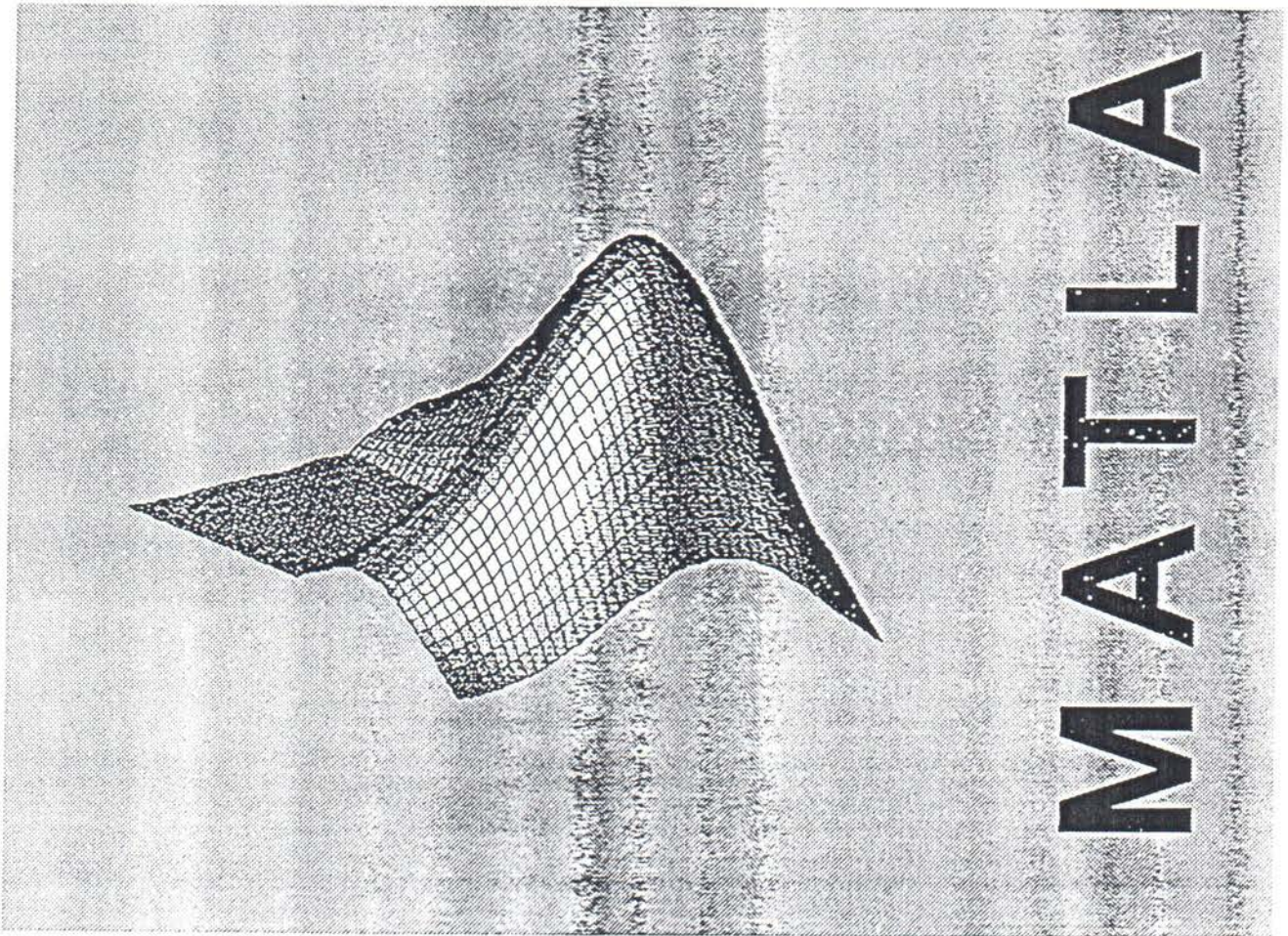


# II Congreso de usuarios de MATLAB

Madrid, 25, 26 y 27  
de Septiembre de 1996



Volumen II

ORGANIZAN



**Add Link**  
Software Científico



DPTO. DE INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

# SINTOLAB : UN DESARROLLO EN MATLAB PARA EL AJUSTE Y SUPERVISIÓN DE LAZOS DE CONTROL

F. Morilla, I. López, R. Hernández, S. Dormido  
Departamento de Informática y Automática. UNED  
Avda Senda del Rey s/n, 28040-Madrid  
Tel.: (91)3987156, Fax: (91)3986697, E-mail: fmorilla@dia.uned.es

## RESUMEN.

En este trabajo se presenta un desarrollo en MATLAB que se enmarca dentro del proyecto SINTOLAB. El desarrollo se ha llevado a cabo en el Departamento de Informática y Automática de la UNED a petición de los departamentos de control avanzado del grupo REPSOL. La herramienta ya ha sido probada en todas las refinerías y en varios complejos petroquímicos del grupo, con unos resultados sobresalientes así como con gran aceptación por parte de los usuarios. En el éxito del desarrollo ha tenido gran influencia la participación del personal técnico de REPSOL y la experiencia que el grupo de la UNED tenía en temas de sintonía de controladores PID y en desarrollos bajo el entorno MATLAB y SIMULINK. No obstante el camino recorrido desde la concepción inicial en González 1994 hasta el producto final en Morilla 1996 no ha sido fácil.

## INTRODUCCIÓN.

El proyecto SINTOLAB debe su nombre al documento de descripción funcional (González 1994), y ha tenido como fruto un conjunto de herramientas informáticas para supervisión y sintonía de los controladores PID's estándar del Sistema de Control Distribuido TDC-3000 de Honeywell en las refinerías del grupo REPSOL.

Antes de emprender el proyecto, los departamentos de control avanzado de REPSOL habían hecho una exploración de las herramientas existentes en el mercado, llegando a la conclusión de que ninguna de ellas reunía las características técnicas mínimas requeridas, o bien se trataban de desarrollos universitarios lejanos a la problemática real existente en el entorno del Control de Procesos Petroquímicos. REPSOL decidió entonces contratar el desarrollo a un grupo universitario pero con la condición de que durante el desarrollo su personal técnico tuviera un gran participación. De esta forma se pretendía que la Universidad aportara al proyecto todos los fundamentos teóricos y REPSOL el "know-how" del proceso y la adecuación del producto resultante al entorno industrial.

El proyecto ha durado aproximadamente año y medio y se han conseguido los objetivos propuestos, básicamente:

- REPSOL dispone de una versión de SINTOLAB para PC<sup>1</sup> bajo el entorno de MATLAB, cuyas características funcionales se describen en Morilla 1996. Esta versión ya ha sido

---

<sup>1</sup> El desarrollo de la versión para PC de SINTOLAB ha sido realizado por el grupo del Dpto. de Informática y Automática de la UNED, integrado por los profesores: F. Morilla, S. Dormido, I. López, R. Hernández, S.

probada en todas las refinerías y en varios complejos petroquímicos del grupo, con unos resultados sobresalientes así como con gran aceptación por parte de los usuarios.

