

CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA
HORNO DE VACÍO Y BOMBARDEO IÓNICO PARA
PROCESOS DE IMPLANTACIÓN IÓNICA POR
INMERSIÓN EN PLASMA (PIII) Y PROPUESTA DE
ESTRUCTURA DE CONTROL.



Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: **Angel M^a Medrano Fernández**

Nombre y apellidos del director/es: **Gabriel Lera Carreras**

Pamplona, fecha de defensa: 04/06/2018



AGRADECIMIENTOS:

Quiero dedicar este trabajo:

A mi esposa Mónica y a mi hija Lucía, por el tiempo que les robé y con tanto amor me perdonan.

A mis padres, Angel y Cloti, por la fuerza y constancia que me transmitieron. Y a mis hermanos Eugenia, Virginia y Roberto por apoyarme siempre.

A mi apreciado Director de Trabajo Fin de Grado, Gabriel Lera, por sus indicaciones siempre sabias, por su naturalidad y por su acompañamiento todos los jueves de este semestre que nos ha unido.

A los demás profesores, a la Universidad y a mis compañeros por ayudarme por encima de lo esperado y porque supieron adaptarse a mis necesidades.

A mis amigos Enrique, Richar y Roberto por infundirme siempre ánimos para seguir.

A todos los que directa o indirectamente me impulsaron a llegar hasta aquí: sinceramente agradecido, os dedico éste trabajo.

RESUMEN:

El uso de la Implantación iónica como método para introducir/dopar átomos dentro de un material mediante el bombardeo con iones acelerados es utilizado habitualmente en algunos sectores industriales. Sin embargo, cuando la energía utilizada para acelerar los iones no es suficiente para conseguir alojarlos a la profundidad deseada en el material, debemos favorecer su penetración mediante la difusión térmica. Es decir, debemos aumentar la temperatura que el propio bombardeo ocasiona en la muestra, mediante la aplicación de calor con un horno en vacío donde las condiciones del bombardeo iónico pueden ser cambiantes y por tanto su contribución a la temperatura final. Este es el caso de la técnica denominada Implantación Iónica por inmersión en plasma (PIII) donde la energía de aceleración es menor a 30KeV.

Objetivo: El objetivo a largo plazo consiste en mantener constante la temperatura seleccionada de la muestra sometida a bombardeo iónico para conseguir una penetración de los iones deseada.

Desarrollo: Para conseguir nuestro objetivo se desarrolla el proyecto en las siguientes etapas:

1ªEtapa: Determinar las variables de interés y plantear ensayos que nos permitan medirlas.



2ª Etapa: Caracterización del efecto del bombardeo iónico sobre la temperatura de la muestra.

3ª Etapa: Caracterización del efecto del horno de vacío sobre la temperatura de la muestra.

4ª Etapa: Caracterización de la planta compuesta por el bombardeo iónico junto con el horno de vacío.

5ª Etapa: Realización de modelos matemáticos del comportamiento de la planta utilizando técnicas de identificación de sistemas dinámicos.

6ª Etapa: control de la planta y simulación de condiciones habituales de proceso.

PALABRAS CLAVE:

Implantación iónica, feedforward, plasma, horno de vacío, control anticipativo, implantación iónica por inmersión en plasma, PIII, PI3, difusión térmica, sputtering, bombardeo iónico, tratamiento térmico.



INDICE

1. INTRODUCCION	6
2. OBJETIVO	6
3. ESTADO DEL ARTE	7
4. DESCRIPCION DEL EQUIPO	7
5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	9
6. METODOLOGÍA	12
7. DETERMINACION LAS VARIABLES DE INTERES	13
8. ELECCION DEL SENSOR	14
9. DESARROLLO EXPERIMENTAL	17
9.1. CARACTERIZACION DEL HORNO DE VACIO	17
9.2. CARACTERIZACION DEL BOMBARDEO IONICO	25
10. MODELOS MATEMATICOS DE LA PLANTA	29
10.1. IDENTIFICACION DEL HORNO DE VACIO	29
10.2. IDENTIFICACION DEL BOMBARDEO IONICO	36
11. CONTROL DE LA PLANTA	51
11.1. ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR	51
11.2. ESQUEMA	53
11.3. SIMULACIONES	57
12. CONCLUSIONES	64
13. ACCIONES FUTURAS	64
14. BIBLIOGRAFIA	65



1. INTRODUCCIÓN

Las primeras aplicaciones industriales de la **implantación iónica** datan de los años 70 y se desarrollaron para la industria de los semiconductores. Es una técnica de modificación superficial que sustituye a la difusión térmica como método para introducir o dopar un sustrato con un elemento químico distinto al material base mediante el bombardeo con partículas aceleradas. Por tanto, el efecto es balístico y no térmico.

Por otro lado, la **difusión térmica** es la técnica tradicionalmente empleada para introducir un dopante dentro de un sustrato. Consiste en calentar el sustrato a temperaturas muy elevadas en una atmósfera rica en el elemento dopante que se quiere introducir. La solubilidad del gas en el sólido genera un perfil de concentración.

Las aplicaciones para cualquiera de las dos técnicas, se desarrollan para la mejora superficial de propiedades tribológicas (desgaste, fricción), cambio de las propiedades eléctricas (semiconductores), aumento de la dureza superficial, resistencia a la corrosión, mejora de la mojabilidad (hidrofobidad), superficies bactericidas, biocompatibilidad, sensores, etc..

Tanto el bombardeo por implantación iónica como la difusión térmica tienen limitaciones que impiden por sí mismos el tratamiento en algunas aplicaciones, pero correctamente combinadas pueden superar sus inconvenientes y solucionar estas aplicaciones.

2. OBJETIVO.

Actualmente, un horno de vacío de la empresa Ceramisis Ltd. para difusión térmica está incorporado a un implantador iónico por inmersión en plasma (PIII) y se han hecho algunos trabajos en combinación con dos fuentes de sputtering de radiofrecuencia de baja potencia con resultados prometedores; pero no se ha probado con la implantación de iones de energías comprendidas entre 1KeV y 40 KeV. El horno para la difusión térmica es capaz de calentar hasta 1000°C. Sin embargo, tiene el inconveniente de que el control se realiza manualmente con un reóstato que proporciona la alimentación al horno. Esto supone un grave problema de tiempo, porque se debe esperar a que la contribución de calor del bombardeo iónico sobre las piezas se estabilice, para posteriormente elevar la temperatura con el horno hasta el valor deseado.

El objetivo de este trabajo es proporcionar un controlador al horno que introducido en un implantador iónico sea capaz de controlar la temperatura de las muestras con una precisión de 5°C mientras está recibiendo simultáneamente el bombardeo de iones de energía < 40KeV, teniendo en cuenta dos cosas: primero, que tanto el bombardeo iónico como el horno de vacío contribuyen a calentar las piezas; segundo, que la implantación iónica es un proceso en alto vacío donde la transmisión de calor es sólo por radiación, por lo que es probable que el proceso no sea lineal.



3. ESTADO DEL ARTE

Las necesidades de control de la temperatura en implantadores iónicos son varias:

1.- En implantadores iónicos capaces de dopar elementos químicos que se encuentran en fase sólida, se necesita evaporar el precursor para conseguir vapor del elemento dopante. Por ejemplo, para implantar cromo se introduce en un horno de vacío el precursor (cloruro de cromo) para evaporarlo y posteriormente separar el cromo del cloro. El control de la temperatura del horno se realiza habitualmente con un regulador de histéresis o con un regulador PID configurado como PI.

