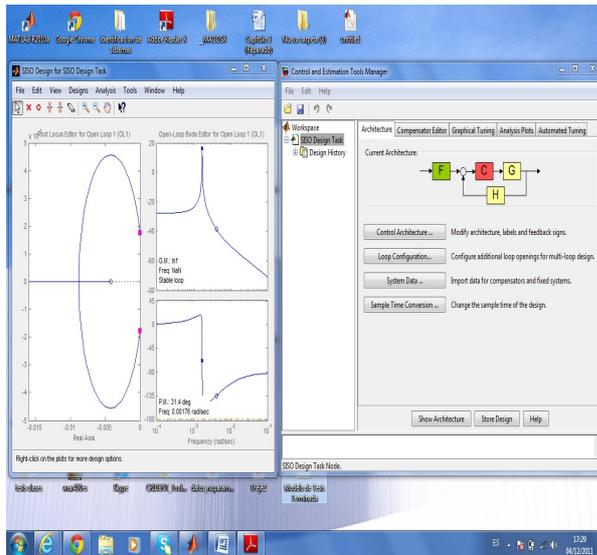
### 6.1. SISOTOOL Para El Diseño Del Controlador

- Ya analizado en el capítulo anterior un modelo adecuado para nuestro sistema, que es el

AMX2121 que nos da una muy buena aproximación.

- Llevamos el siguiente modelo discreto a MATLAB lo pasamos a continuo previo al análisis con SISOTOOL:
- `>> amrmx=d2c(amx2121);`
- `>> sisotool(amrmx)`
- 
- Se abrirá la siguiente ventana
- 

• **Figura 7 – Parámetros del controlador**

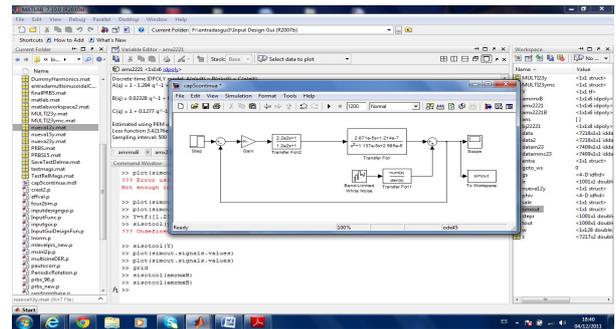
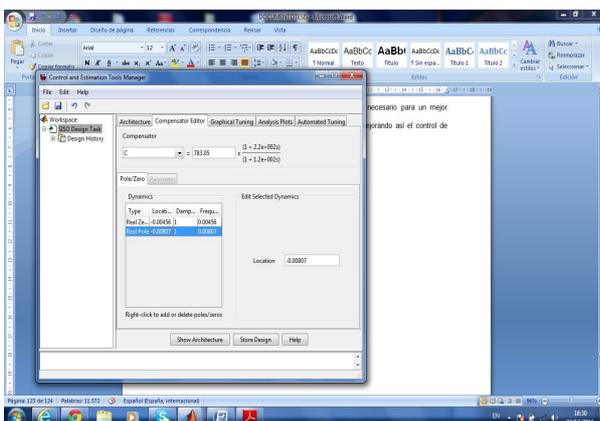


• **Figura 6 – Ventana de SISOTOOL.**

• Ambas ventanas nos muestran la trayectoria de las raíces, su respuesta de frecuencia y también el esquema del diagrama de bloques que se debe diseñar en lazo cerrado.

• Esta interfaz es muy amigable con el usuario, debido a que es un entorno gráfico y podemos diseñar nuestro controlador probando y corrigiendo, tanto modificando la trayectoria de las raíces agregando polos o ceros al controlador y cambiando su ganancia moviendo las raíces sobre las trayectorias.