- REPSOL dispone de una la versión de SINTOLAB para estación de trabajo VAX<sup>2</sup> con conexión desde PC, con la arquitectura de la figura 1, cuyas características funcionales se describen en Luque et al. 1995. Esta versión está disponible en la refinería de PETRONOR y cuando esté suficientemente probada se distribuirá por todas las refinerías del grupo. Aunque aún no se dispone de una valoración definitiva, los resultados actuales permiten afirmar que con la aplicación de SINTOLAB aumenta la seguridad del proceso y se facilita la consecución de objetivos económicos a las estrategias de Control Avanzado.

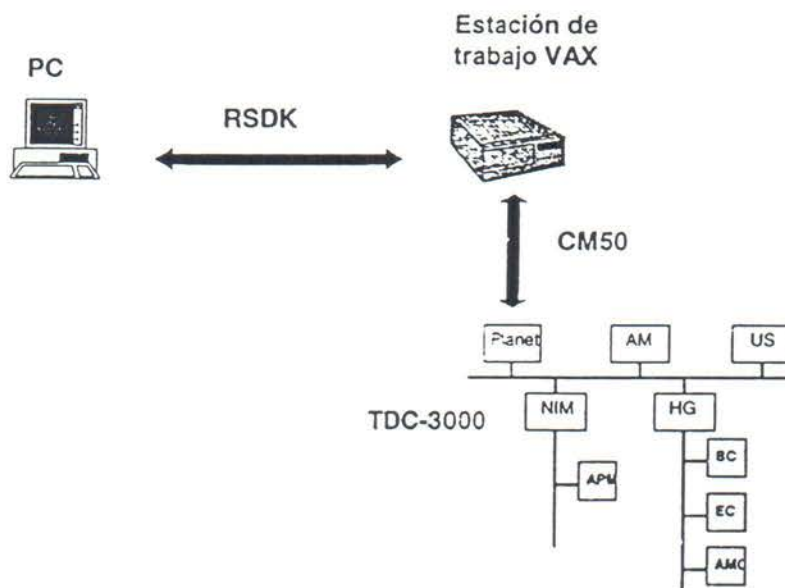


Figura 1: Arquitectura de la versión VAX de SINTOLAB.

En el primer apartado se da una visión general de SINTOLAB, mientras que en los siguientes apartados se ha tratado de responder a las preguntas que se haría un usuario potencial de la versión para PC bajo el entorno MATLAB. Se recogen así las principales características de la herramienta, pero sin descender al detalle de los interfaces y sin entrar en los aspectos de programación, recogidos en Morilla y López 1996.

## ¿QUÉ OFRECE SINTOLAB?

Las principales características funcionales de SINTOLAB son:

---

Dormido Canto. Con la colaboración de R. González (PETRONOR), de J. Molinero (Central de Ingeniería de REPSOL, S. A.) en el editor gráfico y V. Maestre (Central de Ingeniería de REPSOL, S. A.) en el hipertexto de ayuda.

<sup>2</sup> El desarrollo de la versión para VAX de SINTOLAB ha sido realizado por el grupo de la Unidad de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Autónoma de Barcelona, integrado por los profesores: I. Serra, M. A. Piera, J. Serrano, R. Moreno y D. Luque. Con la colaboración de R. González (PETRONOR), y de S. Mendiburu (PETRONOR) y B. Tortajada (Central de Ingeniería de REPSOL, S. A.) en los temas de comunicaciones.

- La **supervisión automática**, concebida como una tarea de vigilancia no invasiva, que hace un seguimiento periódico y automático de los lazos de control PID de las distintas unidades de una refinería.
- La **sintonía automática** de forma no invasiva o invasiva, concebida como una ayuda al Ingeniero de Control o al Técnico Instrumentista en el ajuste de los parámetros de control, por primera vez o porque la supervisión haya recomendado su reajuste.
- La **gestión de una base de datos** que da servicio a las rutinas de supervisión y de sintonía, que permite la instalación de la herramienta en cualquiera de las refinerías y que deja puertas abiertas a futuras ampliaciones de la herramienta.
- Las herramientas de **análisis** y de **simulación** que facilitan el estudio de respuestas temporales del sistema formado por el modelo del proceso y el modelo del controlador y la reproducción de condiciones de control similares a las que tendrá el lazo en el Sistema de Control Distribuido.
- La **generación de informes**, para dejar constancia de cualquier modificación en los lazos de control, para tener estadísticas de funcionamiento de los lazos y para facilitar el posterior análisis (en el entorno propio o en otro entorno).

Todas estas características funcionales están presentes en la versión de SINTOLAB para estación de trabajo VAX con conexión desde PC, que se ha desarrollado en lenguaje C. Pero no así en la versión de PC bajo entorno MATLAB<sup>3</sup>, que en ningún momento se conecta al Sistema de Control Distribuido sino que recibe datos de los lazos de control a través de ficheros. En cambio la versión PC, que se concibe bajo la idea de convertirla en una herramienta básica de todos los ingenieros de control de procesos del grupo REPSOL, se caracteriza por tener una interfaz de usuario más elaborada y por ofrecer otras opciones y más posibilidades dentro de éstas. Concretamente, véase la ventana gráfica de la figura 2:

- El acceso cómodo y de forma estructurada a la información, ya sea referente a los registros de planta, a los elementos del lazo de control o a los informes generados dentro de la propia aplicación, a través de la opción **Archivo** y de los botones.
- La posibilidad de modificar cualquier registro o las características del lazo al que pertenece, a través de la opción **Editar**.
- El asesoramiento al usuario en la elección de un modelo del proceso y en la estimación de sus parámetros en función de los datos de planta previamente seleccionados y procesados, a través de la opción **Estimación**.
- Múltiples alternativas para cálculo de los parámetros de control, con la posibilidad de modificar el algoritmo de control y de comparar diferentes situaciones, a través de la opción **Ajuste**.

---

<sup>3</sup> La versión de SINTOLAB para PC se ha desarrollado sobre la versión 4.2c de MATLAB. Requiere para su funcionamiento 16 MB de RAM, el "Control System Toolbox", versión 3.0b o posterior y "SIMULINK", versión 1.3c o posterior.

- Tres dominios (temporal, frecuencial y paramétrico) para el análisis del lazo de control en condiciones lineales, a través de la opción **Análisis**.
- El estudio del comportamiento temporal del lazo para distintos tipos de excitaciones y en condiciones muy parecidas a las reales, a través de la opción **Simulación**.
- El acceso a un hipertexto de ayuda, a través de la opción **Ayuda**.