2.- En implantadores iónicos de alta densidad de plasma, el bombardeo produce calentamiento sobre las muestras. Para mantener la temperatura de las muestras dentro de unos límites es habitual utilizar un PID que regula la densidad del plasma, y con ello la energía que se transmite en el bombardeo, teniendo como resultado el control de la temperatura de las muestras.

Los reguladores PID y reguladores por histéresis son ampliamente utilizados en la industria para el control de la temperatura con un resultado satisfactorio. La implantación iónica también los utiliza, pero en demasiadas ocasiones el resultado no es el esperado.

4. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.

El equipo es un implantador iónico por inmersión en plasma (PIII) modelo RUP4-2 de la empresa IOT GmbH con base en Leipzig, Alemania, ver figura 4.1. Es un prototipo que cuenta con una cámara que alcanza alto vacío ($>1e-7$ mbar) por medio de una bomba turbomolecular Varian de 1000 l/s. Posee una fuente de iones ECR (Electron Cyclotron Resonance) para ionizar el gas que se introduce en la cámara. La fuente ECR utiliza campo eléctrico alterno a frecuencia de microondas para sincronizar el movimiento circular de los electrones dentro de un campo magnético perpendicular al campo eléctrico para proporcionarles la energía cinética con la que ionizar el gas que se introduce. Este tipo de fuentes produce una gran densidad de ionización, necesaria para producir grandes corrientes de iones, ver figura 4.2.



Figura 4.1: Implantador iónico por Inmersión en plasma.

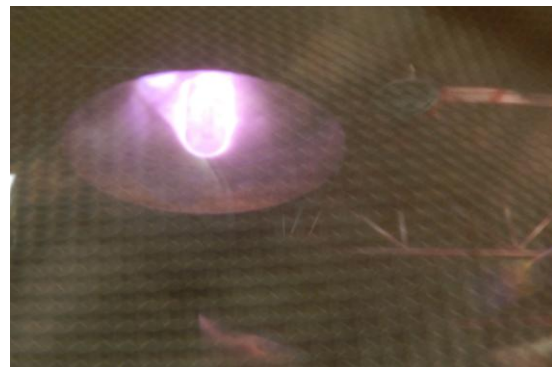


Figura 4.2. Fuente ECR ionizando



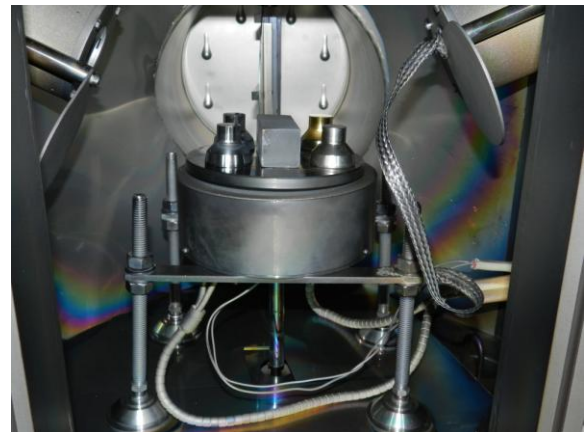
El equipo dispone de un generador de pulsos de alta tensión entre 1KV y 40 KV de polaridad negativa respecto de tierra. La pieza a implantar se pone al potencial negativo 40KV respecto de tierra. De esta manera, los iones positivos generados por la fuente de iones cyclotron (ECR) son acelerados hacia la pieza con una energía de hasta 40KeV. Con esta energía cinética, los iones adquieren tal velocidad que les permite penetrar dentro del material. La diferencia de potencial de los pulsos es ajustable, por tanto la energía con la que llegan los iones lo es en la misma medida. En función de la energía de los iones, de la densidad del material de las piezas y de la masa atómica de los iones incidentes, la profundidad que alcanzan los iones implantados será distinta. Esta distribución es un proceso aleatorio que se representa bien en una curva de Gauss y que se puede simular con programas específicos de ordenador para prever el resultado de una implantación iónica.

El equipo también dispone de dos magnetrones circulares de sputtering de radiofrecuencia de baja potencia, 150W cada una, de la empresa Gencoa Ltd para evaporar blancos sólidos y conseguir iones de estos elementos químicos.

Recientemente se ha adquirido un horno de vacío de la empresa Ceramis Ltd de 1200 W que utiliza 8 lámparas halógenas de 150W cada una y que puede alcanzar 1000°C. Dispone de un termopar tipo K para medir la temperatura. Las piezas a tratar se colocan en un plato-soporte que queda suspendido sobre el horno a unos 2mm. El horno es desmontable, y se prevé que el plato-soporte pueda girar, ver figura 4.3.



(a)



(b)

Figura 4.3: (a) Horno de vacío. (b) Horno de vacío dentro del implantador con plato-soporte y piezas.



5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las primeras aplicaciones industriales de la implantación iónica datan de los años 70 y se desarrolló para la industria de los semiconductores. Es la técnica con la que se dopa el silicio con elementos trivalentes o pentavalentes para conseguir silicio tipo P o silicio tipo N en circuitos integrados para aplicaciones microelectrónicas. Sustituye a la difusión térmica como método para introducir o dopar un sustrato con un elemento químico distinto al material base.

La implantación iónica es un proceso en alto vacío que consiste en la aceleración de partículas cargadas (iones), que bombardean la superficie del material a tratar. Los iones penetran en el material y pierden su energía en colisiones con los átomos del sustrato. El reparto final de los iones es un proceso aleatorio que se representa bien en una curva de Gauss. Es un proceso balístico fuera del equilibrio termodinámico que permite crear aleaciones por encima de los límites de solubilidad. El ión incidente tiene energía suficiente como para penetrar dentro del sustrato; una vez alojado, cambia la composición y estructura interna del sustrato. Este cambio de composición y estructura, provoca un cambio en las propiedades físico-químicas de la nueva superficie. Así pues, en función del elemento dopante se obtiene un cambio en las propiedades eléctricas (semiconductores), ópticas, corrosión, mecánicas, químicas, biomédicas, etc... Las aplicaciones se fueron desarrollando para la mejora superficial de propiedades tribológicas (desgaste, fricción), aumento de la dureza superficial, resistencia a la corrosión, mejora de la mojabilidad (hidrofobidad), superficies bactericidas, biocompatibilidad, sensores, etc..

Hoy día están interesados muchos sectores de la industria en esta técnica por la capacidad de nuevos desarrollos que suponen, así por ejemplo: la aeronáutica (turbinas), alimentación, transformación del plástico, industria biomédica (prótesis, implantes), instrumentación, metal-mecánica, y otras están haciendo desarrollos en este sentido.

La profundidad de penetración de los iones está determinada por la energía cinética que adquieren al ser acelerados. Los iones adquieren energía al aplicarles una diferencia de potencial que en implantadores lineales comerciales varía entre 10KV y 200KV y en implantadores iónicos por inmersión en plasma (PIII) varía entre 1KV y 40KV.