## 6.2. ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR PID.

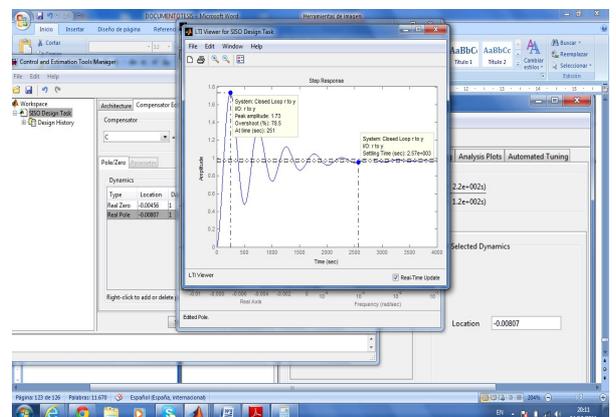


• **Figura 8 - Diagrama de bloques Simulink.**

• Como resultado la función de transferencia de nuestro controlador es la siguiente:

$$C = 783.051 + 2.2 \times 10^{10} S + 1.2 \times 10^{20} S^2$$

## • APLICACIÓN DEL CONTROLADOR A LA PLANTA REAL



• **Figura 9 – Respuesta al escalón de planta real con controlador.**

• La grafica resultante podemos ver una gran mejora en el tiempo de estabilización

comparada con la planta sin controlador, de aproximadamente 196000 a 2570 segundos haciéndola más rápida, su valor de sobre nivel porcentual a 78.5% que es menor aunque no está cercano al sobre nivel porcentual obtenido con el modelo identificado.

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

## 7. Conclusiones

- 

1. Realizar una identificación en sistemas reales implica grandes costos debido a los paros de producción que requiere la experimentación, por tanto, para fines académicos, es de gran ayuda trabajar con un modelo matemático base que represente la dinámica del proceso.

- 

2. Por medio de las pruebas realizadas con los diferentes modelos de estimación paramétrica, establecimos que el modelo "ARMAX" autorregresivo, media móvil con entrada externa de orden  $n_a=2$ ,  $n_b=1$ ,  $n_c=2$  y  $n_k=1$  considerado bajo y una aproximación de 93.41% nos da la mejor representación de identificación del satélite.

- 

3. Se demostró que el proceso de identificación nos ofrece una alternativa de mejora al reducir nuestro tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual en un 98.68% y 24.52% respectivamente. Esto nos permite hacer más eficiente el sistema de control de actitud de un satélite, demostrando que la aplicación de esta técnica no se limita a los procesos industriales.

- 

4. Mediante fórmulas se determinó que el período de muestro ideal para nuestro sistema satelital es de 752 segundos, pero tomando en cuenta que a mayor tiempo de muestreo obtendremos menor cantidad de datos para analizar, decidimos establecer que este periodo disminuya a 500 segundos, volviendo nuestro proceso más preciso y sencillo de aplicar.

- 

## 8. Recomendaciones.

- 
- 
- 

1. Para conseguir una coherencia de estimación, todos los pasos citados deben tratarse con el mismo orden. Descuidos en consideraciones de sus valores, provocarán falta de precisión en las respuestas del sistema así como comportamientos erróneos del modelo final.
2. Es necesario realizar la mayor cantidad de análisis posibles antes de escoger el modelo final siempre recordando el principal objetivo del proyecto que es proporcionar una descripción real del proceso.
3. Basado en análisis de residuos, análisis de las entradas-salidas, salidas-perturbaciones, análisis de estabilidad en base al criterio de polos y ceros, etc.).
4. Revisar datos de entrada-salida para asegurar que estos proporcionen información de la dinámica del sistema.

## 9. Agradecimiento

- 

• A nuestro director, el Msc. Cesar Martin, así como a las demás personas que han formado parte del seminario, con quienes hemos compartido esta emocionante experiencia de aprendizaje e investigación.

- 

- 

- 

## 10. Referencias

- 

(1) Marcel J. Sidi, 2000 "Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach", Cambridge Aerospace Series.

(2) James R. Wertz, 1978, "Spacecraft Attitude Determination and Control (Softback)", Kluwer Academic Publishers.

(3) Davies, 1970, W.D.T. System Identification for Self-Adaptive Control, Wiley-Interscience, London,

(4) Godfrey K. 1993, Perturbation Signals for System Identification, Prentice-Hall.

(5)Ljung, L. 1987, System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall, New Jersey.

(6)Ljung, L. and T. Glad, 1994, Modeling of Dynamic Systems, Prentice-Hall.

(7)Jenkins, G.M. and D.G. Watts. 1969, Spectral Analysis and Its Applications, Holden-Day, San Francisco.

•

•