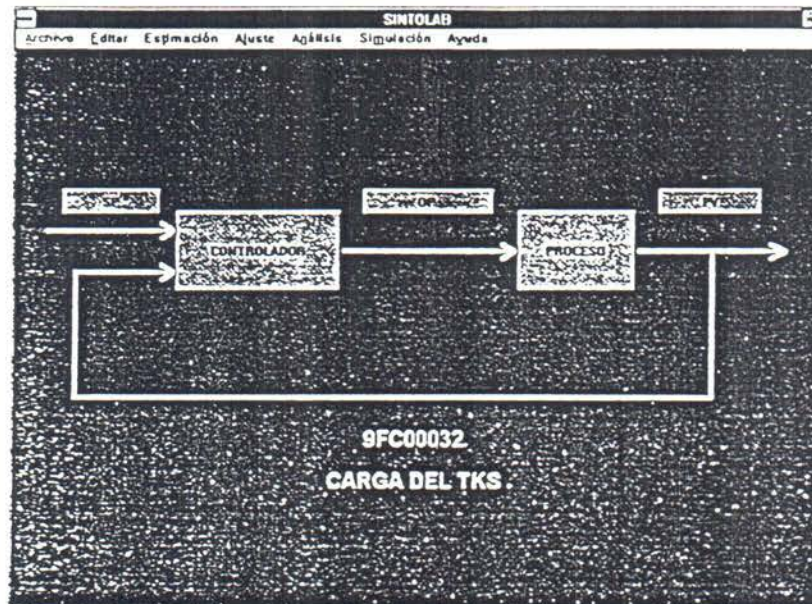


Figura 2: Menú principal de la versión de SINTOLAB para PC.

Las distintas opciones de la figura 2 despliegan a su vez otras muchas opciones, que debido a su extensión no se describen con detalle en este documento. En cambio, todos los aspectos importantes están comentados en los próximos apartados.

## ¿QUÉ HAY DETRÁS DE CUALQUIER LAZO DE CONTROL EN SINTOLAB?

Todo lazo de control básico tiene un identificador en el sistema de control distribuido, que suele corresponder con el nombre de la variable de proceso a la que suele controlar, y una breve descripción de esta última. Ambos datos están siempre presentes en el esquema de la figura 2, pero existe además información relativa a las tres señales del lazo de control (punto de consigna SP, señal de control OP y variable del proceso PV) y a sus elementos (proceso y controlador) que está accesible mediante el correspondiente botón. La presentación se realiza mediante texto fijo en ventanas gráficas de MATLAB.

También existe acceso a ver y a modificar toda la información, asociada a un lazo de control, a través de la opción **Editar Base de Datos**. La presentación se realiza mediante campos de texto en una ventana gráfica de MATLAB. Entre ellos se encuentran:

- Todos los parámetros fijos que, procedentes del sistema de control distribuido, se han considerado necesarios para la supervisión en SINTOLAB.
- El valor de aquellos parámetros variables, como son los parámetros del controlador, en el momento en que se hizo el registro.

- c) Todos los parámetros propios de la aplicación SINTOLAB que se han definido específicamente para la supervisión, para el modelado y estimación de parámetros del proceso y para el ajuste de parámetros de control.

Toda la información asociada a un lazo de control se recibe junto con sus datos de proceso en un archivo ASCII con un formato definido, que constituye un registro en SINTOLAB. Ambas versiones de SINTOLAB están preparadas para generar y para leer este tipo de archivos, pero en el caso de la versión en el entorno MATLAB se ha contemplado la posibilidad de leer archivos ASCII que sólo contienen datos de proceso, en este caso es la propia herramienta la que facilita al usuario los medios para completar el registro, como si de la opción Editar Base de Datos se tratara.

Con el fin de facilitar la organización de los registros, SINTOLAB contempla un directorio de trabajo, dentro del cuál se asigna un subdirectorío a cada unidad de proceso, que a su vez albergará todos los registros pertenecientes a dicha unidad. Este proceso es totalmente automático cuando se elige **Importar Registro** dentro de la opción Archivo. No obstante el usuario tiene libertad y facilidades, como en cualquier aplicación Windows, para moverse por las unidades de almacenamiento (disco duro, disco flexible, etc ...) a la hora de manejar registros o cualquier tipo de archivo.

En la versión de SINTOLAB para PC también se contempla la generación de informes, pero siempre asociados a las opciones que generan resultados susceptibles de transmitir al sistema de control distribuido y/o en su defecto a la versión en VAX. Por ejemplo, al usuario le puede interesar la generación de un informe después de hacer: una estimación, un ajuste, una simulación. Estos resultados se van grabando en un único fichero de informe asociado al registro. Es por ello que en cualquier momento se puede activar o desactivar la generación de informe, pero también se puede borrar el contenido del fichero de informe o examinar su contenido.

Dada la importancia que tienen los registros de datos en un proceso industrial y la dificultad de repetir experiencias fuera de la situación normal de planta, la opción **Editar Registro** de SINTOLAB se ha diseñado para sacar el máximo provecho a los datos del proceso, ya sea como paso previo a la estimación o simplemente con fines de visualización. Entre las posibilidades que el usuario encuentra destacan: la selección de un subconjunto del registro, la combinación de datos de diferentes registros y el tratamiento (suavizado, eliminación de espúreos, filtrado, interpolación, submuestreo) de éstos. Todo ello combinado con un amplio despliegue de ventanas gráficas, con el uso del zoom y con la posibilidad de configurar colores, tipos de trazo, fondo de ventana, etc ...

La figura 3 muestra las dos ventanas de edición gráfica a las que se tiene acceso. La ventana de señales originales juega el papel de fuente de datos para la ventana de señales validadas, que a su vez juega el papel de fuente de datos para la estimación. Las opciones de **Archivo** en ambas ventanas tienen como objetivos básicos: 1) facilitar el acceso a registros de datos, diferentes al registro seleccionado en el menú principal, para que el usuario puede realizar las composiciones que crea oportunas, 2) facilitar el almacenamiento de registros de datos que ya han sido tratados. Las opciones de **Edición** constituyen las herramientas básicas para que el usuario de SINTOLAB saque el máximo provecho a los registros de planta, entre ellas se incluyen las opciones de selección y de tratamiento de los datos. Las opciones de **Ver** tienen como objetivo facilitar el trabajo de edición, mediante la visualización que el usuario

considere más cómoda en un momento determinado, entre ellas se incluyen las opciones de Zoom. Por último en el apartado de Opciones se ofrecen al usuario distintos tipos de trazo para las gráficas, distintas unidades de tiempo en la escala horizontal y la posibilidad de configurar el editor gráfico a su gusto por lo que respecta a los colores y al trazado de las gráficas.

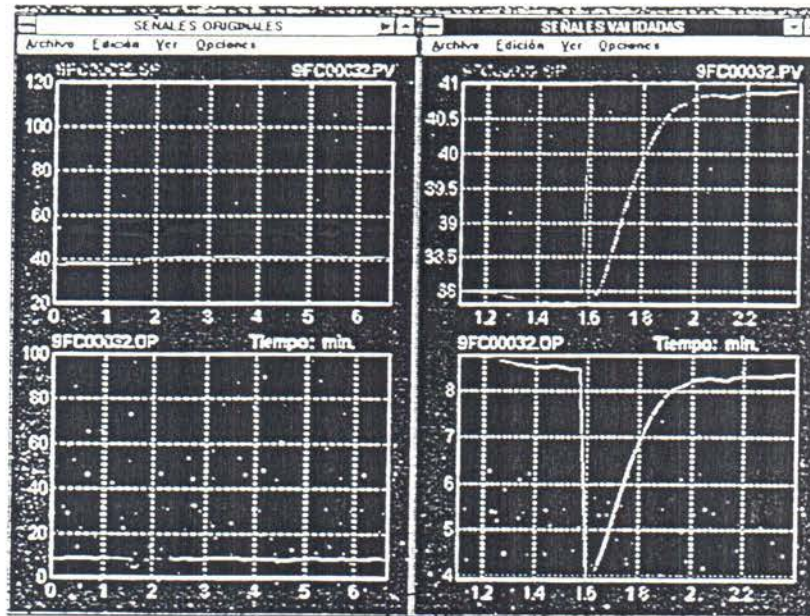


Figura 3: Ventanas de edición gráfica en SINTOLAB.