La implantación iónica por inmersión en plasma (PIII), es un proceso pulsado en el cual la pieza a tratar se encuentra inmersa dentro de un gas ionizado (plasma) en condiciones de cuasineutralidad. Cuando un pulso negativo de tensión es aplicado a la pieza, se crea alrededor de ella una envoltura (sheath) en la cual los iones positivos son acelerados hacia la pieza. La tensión negativa debe aplicarse en pulsos para restituir la envoltura (sheath) en cada ciclo. El grosor de la capa sheath es importante porque el tamaño no debe superar los límites de la cámara de vacío [3]. Si la densidad del plasma es alta y la frecuencia de pulsos es elevada, el bombardeo continuo de los iones calienta la pieza.

A pesar de que la energía de la implantación iónica por inmersión en plasma (PIII) pueda parecer elevada, entre 1KV y 40KV, la penetración de los iones en las piezas es del orden de las decenas de nanómetros [3], insuficiente para muchas aplicaciones.



Los parámetros de control del proceso de implantación (PIII) son los siguientes:

Primero se debe fijar la tensión aplicada a los pulsos de alta tensión en función de la profundidad, espesor de la capa (sheath), aplicación de la pieza, tipo de gas, etc.. Esta puede variar entre 1KV y 40KV.

Segundo, se debe fijar el ancho del pulso, éste es función de la tensión del pulso aplicado para mantener un espesor de la capa sheath adecuada. Esta puede variar entre $1\mu\text{s}$ y $100\mu\text{s}$.

Por último, se fija la frecuencia de los pulsos de alta tensión. Esta puede variar entre 50Hz y 3000Hz.

De la relación entre la frecuencia y el ancho del pulso se establece el ciclo de trabajo; este no debe superar cierto valor ya que en caso de cortocircuitos el ánodo del generador debe disipar toda la energía del pulso; esto se debe evitar a toda costa. En función de la tensión del pulso y la corriente de pico, el valor máximo del ciclo de trabajo varía, pero en general no debe superar un 2% [4].

Durante el tiempo en el que está activo el pulso, la corriente de iones se difunde en la superficie de la pieza, ver figura 5.1.

Para supervisar el correcto funcionamiento del proceso el equipo dispone de una salida escalada de la tensión del pulso y una salida escalada de la corriente media de iones que se están implantando. Estas salidas se llevan a un osciloscopio donde se ve en tiempo real si la duración del pulso es mayor que el tiempo de difusión de la corriente, Figura 5.1.

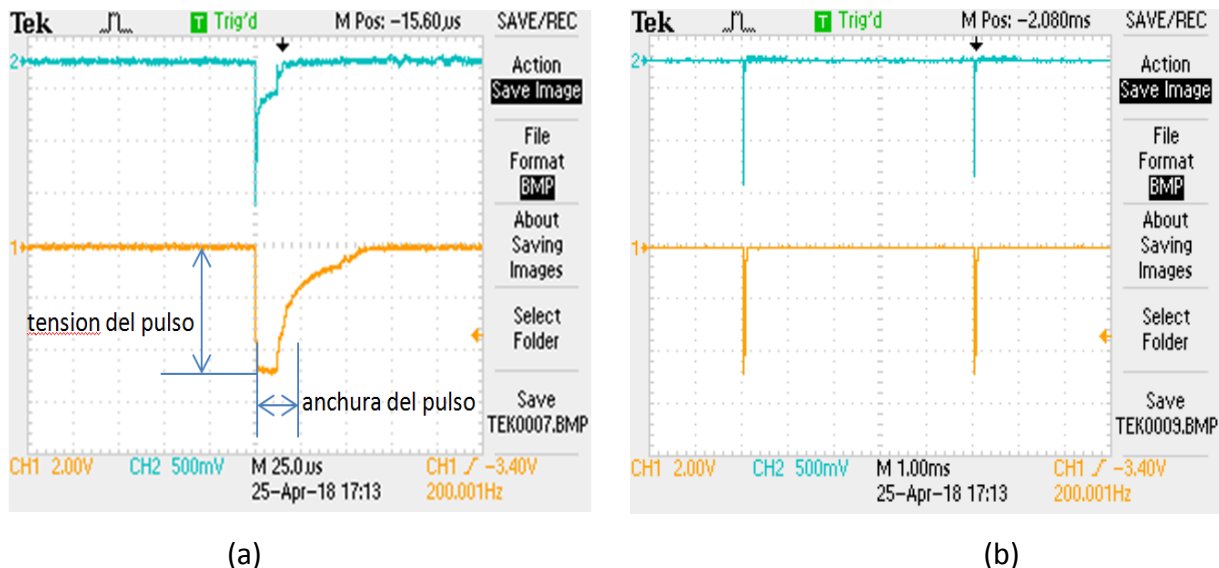


Figura 5.1: (a) Visualización de un pulso de tensión de 30KV en canal 1, y corriente de difusión correspondiente en canal 2. (b) Visualización de la frecuencia de pulsos.

La difusión térmica, es un fenómeno de transporte de masa por movimiento atómico. Es la técnica tradicionalmente empleada para introducir un dopante dentro de un sustrato. Consiste en elevar la temperatura del sustrato entre 850°C y 1200°C en una atmósfera rica en el elemento dopante que se quiere introducir. Debido a que la



solubilidad de un gas en un sólido es muy baja, es necesario favorecer el proceso trabajando a temperaturas muy elevadas ya que el coeficiente de difusión depende exponencialmente de la temperatura: $D = D_0 * \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$, donde D es el coeficiente de difusión, Q_d es la energía de activación, R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

La solubilidad de un gas en un sólido genera un perfil de concentración. El perfil de concentración es máximo en la superficie y va disminuyendo con la profundidad. La profundidad de penetración es mayor cuanto más elevada es la temperatura y mayor duración tiene el proceso (horas). La concentración en la superficie depende de la solubilidad a una temperatura dada.

La difusión térmica se lleva a cabo con el horno de vacío descrito en el apartado 4.Descripción del equipo, pag.7. Las altas temperaturas a las que deben ser sometidas las piezas a tratar es un factor limitante de esta técnica, sin embargo cuando la difusión térmica es un tratamiento factible, ésta llega a alojar dopante hasta las décimas de milímetro.

Estas dos técnicas son ampliamente utilizadas, pero ambas tienen limitaciones que, en ocasiones, impide dar una solución óptima por separado. Por ejemplo, algunos metales como el cromo, titanio, aluminio, níquel, etc., al entrar en contacto con el oxígeno del aire forman una fina capa superficial de óxido de algunos nanómetros de espesor [3] muy estable y compacta llamada “capa de pasivación” que actúa como barrera de difusión y lo protege de la corrosión y de otras reacciones químicas. Los aceros altamente aleados con estos metales, forman una capa pasiva que les proporcionan tal protección, además de otras propiedades. Tal es el caso de acero inoxidable, donde la alta concentración de cromo (> 12%) le proporciona la capa pasiva que le da la condición de “inoxidable” que lo hace tan resistente a la corrosión. En piezas de acero aleadas que llevan un tratamiento de temple y revenido, esta capa pasiva protectora es tan estable, incluso a altas temperaturas, que dificulta la difusión térmica como método para introducir aleantes. Sin embargo, la implantación iónica al ser un proceso balístico y estar fuera del equilibrio termodinámico, los iones incidentes pueden atravesar la capa pasiva y alojarse en el interior del material base. En estos casos, se puede utilizar la implantación iónica por inmersión en plasma para incorporar iones en el sustrato, mientras la pieza estaría sometida a la temperatura de revenido, en el que la difusión térmica domine el proceso y los iones penetren a la profundidad que le permita la solubilidad del material a la temperatura de revenido (600°C en aceros rápidos y aceros para forja en caliente), maximizando el proceso. En un tratamiento de temple y revenido, mientras la temperatura del sustrato se mantenga por debajo de la temperatura de revenido la dureza de la pieza se mantiene, ahora bien, en el momento en que se alcanza dicha temperatura la dureza decae drásticamente. Se propone una precisión de 5°C para asegurar este propósito.

Habitualmente se utilizan algunos parámetros del implantador (PIII) para controlar la temperatura de las muestras. Por ejemplo, se puede utilizar la frecuencia de los pulsos para regular la potencia del bombardeo que reciben las muestras, y de este modo controlar el calentamiento que reciben. Pero al hacer esto forzamos al equipo a trabajar en la zona límite del ciclo de trabajo (2%), ver pag.10, y esto se traduce en un aumento del riesgo de cortocircuitos que compromete el trabajo en esas condiciones.



En cualquier caso, la temperatura que se alcanza en esas condiciones no llega más allá de 400°C, insuficiente para alcanzar temperaturas de revenido de muchos aceros (600°C), y por tanto, los iones no penetran todo lo que podrían si se alcanzara dicha temperatura. En estos casos el aporte extra de energía para llegar a la temperatura de revenido se haría con el horno de vacío, y de este modo la difusión térmica optimiza el proceso sin comprometer la seguridad.

A la dificultad de tener en cuenta la contribución del calentamiento del bombardeo, se prevé otra dificultad añadida. La implantación iónica es un tratamiento en alto vacío, y el horno introducido en la cámara de vacío no está en contacto con las piezas a tratar, por lo que no habrá transmisión de calor por conducción ni por convección, sino que principalmente será por radiación. La transmisión de calor por conducción se rige por la Ley de Fourier: $Q_k = -kA \frac{T_2 - T_1}{L}$. La transmisión de calor por convección se rige por la Ley de enfriamiento de Newton es: $Q_c = h * A * T$. Y la ecuación que rige la transmisión de calor por radiación es la Ley de Stefan-Boltzmann: $\frac{Q}{A * t} = \epsilon * \sigma * T^4$.

Como se deduce de la ecuación de Fourier y del enfriamiento de Newton, la transmisión de calor por conducción y por convección es lineal, pero la temperatura en la transmisión de calor por radiación va elevada a la cuarta según la Ley de Stefan-Boltzmann, por lo que es de esperar que el sistema no sea lineal, complicando el control.

6. METODOLOGIA

Para llegar al objetivo anteriormente descrito es necesario determinar un modelo del sistema horno-bombardeo. Para ello, se necesita determinar las variables de interés que gobiernan el proceso: esto se desarrolla en el apartado 7, pag.13. Una vez dichas variables están identificadas se deben diseñar ensayos para determinar el comportamiento del sistema. Se realiza una batería de experimentos, suficientemente representativa, en los cuales se introduce una entrada y se registra su respuesta mediante un data-logger: esto se desarrolla en el apartado 9. Desarrollo experimental, pag. 17. A continuación se procede a caracterizar los registros para estudiar su linealidad: apartado 9.1, pag.17 y posteriormente se realizan modelos matemáticos del comportamiento de la planta utilizando técnicas de identificación de sistemas que se detalla en el apartado 10, pag 29. Del análisis de estos ensayos salen los puntos de operación con los que modelar el sistema: apartado 10, pag.40. Se elaboran nuevos experimentos con los puntos de operación seleccionados registrando su respuesta. Sobre estos, se realiza la caracterización de los ensayos que aparece en el apartado 10, pag.41 y se procede a la identificación de sistemas dinámicos con la misma metodología anterior: apartado 10, pag.45. Los resultados anteriores se utilizan para elaborar un controlador que se describe en el apartado 11, pag.51.



7. DETERMINACION DE LAS VARIABLES DE INTERES:

La variable que se debe controlar es la temperatura a la que debe estar sometida la muestra en su proceso de implantación iónica para conseguir el tratamiento superficial deseado y así modificar las propiedades físicas, químicas o tribológicas del material base. Por tanto, la variable de salida debe ser la temperatura de las muestras. Ahora bien, esta temperatura se ve afectada por dos fuentes distintas de energía: el horno situado inmediatamente debajo del plato-soporte sobre el que se colocan las muestras a tratar; y el bombardeo con iones acelerados de alta energía que al impactar sobre las muestras en todas direcciones calientan el material. La contribución de cada una de estas fuentes de calor es distinta y nuestro controlador debe ser capaz de ajustar las variables de entrada para obtener como resultado final el de la temperatura de referencia a la que se quiere realizar el tratamiento. Para ello, necesitamos determinar las variables de entrada de cada fuente de calor que nos servirán como variables de control.

Variables de entrada del horno: El horno tiene una resistencia eléctrica que le proporcionan 8 lámparas halógenas de las que está construido. Por tanto, a una corriente dada le corresponderá una tensión determinada y viceversa. La potencia es el producto de la tensión por la intensidad, por lo tanto, establecida una potencia, a una corriente dada le corresponderá una tensión. Como la energía es el producto de la potencia por el tiempo, a una potencia dada durante un tiempo le corresponderá una energía aplicada.

La corriente del horno es la variable de control. Se le suministra corriente al horno y éste generará energía calorífica que calentará la muestra hasta la temperatura deseada.

Variables de entrada del bombardeo iónico: Tal y como se explicó en el apartado 5.Descripción del proceso, pag 10, las variables que se pueden ajustar para obtener los parámetros de implantación son los siguientes: Tensión del pulso (10KV-40KV), frecuencia de la onda (50Hz-3000Hz) y anchura del pulso (1-100 μ s). De la relación entre la frecuencia y el ancho del pulso se establece el ciclo de trabajo; este no debe superar cierto valor ya que en caso de cortocircuitos el ánodo del generador debe disipar toda la energía del pulso .En función de la tensión del pulso y la corriente de pico, el valor máximo del ciclo de trabajo varía, pero en general no debe superar un 2%. Una vez se han determinado los parámetros anteriores para un proceso, se debe medir el correcto desarrollo de éste. Para supervisar esto, el equipo dispone de una salida escalada de la tensión del pulso y una salida escalada de la corriente media de iones que se están implantando. Estas salidas se llevan a un osciloscopio donde se ve en tiempo real si la duración del pulso es mayor que el tiempo de difusión de la corriente.