### ¿QUÉ SE ENTIENDE POR ESTIMACIÓN EN SINTOLAB?

Todo lazo en SINTOLAB, y por tanto todo registro, tiene un modelo asociado en la base de datos. Por tanto la estimación en SINTOLAB tiene como objetivo principal determinar los parámetros del modelo que mejor aproximan la respuesta del proceso. No obstante el usuario siempre tiene la posibilidad de utilizar un modelo diferente al de la base de datos, o de solicitar un análisis de la estimación que le recomendará el modelo más adecuado para ese proceso en esas condiciones de excitación. Los cuatro modelos que se utilizan en SINTOLAB, véase la tabla I, tienen el mismo número de parámetros (tres). Con ellos se ha querido resumir la casuística más habitual en procesos petroquímicos.

La estimación de parámetros del modelo del proceso en SINTOLAB siempre se hace utilizando la señal de entrada al proceso OP y su señal de salida PV, correspondientes al registro editado por el usuario o al registro de datos original si el usuario no ha utilizado la opción Editar Registro. La estimación se realiza en dos pasos:

- 1) **Reconstrucción de la respuesta escalón y de la respuesta impulsiva del proceso.** En este primer paso es necesario que el usuario especifique el número de coeficientes (número de valores) que debe tener la respuesta escalón y la respuesta impulsiva. Aunque la elección última del número de coeficientes de la respuesta escalón y de la respuesta impulsiva siempre corre a cargo del usuario, éste también tiene la opción de elegir un conjunto de valores para el número de coeficientes y solicitar un Análisis de la estimación,

que le recomendará sobre el número de coeficientes más adecuado para ese proceso en esas condiciones de excitación.

2) **Estimación de los parámetros del modelo del proceso.** En este segundo paso se trata de encontrar los parámetros del modelo que mejor aproximan la respuesta escalón del proceso (si el proceso tiene asignado un modelo con integrador) o de la respuesta impulsiva (si el proceso tiene asignado un modelo sin integrador).

Tabla 1: Modelos de proceso en SINTOLAB.

| Tipo  | Parámetros          | Función de transferencia                  |
|---|---------------------|---|
| Primer orden con retardo puro                               | $K, T_p, T_o$       | $\frac{K}{T_p s + 1} e^{-T_o s}$          |
| Segundo orden con dos constantes de tiempo                  | $K, T_{p1}, T_{p2}$ | $\frac{K}{(T_{p1} s + 1)(T_{p2} s + 1)}$  |
| Segundo orden con retardo e integrador puro                 | $K, T_p, T_o$       | $\frac{K}{s(T_p s + 1)} e^{-T_o s}$       |
| Tercer orden con dos constantes de tiempo e integrador puro | $K, T_{p1}, T_{p2}$ | $\frac{K}{s(T_{p1} s + 1)(T_{p2} s + 1)}$ |

Al pulsar sobre **Estimación**, se despliegan tres opciones: **Análisis**, **Ejecutar** y **Validar**. La opción de **Análisis** tiene como principal objetivo recomendar al usuario el modelo de proceso y el número de coeficientes de la respuesta escalón que debe emplear en la estimación, al mismo tiempo que presenta al usuario el resultado de la estimación en las condiciones recomendadas. La opción de **Ejecutar** tiene como finalidad obtener los parámetros del modelo del proceso que mejor aproximan el comportamiento del proceso real, siguiendo los dos pasos anteriormente comentados. Con la opción de **Validar** el usuario accede, directamente, a una ventana con la respuesta del modelo del proceso en las condiciones actuales (de excitación y parámetros) y la respuesta del proceso. En esta ventana, el usuario tiene acceso a modificar manualmente el valor de los parámetros del modelo y a desencadenar una nueva gráfica comparativa. Con ello se pretende que el usuario pueda efectuar una estimación manual de parámetros, mediante prueba y error a partir de los parámetros de la base de datos, o que pueda validar el modelo del proceso con datos diferentes a los que utilizó para la estimación.

La figura 4 es un ejemplo de la ventana de análisis de la estimación, donde se puede observar:

- Una gráfica comparativa (a la izquierda de la ventana) de las respuestas escalón reconstruidas con los distintos coeficientes. Esta gráfica sirve para ver si el vector de coeficientes elegido es adecuado al registro disponible o si el número de coeficientes al registro está dentro del rango de valores delimitados por el vector.
- Una gráfica comparativa (parte superior a la derecha) de la respuesta escalón del proceso y las respuestas escalón de los modelos (sin integrador) con el escalado temporal correspondiente al número de coeficientes recomendado y una gráfica comparativa (parte inferior a la derecha) de la respuesta escalón del proceso y las respuestas escalón de los



modelos (con integrador). De la comparación gráfica entre las respuestas de cada uno de los modelos y la respuesta del proceso se puede deducir cuál de los modelos es el más adecuado.

- La lista de modelos (parte inferior izquierda de la ventana), con el mismo código de color que las respuestas y con un mensaje en el modelo actual en la base de datos y en el modelo recomendado, salvo que ambos coincidan.
- El número de coeficientes o la duración recomendada y el vector de coeficientes o de tiempos utilizado en el análisis (parte inferior derecha de la ventana).

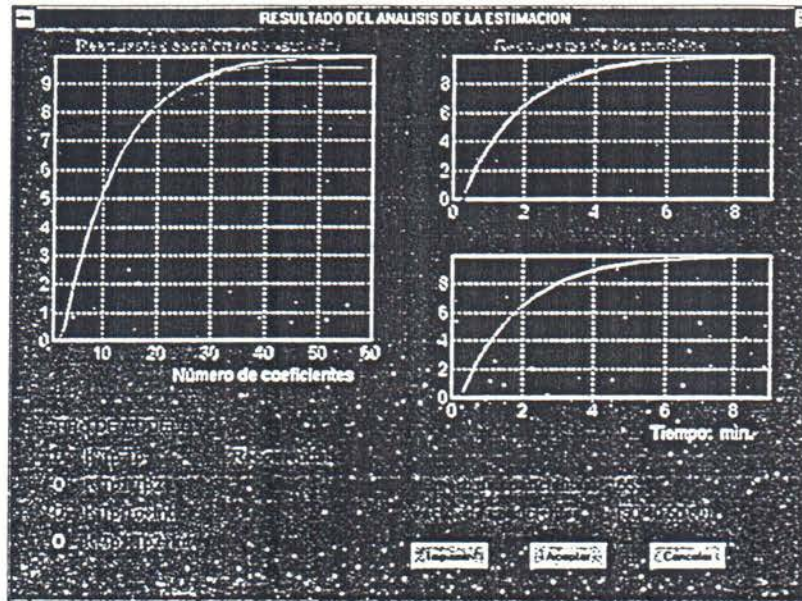


Figura 4: Ventana de análisis de la estimación.