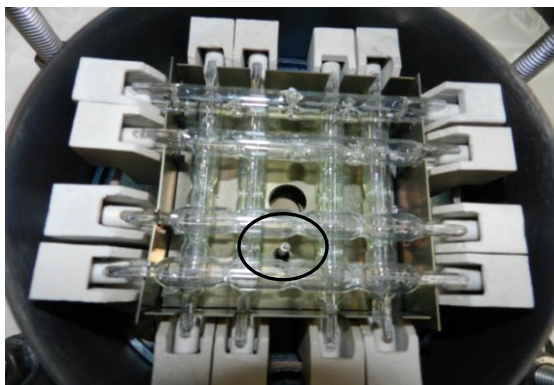
De todas las variables de entrada y salida que usa el implantador para controlar el proceso, utilizaremos las dos salidas que mide el osciloscopio. La corriente media es el resultado de una corriente de pico que está durante el tiempo del ancho de pulso a una frecuencia dada. Es una medida de la combinación de todos los parámetros de entrada ajustables del proceso de implantación. El producto de la tensión del pulso por la corriente media es la potencia aplicada a la muestra, que será la variable de entrada del bloque anticipativo de un sistema feed-forward, ver apartado 11.1, pag 52. Como los parámetros de implantación tienen un valor prefijado y conocido con antelación, cuando se haga el control, se aprovecharán estas dos salidas del implantador para calcular la potencia del bombardeo. La potencia aplicada por el tiempo será la energía con la que contribuye el bombardeo de iones a calentar las piezas en el proceso de implantación. Esta energía provoca calentamiento en las muestras, por lo que debe tenerse en cuenta en el proceso de calentamiento del horno para alcanzar la temperatura de referencia en las muestras.

Para registrar los valores de temperatura, se debe seleccionar un sensor adecuado.

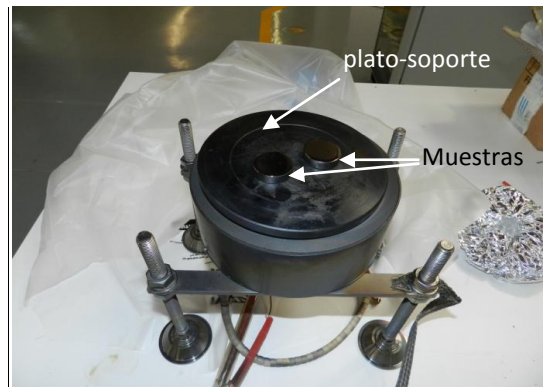
8. ELECCION DEL SENSOR

Se han considerado dos posibles sensores de temperatura.

El horno (Figura 2) es un equipamiento móvil que se introduce dentro de la cámara de vacío del implantador. Este dispone de un termopar que está localizado entre las lámparas halógenas (Figura 2a). No está en contacto con ninguna lámpara ni con el plato-soporte sobre el que se colocan las piezas a tratar. Cuando el sistema está completamente montado, el termopar queda próximo e inmediatamente debajo del plato-soporte, a escasamente 2mm. No está en contacto con el plato-soporte porque está previsto que éste pueda girar con las piezas (ver Figura 2b). Este termopar es de tipo K, es decir, está hecho con la unión de dos metales (cromel/alumel). El cromel es una aleación de Ni-Cr, y el alumel es una aleación de Ni-Al. Tienen un rango de temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.



(a)



(b)

Figura 2: Horno de vacío. (a) Vista de las lámparas y termopar. (b) Vista con plato-soporte montado



El Implantador dispone de un sensor de infrarrojos (pirómetro) alojado en la pared de la cámara de vacío apuntando hacia el plato- soporte sobre el que se colocan las piezas a tratar. La radiación infrarroja que emite el material al ser calentado es percibida por el sensor. El sensor es del modelo Pyrospot DGE 10N de la empresa. Sin embargo, un inconveniente que tiene este sensor es que sólo es capaz de medir valores en el rango de 110°C hasta 1200°C. Esto significa que al no tener medida de temperatura hasta los 110°C, no se dispone de información de temperatura hasta que se alcanza ese valor.

La conclusión que se extrajo de las características y ubicación de nuestros sensores fue que el termopar del horno mediría la temperatura que emite éste desde 0°C hasta el valor final: sería la temperatura de emisión; y por otro lado, el pirómetro de infrarrojos mediría la temperatura de la parte superior del plato-soporte y las piezas que están sobre él: sería la temperatura de recepción, pero con el inconveniente de no tener medida hasta los 110°C.

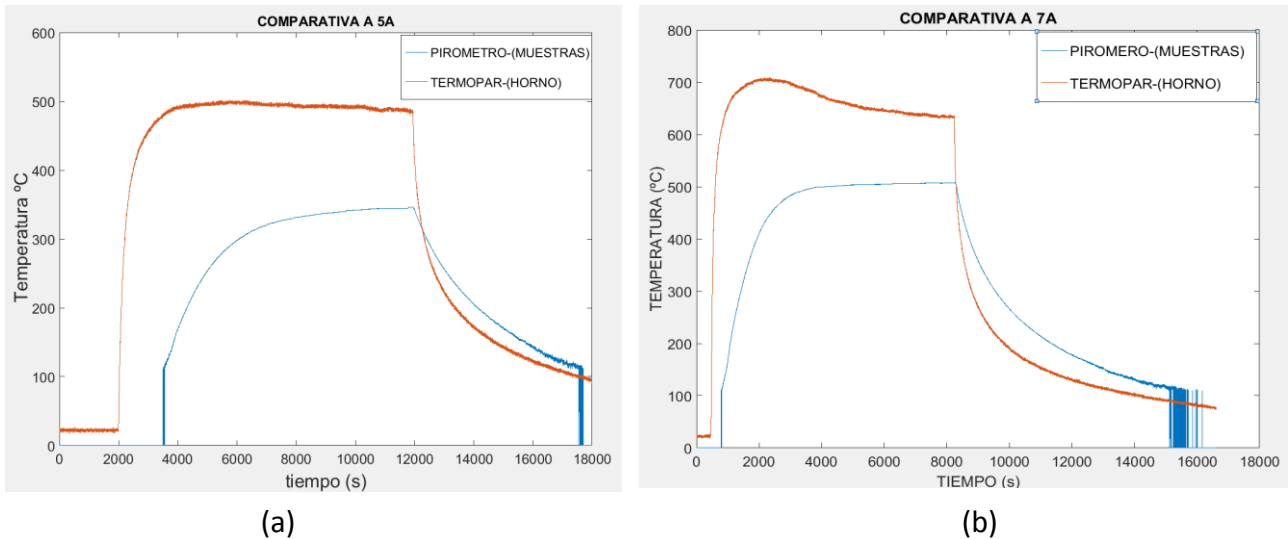
Para poder medir con precisión el valor en mV que produce el termopar, se compró un adaptador de señal configurable que registra la señal procedente de éste. El modelo de adaptador es un dTRANS T05 de la marca JUMO. La configuración del adaptador en relación al tipo de sensor, señal de salida, etc., se llevó a cabo por medio de un programa setup para PC. Se configuró el adaptador para que la señal de entrada fuera la de un termopar tipo K, de esta manera se aprovecha el ajuste de fábrica que trae para éste tipo de sensor. En cuanto a la señal de salida ofrece dos posibilidades: 4...24mV ó 0...10V. Se utilizó la configuración 0...10V. La señal de salida del adaptador se llevó directamente a un data-logger modelo 3224 de la marca PicoScope. Este registra el valor en tensión de la evolución de la temperatura; posteriormente se tratan estos datos en Microsoft Excell para traducir estos valores a temperatura.

El pirómetro de infrarrojos está completamente integrado en el implantador. Físicamente se encuentra en la parte superior de la cámara de vacío anclado a un pasamuros y apuntando hacia el plato-soporte. La señal de salida del sensor llega al PC que gobierna el implantador y mediante un programa en Lab-View gestiona los parámetros del implantador. Es posible obtener un registro de la temperatura mediante una opción de dicho programa donde se puede seleccionar el tiempo de muestreo, el formato del fichero, etc., así como exportar el fichero.