La figura 5 es un ejemplo de resultados de una estimación, donde se observa una gráfica comparativa entre la respuesta real (PV) y la del modelo del proceso en las mismas condiciones de excitación (señal de control, OP) en las que se hizo el registro. Y un campo de comentarios que informa sobre lo acontecido en el proceso de estimación. Además se tiene acceso a modificar manualmente el valor de los parámetros del modelo y a desencadenar una nueva gráfica comparativa, con ello se pueden efectuar pequeñas modificaciones (ajuste fino) sobre los parámetros previamente estimados por el método numérico.

### ¿QUÉ PERMITE EL AJUSTE EN SINTOLAB?

El **Ajuste** en SINTOLAB tiene como objetivo principal ofrecer al usuario métodos de ajuste para los parámetros del controlador (opción **Parámetros**), pero además contempla la posibilidad de que el usuario desee modificar el algoritmo de control (opción **Controlador**), que desee comparar distintos ajustes realizados (opción **Comparar**), o que desee comprobar el comportamiento real del lazo de control previamente al ajuste (opción **Verificar**). Para el ajuste de parámetros de control, opción **Parámetros**, el usuario puede optar por un método de diseño analítico en el dominio de la frecuencia, con especificaciones de margen de fase y margen de ganancia, por un método numérico de optimización en el dominio temporal, con especificaciones de tiempo de asentamiento y máxima sobreelongación, o por criterios específicos más asociados a aspectos cualitativos que a aspectos cuantitativos.

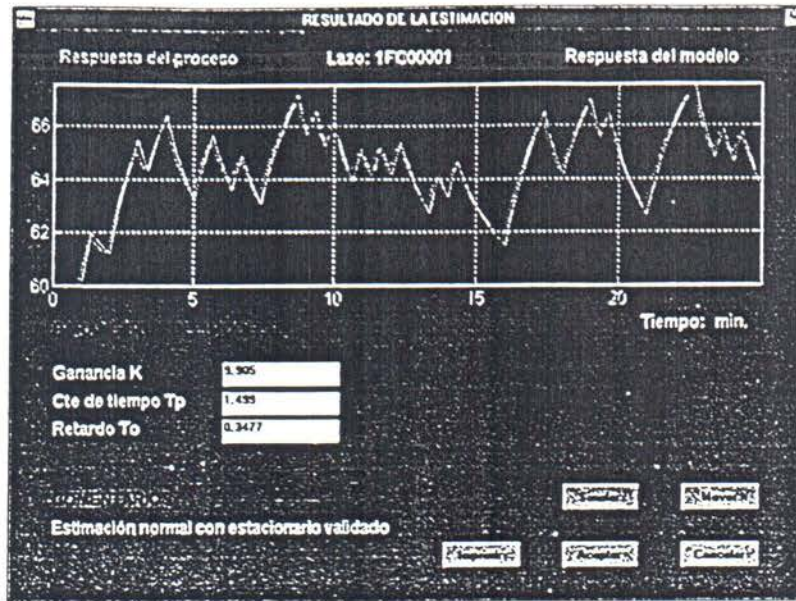


Figura 5: Ventana de resultados de la estimación.

En SINTOLAB se consideran cinco criterios específicos, cuyos nombres y características quedan recogidos en la figura 6, y una opción de criterio a medida que da paso al ajuste en el dominio de la frecuencia y al ajuste en el dominio temporal. A diferencia del ajuste por criterio específico, donde el usuario se limita a aceptar o rechazar las características de respuesta a las que lleva ese ajuste, en el ajuste a medida el usuario accede a un cuadro de diálogo interactivo, donde recibe asesoramiento de la herramienta a la hora de fijar las especificaciones.

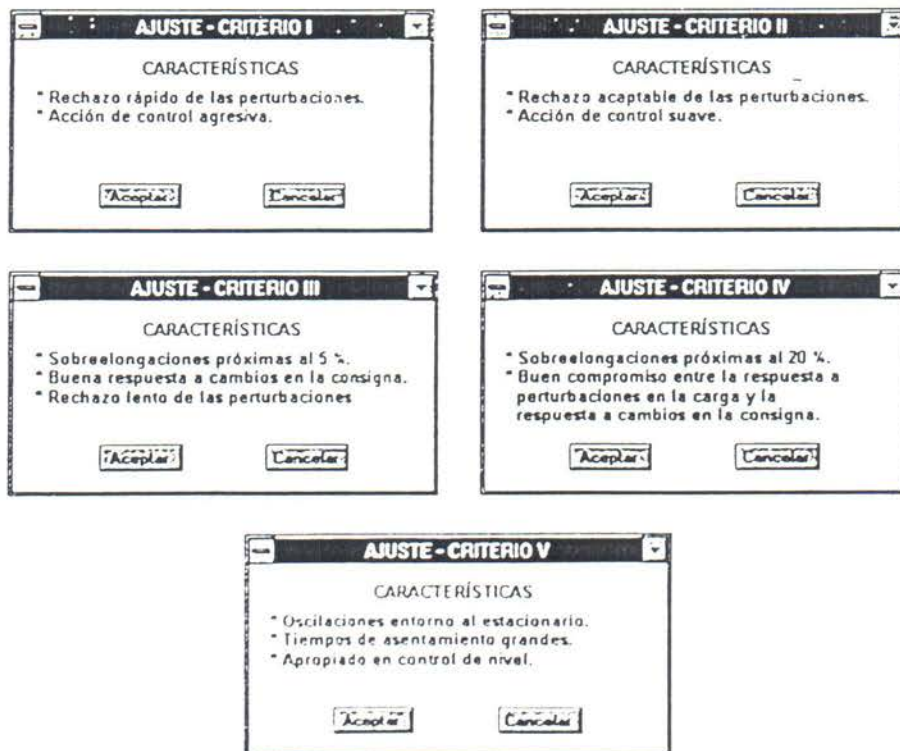


Figura 6: Ventanas informativas de los criterios de ajuste específicos.

El **ajuste en el dominio de la frecuencia** es un método de diseño analítico (Morilla et al. 1994) que al particularizarlo para SINTOLAB requiere de una especificación para el margen de fase, margen de ganancia o ambas, y un valor para la razón entre la constante de tiempo derivativa (T2) y la constante de tiempo integral (T1). Con estas especificaciones queda un grado de libertad, la elección de la frecuencia de diseño, para lo cual el usuario tiene dos posibilidades, dejar a la herramienta que la elija automáticamente o elegirla él, en este último caso el usuario recibe información del rango (valor mínimo y valor máximo) dentro del cual existe solución. A la frecuencia de diseño elegida, manual o automáticamente, se conseguirá la especificación de diseño (si esta ha sido única) o la más favorable (en el caso de que se hayan elegido las dos especificaciones). En general, valores grandes de la frecuencia de diseño tienen asociadas respuestas rápidas, pero no siempre es la mejor solución puesto que ello significa un mayor esfuerzo en la señal de control, de ahí que se recomiende siempre una frecuencia intermedia en el rango de posibles soluciones.

El **ajuste en el dominio temporal** se realiza mediante un proceso de optimización que requiere de una especificación para el tiempo de asentamiento ( $t_s$ ), la máxima sobreelongación ( $m_p$ ) o ambas, y de limitaciones a la señal de control, el valor mínimo y el valor máximo. Pero además el usuario debe poner condiciones a la búsqueda por optimización de los parámetros de control, estas condiciones se refieren a: si las especificaciones se desean para cambios en la consigna o en la carga, qué punto de operación (punto de trabajo) entre 0 y 100 se debe tomar como referencia para los cambios, qué amplitud (positiva o negativa) debe tener el cambio, qué banda de estacionario se debe considerar para medida de tiempo de asentamiento y de máxima sobreelongación, y qué número máximo de iteraciones se permiten al proceso de búsqueda por optimización.

Completado el cálculo de los parámetros de control (ganancia proporcional K, constante de tiempo integral T1 y constante de tiempo derivativa T2, mientras que el factor de filtro en la acción derivativa se considera fijo e igual a 0.1) se pasa a la presentación de resultados que es bastante similar en cualquiera de los ajustes. Se presenta información (gráfica y textual) suficiente para que el usuario acepte o rechace los nuevos parámetros de control. La información textual se refiere: a los parámetros de control, a las características del sistema y a las especificaciones elegidas por el usuario.

La figura 7 es un ejemplo de la ventana de resultados por ajuste en el dominio temporal, en la que el usuario recibe:

- Información de los valores actuales de los parámetros de control y de los nuevos valores (determinados por el ajuste).
- Información de las características de la respuesta temporal del sistema, tanto de sus valores actuales como de los nuevos valores si se aceptan los parámetros de control calculados.
- Información de las especificaciones del usuario, de manera que pueda constatar si total o parcialmente se satisfacen las especificaciones que ha elegido.
- Campo de comentario, informándole de la causa de finalización del método de búsqueda.
- Gráfica comparativa (en la parte superior) de las respuestas del sistema a una entrada escalón, en la situación actual y en la nueva situación, así como la gráfica comparativa (en la parte inferior) de la señal de control en ambas situaciones. La gráfica comparativa de la

parte superior se acompaña con la delimitación de las zonas (en color rojo) no permitidas a la respuesta del sistema, en función de las especificaciones elegidas por el usuario.

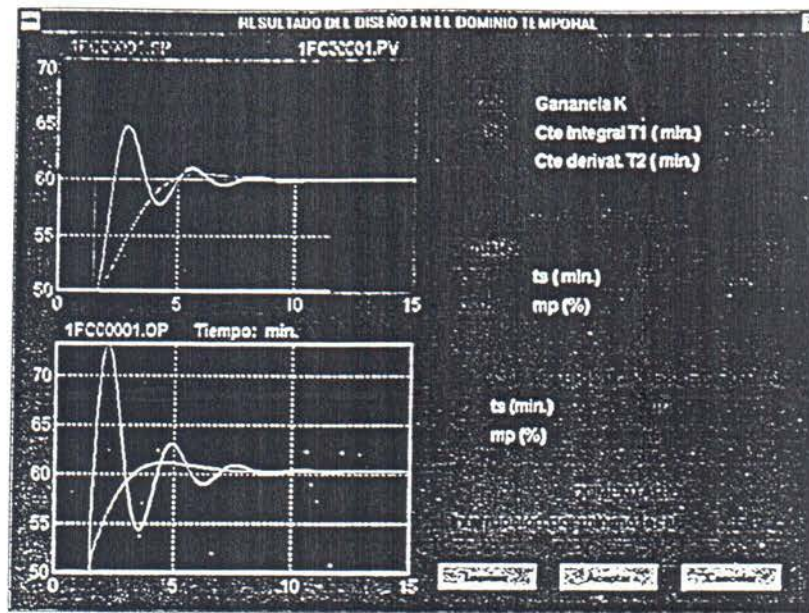


Figura 7: Ventana de resultados por ajuste en el dominio temporal.

Una de las tareas importantes dentro de la supervisión automática de los lazos de control de una refinería, y por tanto una característica funcional de la versión en VAX de SINTOLAB, es la comprobación de si el lazo está bien ajustado o si por el contrario se debe revisar. La opción **Verificar** de la versión en PC de SINTOLAB tiene este objetivo, le permite al usuario poder comprobar el comportamiento real del lazo de control, poniendo a su disposición mucho más información que la versión en VAX. La verificación sólo se puede realizar si la señal de error, diferencia entre las señales SP y PV, ha permanecido durante un intervalo de tiempo fuera de la banda de estado estacionario, en definitiva si el lazo de control ha estado excitado. De ahí que si esto no ocurre, el usuario recibe un mensaje informándole de la imposibilidad de realizar la verificación.

Por otra parte, la verificación del ajuste, incluida en SINTOLAB, es diferente si la señal de error ha abandonado la banda de estado estacionario debido a un cambio en la consigna o debido a las perturbaciones. En el primer caso se procede a reconstruir la respuesta del sistema en lazo cerrado a una entrada escalón unitario, de la misma forma que en la estimación, y a continuación se efectúa el análisis de características de la respuesta, similar al que se realiza cuando el usuario solicita el análisis de la respuesta del sistema en lazo cerrado. En el segundo caso se procede al análisis de la señal de error. Posteriormente se comparan los resultados del análisis con el patrón de características de respuesta temporal asociadas al correspondiente criterio específico, y se informa al usuario en los siguientes términos "el ajuste es bueno o malo" pero no del grado de desviación respecto al criterio nominal.

En aquellos criterios (III y IV) que tienen asociados una cierta sobreelongación en la respuesta del sistema la decisión sobre si el ajuste es bueno se toma sobre una banda de la máxima sobreelongación, una vez que se ha garantizado que la respuesta del sistema alcanza el estado estacionario. En el criterio V que tiene asociado un comportamiento oscilatorio la decisión se toma teniendo en cuenta una sobreelongación grande y que la respuesta no alcance el estado

estacionario en la ventana de supervisión. En los criterios (I y II) que no tienen asociados una característica medible concreta la decisión se toma teniendo en cuenta el valor relativo del tiempo de asentamiento con el tamaño de la ventana de supervisión.

## ¿QUÉ ALCANCE TIENE EL ANÁLISIS EN SINTOLAB?

En la barra de menús, al pulsar sobre **Análisis**, se posibilita al usuario la realización de un análisis **temporal**, **frecuencial** o de **robustez** del lazo de control en condiciones lineales. El análisis se efectúa numéricamente, utilizando modelos lineales para el proceso y para el controlador, y se acompaña con la correspondiente presentación de resultados.