Se realizan varios experimentos con ambos sensores por separado y de forma simultánea. Para ello, se mantiene una corriente constante en el horno hasta que se estabiliza la temperatura, y a continuación se desconecta. Durante el experimento se registra la evolución de la temperatura. En las figuras 3a y 3b se muestra el resultado de un par de experimentos registrando simultáneamente con los dos sensores introduciendo una corriente constante de 5A (Figura 3.a) y 7A (Figura 3.b) hasta estabilizar la temperatura y a continuación se desconecta el horno. En ambos casos se coloca una masa típica de un proceso real sobre el plato-soporte.



Las gráficas de la Figura 3 muestra en rojo la evolución de la temperatura medida con el termopar del horno. Esta temperatura llega por la parte inferior del plato-soporte que se difunde por su masa y llega a las muestras en la forma de la línea azul medida con el pirómetro de infrarrojos.



*Figura 3: Registro de temperatura simultaneo con termopar (horno) y pirómetro de infrarrojos (muestras)
(a) corriente cte. 5A hasta estabilizar temperatura y desconectar el horno.
(b) corriente cte. 7A hasta estabilizar temperatura y desconectar el horno*

En las figura 3a y figura 3b, se puede apreciar la temperatura de inicio de cada tipo de sensor. En el termopar del horno (línea roja) comienza en 20°C, que es la temperatura ambiente del laboratorio. En el pirómetro de infrarrojos (línea azul) no hay registro de temperatura hasta que las muestras alcanzan 110 °C . Una vez se ha desconectado el horno para enfriar, ocurre lo mismo al final del registro del pirómetro de infrarrojos: al llegar a 110°C hay una serie de pérdidas de medida cuando éstas rondan los 110°C.

Como se puede ver en las figuras 3a y 3b, la evolución de la temperatura se asemeja a la respuesta de un sistema de primer orden ante entrada escalón, aunque con algunas diferencias entre los dos sensores.

Otro detalle a tener en cuenta es que estos experimentos son largos: alrededor de 16.000 segundos (4,5 horas) sólo de registro de datos. Si se añaden los preparativos del experimento y otros problemas propios del vacío traen como resultado una fase experimental muy larga.

Cuando se pasó a la fase de caracterizar la temperatura del bombardeo iónico utilizando el magnetrón como fuente de calor, nos encontramos con que el registro de la señal del termopar del horno estaba absolutamente contaminada por ruido eléctrico procedente de la fuente de radiofrecuencia que alimenta al magnetrón: la medida era inservible. Aunque sería posible filtrarla y tratarla, el estudio de esta posibilidad complicaría el proyecto.



Después de analizar las ventajas e inconvenientes de cada sensor se decidió que la variable de la temperatura se mediría con el pirómetro de infrarrojos, y que el inconveniente de no tener medida de la temperatura hasta los 110 grados se abordaría en la implementación del sistema aplicando una corriente que lleve hasta esa temperatura en lazo abierto, y a partir de ahí actuaría el controlador.

9. DESARROLLO EXPERIMENTAL:

En este apartado se presentan una serie de ensayos cuya respuesta ha sido registrada con el pirómetro de infrarrojos que posee el implantador apuntando a las muestras. Se han realizado también ensayos con el termopar del horno e incluso con el pirómetro y el termopar simultáneamente, pero únicamente se exponen los realizados con el pirómetro ya que es el sensor seleccionado.

Los experimentos se realizan introduciendo un escalón de corriente de cierto valor y registrando la evolución de la temperatura hasta llegar a su estabilización. Una vez se había estabilizado, se procedía a revertir el escalón, es decir, pasar del valor de corriente establecido a cero amperios en un escalón descendente y registrando la evolución de la temperatura en su recorrido hacia temperatura ambiente.

Se decide realizar la caracterización sobre escalones, es decir, señales de baja frecuencia, porque interesa determinar especialmente la temperatura final del proceso más que caracterizar con precisión la velocidad de respuesta del sistema para el que se necesitaría excitar con frecuencias más altas.

A la hora de modelar el sistema, se ha incidido en el estudio del calentamiento y no del enfriamiento. Esto se ha hecho así porque la implantación se diseña de manera que la temperatura sea creciente, ya que el plato-soporte no está refrigerado y por tanto no podemos actuar sobre el enfriamiento de las muestras.

9.1 CARACTERIZACION DEL HORNO DE VACIO

Con el fin de evaluar la linealidad del sistema, se realiza una batería de experimentos a distintos valores de entradas registrando la evolución de la salida.

Se cuantifica la falta de linealidad en el rango de operación que utiliza nuestro proceso de tratamiento. Este rango abarca desde temperatura ambiente hasta 650 °C.

Se aprecia en los registros cierto nivel de ruido. Esto es así porque se recogen los datos directamente del sensor. Para realizar el control del sistema real sería preciso eliminar



el ruido mediante un filtrado analógico a la entrada del autómata del implantador iónico para evitar problemas de aliasing.

Se observa que los registros realizados pueden representarse bien con un sistema de primer orden. Utilizando la fórmula de respuesta ante escalón de un sistema de primer orden se calcula la constante de tiempo de cada registro.

Si el sistema fuese de primer orden, la evolución de la temperatura vendría dada por la siguiente ecuación:

$$T(t) - T_o = (T_f - T_o) \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

Despejando la constante de tiempo (τ):

$$\frac{T(t) - T_o}{T_f - T_o} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} ; \quad e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{T(t) - T_o}{T_f - T_o} ; \quad e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{T_f - T(t)}{T_f - T_o} ;$$
$$\frac{-t}{\tau} = \ln \left(\frac{T_f - T(t)}{T_f - T_o} \right) ; \quad \ln \left(\frac{T_f - T(t)}{T_f - T_o} \right) = -\frac{1}{\tau} * t \quad (\text{ecu. 1.1})$$

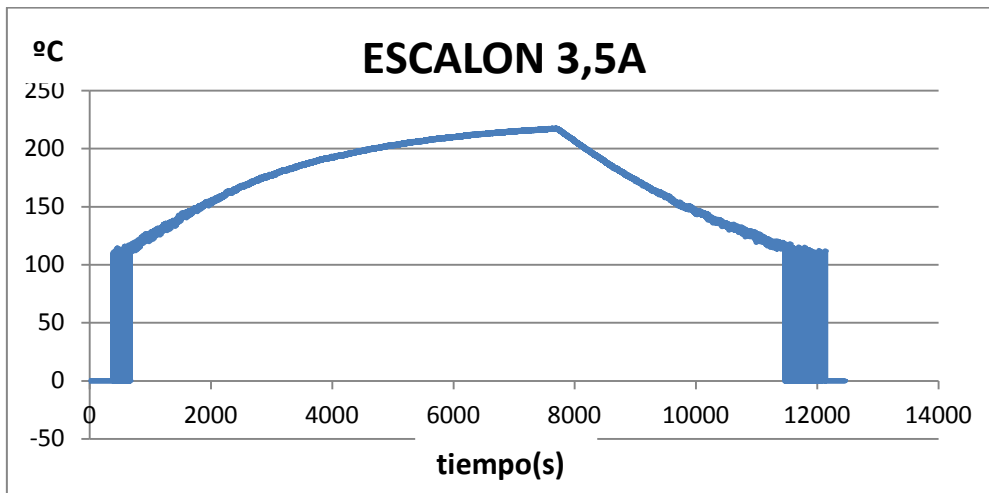
Como se puede observar, la inversa de la pendiente de la recta que se deduce de la ecuación 1.1, es la constante de tiempo (τ).