Como **Análisis Temporal**, el usuario puede solicitar el análisis de la respuesta escalón del modelo del proceso, mediante la opción **Proceso**, o el análisis de la respuesta escalón del modelo del sistema en lazo cerrado, mediante la opción **Lazo cerrado**. En ambos casos se le presenta al usuario una ventana de resultados del análisis en la que se incluyen:

- Información textual de las distintas características analizadas (Morilla y Lechuga 1992) y el valor de éstas. Entre ellas se encuentran:
  - Si la respuesta es estable o inestable.
  - Si la respuesta alcanza el estacionario.
  - Si la respuesta presenta sobreelongación.
  - Si la respuesta es monótona creciente (sin sobreelongaciones) u oscilatoria,
  - El tiempo de asentamiento ( $t_s$ ).
  - El instante al 50% ( $t_{50}$ )
  - El área característica ( $a_0$ ) entre la respuesta del modelo del proceso y su valor en estado estacionario desde el instante en que se produjo el cambio.
  - Las integrales  $iae$  (integral del valor absoluto de la señal de error),  $ise$  (integral del valor al cuadrado de la señal de error) e  $itae$  (integral del valor absoluto ponderado en el tiempo de la señal de error) de la señal de error.
  - La máxima sobreelongación ( $m_p$ ).
  - El instante de máxima sobreelongación ( $t_p$ ).
  - La razón de amortiguamiento ( $b/a$ ).
  - El pseuperíodo de oscilación ( $t_0$ ).

De todas estas características, algunas ( $iae$ ,  $ise$ ,  $itae$ ) sólo son propias de la respuesta temporal del sistema en lazo cerrado y otras además ( $m_p$ ,  $t_p$ ,  $b/a$ ,  $t_0$ ) sólo son características de las respuestas oscilatorias.

- Información gráfica de la respuesta temporal analizada, acompañada de indicaciones sobre alguna de sus características. Como por ejemplo: el estacionario final, el instante de cambio en la entrada, el instante al 50%, la banda del estado estacionario, el instante de máxima sobreelongación y el valor de ésta.

La figura 8 es un ejemplo de análisis temporal del lazo cerrado.

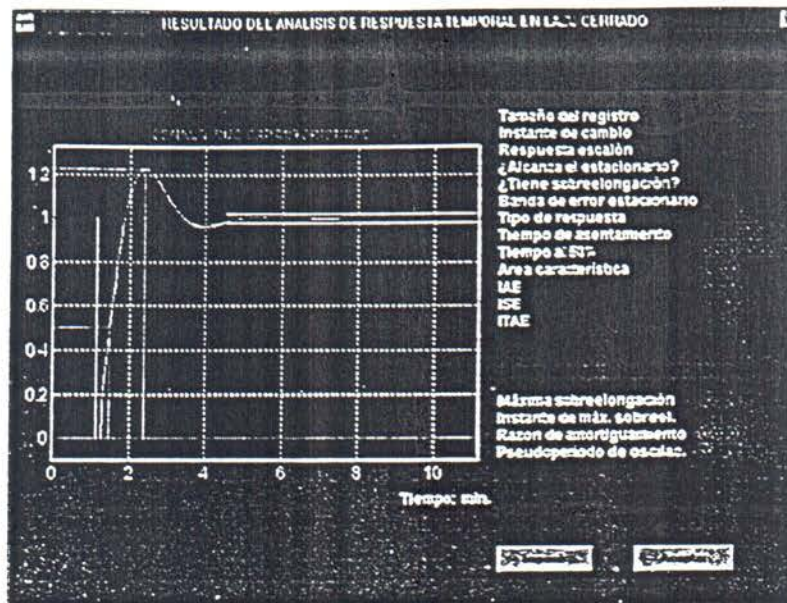


Figura 8: Ventana de resultados del análisis temporal en lazo cerrado.

Como **Análisis Frecuencial**, el usuario puede solicitar el análisis de la respuesta en frecuencia de la función de transferencia en lazo abierto, mediante la opción **Lazo abierto**, o el análisis de la respuesta en frecuencia de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado, mediante la opción **Lazo cerrado**. En ambos casos se le presenta al usuario una ventana de resultados del análisis en la que se incluyen:

- Información textual de las distintas características analizadas y el valor de éstas. En el caso de análisis frecuencial en lazo abierto:
  - El margen de ganancia (MG), expresado en valor absoluto y en dB.
  - La frecuencia ( $\omega_{cg}$ ), expresada en Hz o submúltiplo de él, a la que se presenta el margen de ganancia.
  - El margen de fase (MF), expresado en grados.
  - La frecuencia ( $\omega_{cf}$ ), expresada en Hz o submúltiplo de él, a la que se presenta el margen de fase.

Y en el caso de análisis frecuencial en lazo cerrado:

- El valor del pico de resonancia ( $M_r$ ), expresado en valor absoluto y en dB.
  - La frecuencia ( $\omega_r$ ), expresada en Hz o submúltiplo de él, a la que se presenta el pico de resonancia.
  - El ancho de banda (WB), expresada en Hz o submúltiplo de él, medido como la frecuencia a la que el diagrama de amplitud cae -3 dB respecto a su valor a frecuencia nula.
- Información gráfica de la respuesta en frecuencia analizada, acompañada de indicaciones sobre alguna de sus características. La respuesta en frecuencia consta de un diagrama de amplitud en decibelios (dB), y de un diagrama de fase en grados, ambos con escalado logarítmico en la frecuencia. En el caso de análisis frecuencial en lazo abierto se indican el margen de ganancia y el margen de fase. En el caso de análisis frecuencial en lazo cerrado se indican el pico de resonancia y el ancho de banda.

El **análisis de robustez**, consiste básicamente en la determinación de zonas del plano o del espacio de parámetros de control en las que es posible conseguir que las características de respuesta temporal estén dentro de un rango concreto. SINTOLAB ofrece al usuario dos modalidades del análisis de robustez, el denominado análisis bidimensional aplicable en todas las condiciones de control (PI o PID, Interactivo o No Interactivo) y para cualquier rango de especificaciones (en  $t_s$ , en  $m_p$  o en ambas) y el denominado análisis tridimensional aplicable sólo en condiciones de control PID No Interactivo y para tiempo de asentamiento ( $t_s$ ) menor o igual a un cierto valor.

La metodología empleada en cada caso es diferente, mientras que en el **análisis bidimensional** para cada valor de la constante de tiempo derivativa se determina analíticamente la región del plano (ganancia, constante de tiempo integral) que permite conseguir las especificaciones (el tiempo de asentamiento y/o la máxima sobreelongación), en el análisis tridimensional se parte de un punto del espacio de parámetros de control (solución al problema) y alrededor de él se buscan otros puntos que también lo son (Hernández 1995).

La figura 9 es un ejemplo de resultados del análisis bidimensional. La gráfica de la izquierda representa las distintas regiones del plano paramétrico (ganancia-constante de tiempo integral) para las que hay solución al problema planteado. En ella están representadas inicialmente todas las regiones de plano paramétrico, pero el usuario puede hacer que aparezca una sola de ellas y puede examinarlas secuencialmente. La gráfica de la derecha representa el valor del área encerrada por cada una de las regiones, de la gráfica de la izquierda, frente al correspondiente valor de la constante de tiempo derivativa.

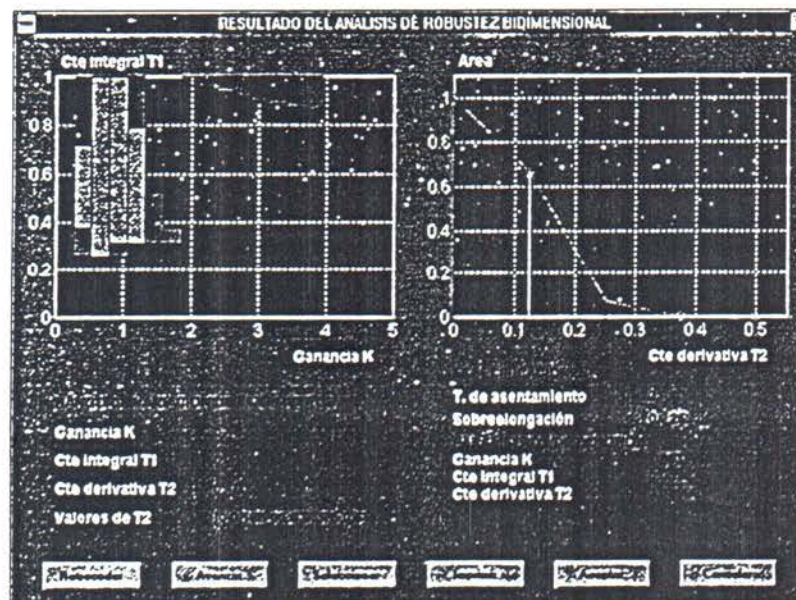


Figura 9: Ventana de resultados en el análisis de robustez bidimensional.

Aunque el análisis de robustez bidimensional no está concebido como una herramienta de ajuste del controlador, el usuario tiene la posibilidad de comprobar donde se encuentra actualmente el sistema de control (porque se le presentan los parámetros de control actuales) y tiene la posibilidad de elegir un juego de parámetros de control que pertenezca a alguna de las regiones analizadas.

El **análisis tridimensional** de robustez está concebido como una herramienta de ayuda al análisis bidimensional. Por la metodología utilizada, el análisis se realiza en términos de las ganancias del controlador, el usuario tiene la posibilidad de elegir una región cúbica, es decir, ciertos intervalos para las tres ganancias del controlador en los que hay solución. Estos intervalos regulares tienen su traducción a rangos en los parámetros de control, que son los que se utilizan en el análisis bidimensional.

### ¿QUÉ SE ENTIENDE POR SIMULACIÓN EN SINTOLAB?

Al seleccionar **Simulación** del menú principal, se accede a un cuadro de diálogo que ofrece múltiples combinaciones para el lazo de control. Inicialmente estarán marcados: el modelo actual del proceso y las características actuales del controlador y como excitación la señal SP original. Pero el usuario puede cambiar el tipo de modelo del proceso, las características del controlador (tipo y ecuación) y el tipo de excitación, sin límite sobre el total de 48 posibles combinaciones (4 modelos x 2 estructuras de control x 3 ecuaciones de control x 2 tipos de entrada).

En el caso de haber optado por la señal SP original como excitación del sistema, se procede a la simulación. Pero si el usuario ha optado por una excitación generada, a las 48 posibles combinaciones anteriores se le unen las posibilidades que le ofrece el **generador de señales** de SINTOLAB. Este generador, véase figura 10, permite elegir entre tres tipos de señales (escalón, rampa o pulso) tanto para la señal de referencia SP como para la señal de carga sobre la señal de control OP. Se considera que un punto de funcionamiento del lazo viene definido por los valores iniciales de la señal de referencia SP y de la señal de control OP.

Figura 10: Cuadro de diálogo del generador de señales para la simulación.

Después de la simulación se presenta una ventana interactiva con información gráfica de la respuesta del sistema en lazo cerrado en las condiciones de excitación, de modelo del proceso y de control elegidas anteriormente. En ella se puede modificar el valor de cualquiera de los parámetros (los tres parámetros del modelo del proceso y cinco parámetros del controlador) y mediante una nueva simulación estudiar el efecto sobre la respuesta del sistema. Este entorno de simulación puede quedar totalmente aislado del resto de opciones de SINTOLAB, pero si



el usuario quiere y previamente no ha efectuado cambio en los parámetros del modelo del proceso, lo puede utilizar con la funcionalidad de ajuste fino de parámetros de control

## CONCLUSIONES.

La buena colaboración entre el personal técnico del grupo REPSOL y los autores de este trabajo ha permitido afrontar con éxito el desarrollo en MATLAB de una herramienta para el ajuste y supervisión de lazos de control. La herramienta ya ha sido probada en todas las refinerías y en varios complejos petroquímicos del grupo, con unos resultados sobresalientes así como con gran aceptación por parte de los usuarios.

Aunque la concepción de SINTOLAB se hizo pensando en los algoritmos PID del sistema de control distribuido TDC-3000 de Honeywell, que se utiliza mayoritariamente en las refinerías del grupo REPSOL, el desarrollo se puede ampliar sin gran dificultad para contemplar los algoritmos básicos de control de otras casas comerciales (Foxboro, Siemens, etc ...).

## AGRADECIMIENTOS.

Aunque el desarrollo de la versión de SINTOLAB para PC haya sido responsabilidad del grupo de la UNED, todos los participantes en el proyecto han aportado su grano de arena. Nuestro agradecimiento a todos ellos:

- R. González y S. Mendiburu de PETRONOR.
- F. Díaz-Andreu, B. Tortajada, J. Molinero y V. Maestre de la Central de Ingeniería de REPSOL, S. A.
- F. Cifuentes de REPSOL PETRÓLEO.
- I. Serra, M. A. Piera, J. Serrano, R. Moreno y D. Luque de la Unidad de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UAB.

## REFERENCIAS.

- González, R. "SINTOLAB (Laboratorio de Sintonía de Lazos Regulatorios): Descripción funcional". Documento de especificaciones del proyecto SINTOLAB. Marzo 1994.
- Hernández, R. "Análisis de estabilidad robusta de controladores PI-PID". Documento técnico UN/SLB/D/0009 del proyecto SINTOLAB. Mayo 1995.
- Luque L., I. Serra, M. A. Piera, R. Moreno y J. Serrano. "Funcionalidad de la versión para VAX de SINTOLAB". Documento técnico UAB/SLB/D/0003 del proyecto SINTOLAB. Mayo 1995.
- Morilla, F and L. Lechuga. "Automation of open-loop and closed-loop experiments". Preprints of SICICA'92 Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications (Málaga 20-22 May 1992): 813-817.
- Morilla, F, S. Dormido Canto y S. Dormido. "Diseño de controladores en el entorno MATLAB-SIMULINK". Jornadas de Automática (Málaga, 13-14 Octubre 1994): 7-14.
- Morilla, F. "Manual de usuario de la versión PC de SINTOLAB". Documento técnico UN/SLB/D/0010 del proyecto SINTOLAB. Enero 1996.
- Morilla, F e I. López. "Programación de la versión PC de SINTOLAB". Documento técnico UN/SLB/D/0011 del proyecto SINTOLAB. Abril 1996.