Si tenemos registros con datos de la evolución de la temperatura, se puede utilizar Microsoft Excell para representar la recta de la ecuación 1.1

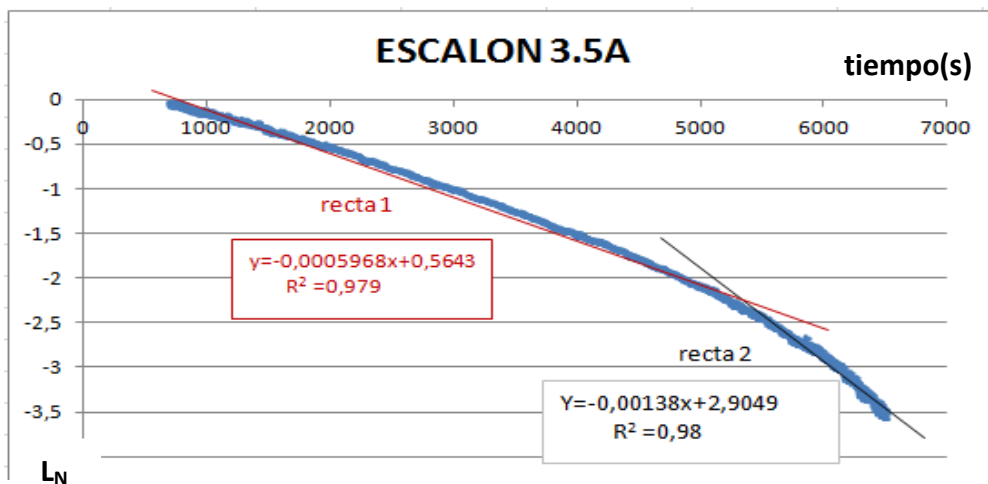
A continuación se exponen algunos de los experimentos realizados. En ellos, se representa el registro de la evolución en el tiempo de la temperatura ante una entrada escalón de una corriente determinada. Junto al registro de temperatura se muestra la recta de la constante de tiempo y su ajuste por mínimos cuadrados realizados con Excell.



ENTRADA ESCALON 3,5A



(a)



b)

Figura 4: (a) Temperatura ante escalón de 3,5Amp. (b) estimación de la constante de tiempo.

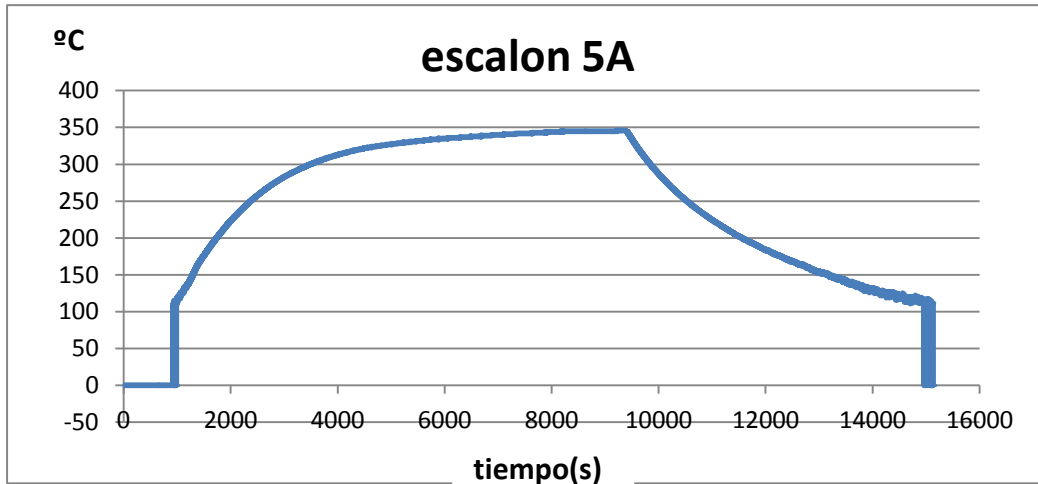
La figura 4.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 3,5 Amperios y una vez estabilizada la temperatura se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 4.b muestra la estimación de la constante de tiempo sólo del calentamiento. En ella se aprecia la falta de linealidad. Un ajuste lineal por mínimos cuadrados necesita de al menos 2 rectas con pendientes muy distintas para tratar de aproximar la respuesta.

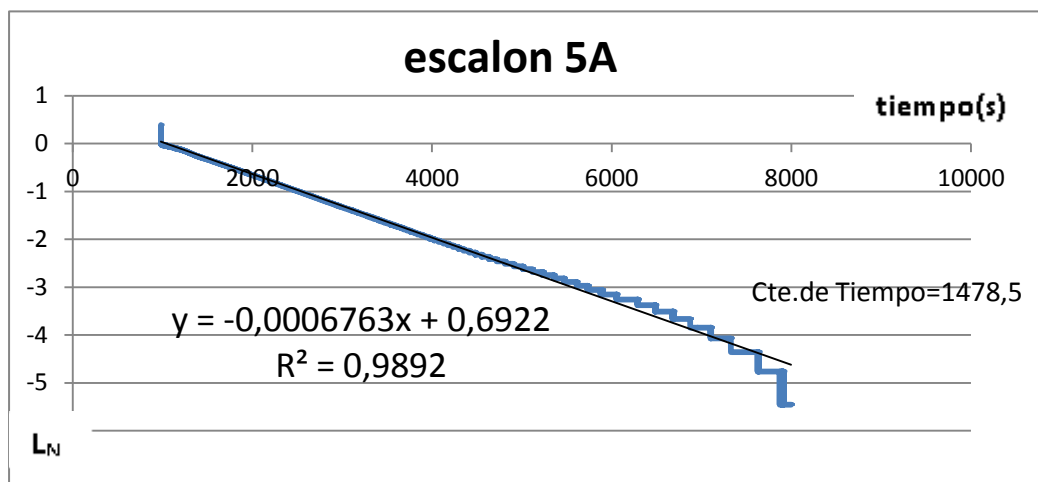
En la estimación realizada, la primera recta llega hasta 5000 segundos y la temperatura 185 grados. La segunda recta llega hasta el final del registro, es decir hasta los 217 grados.



ENTRADA ESCALON 5A



(a)



(b)

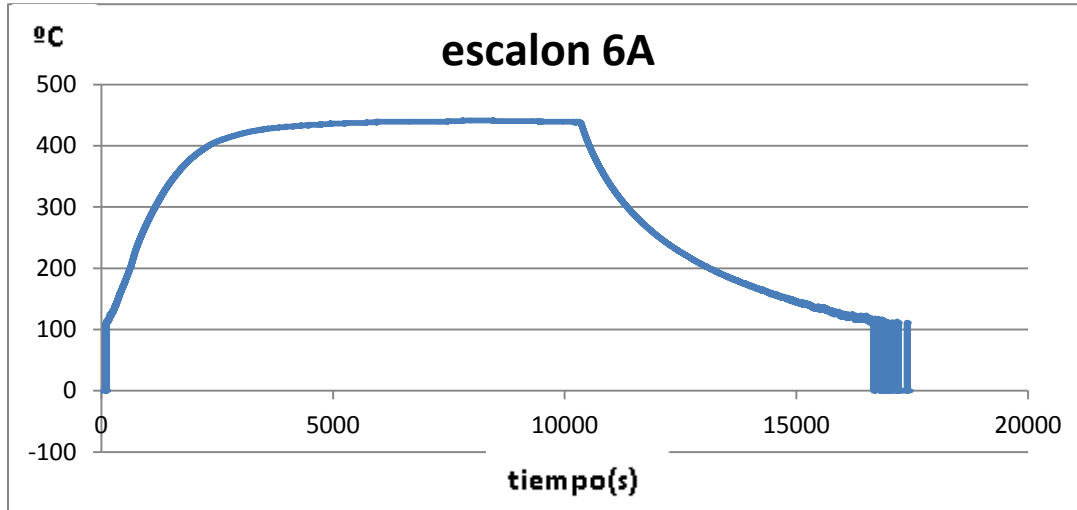
Figura 5: (a) Temperatura ante escalón de 5Amp. (b) estimación de la constante de tiempo

La figura 5.b representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 5 Amperios y una vez estabilizada la temperatura se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

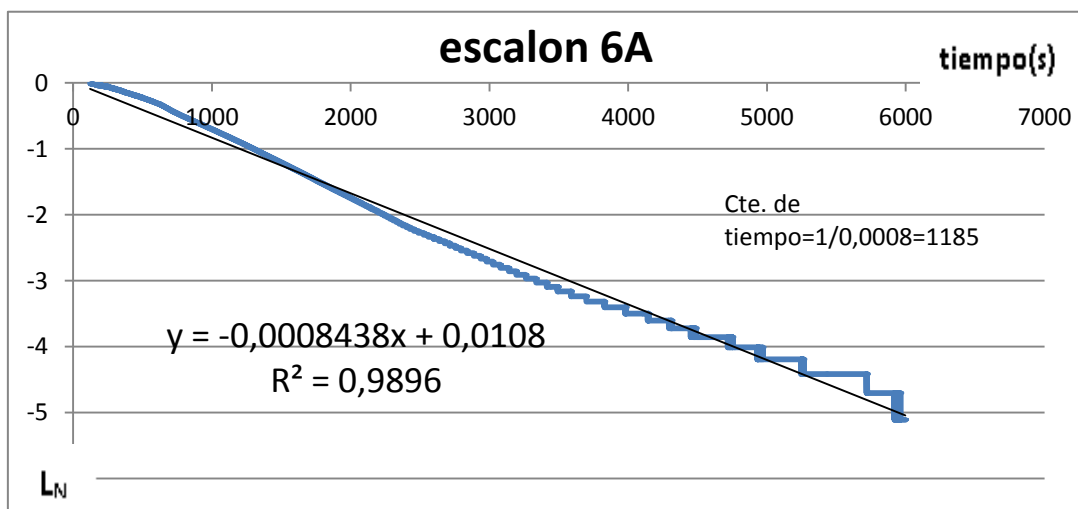
La gráfica 5a muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede deducir que la aproximación lineal con una sola recta es aceptable, aunque a partir de 4000 segundos se aprecia un cambio de pendiente. Esto se corresponde con 300 grados.



ENTRADA ESCALON 6A



(a)



(b)

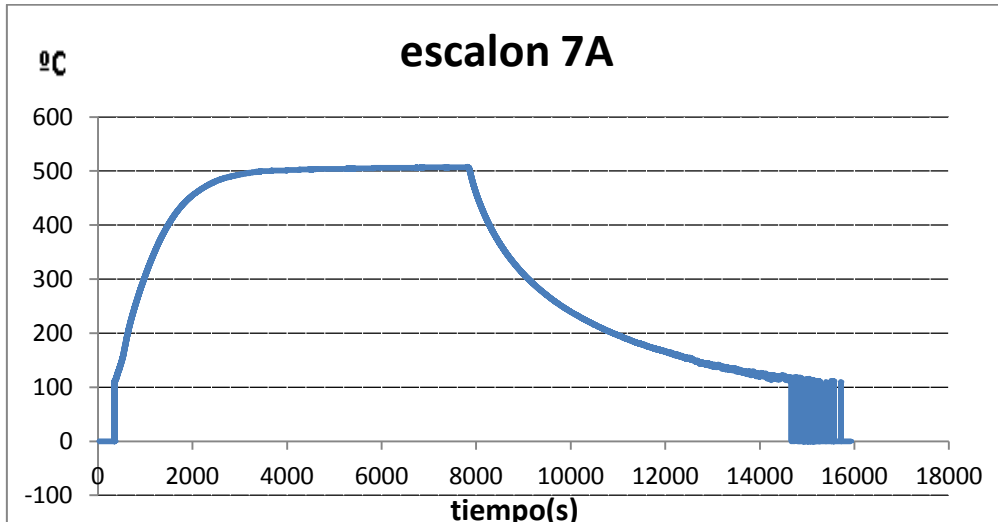
Figura 6: (a) Temperatura ante escalón de 6Amp. (b) estimación de la constante de tiempo

La figura 6.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 6 Amperios y una vez estabilizada la temperatura se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

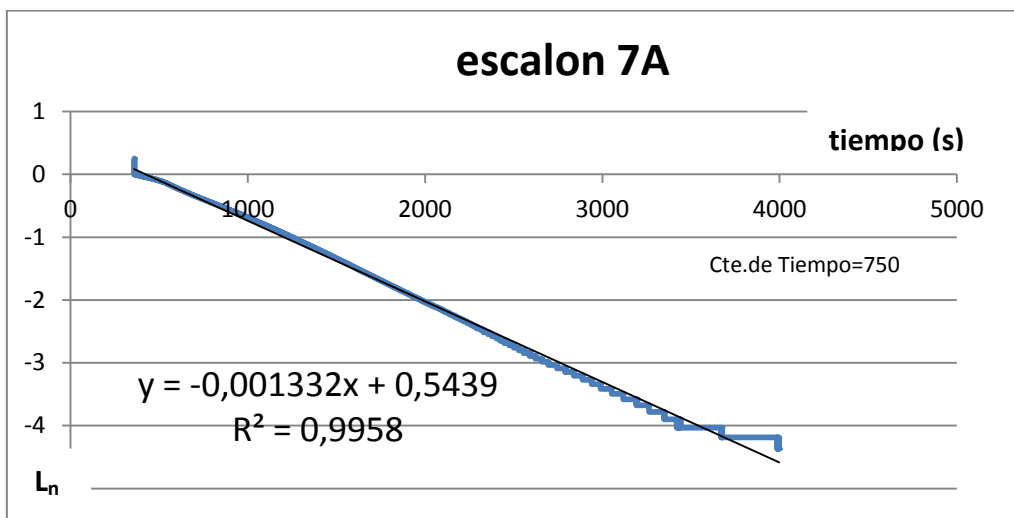
La figura 6.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se aprecian cambios de pendiente: Desde 0 hasta 600 segundos donde llega a 180 grados; desde 600 hasta 2000 segundos donde llega a 350 grados; y desde 2000 segundos hasta el final del registro donde llega a 400 grados.



ENTRADA ESCALON 7A



(a)



(b)

Figura 7: (a) Temperatura ante escalón de 7Amp. (b) estimación de la constante de tiempo

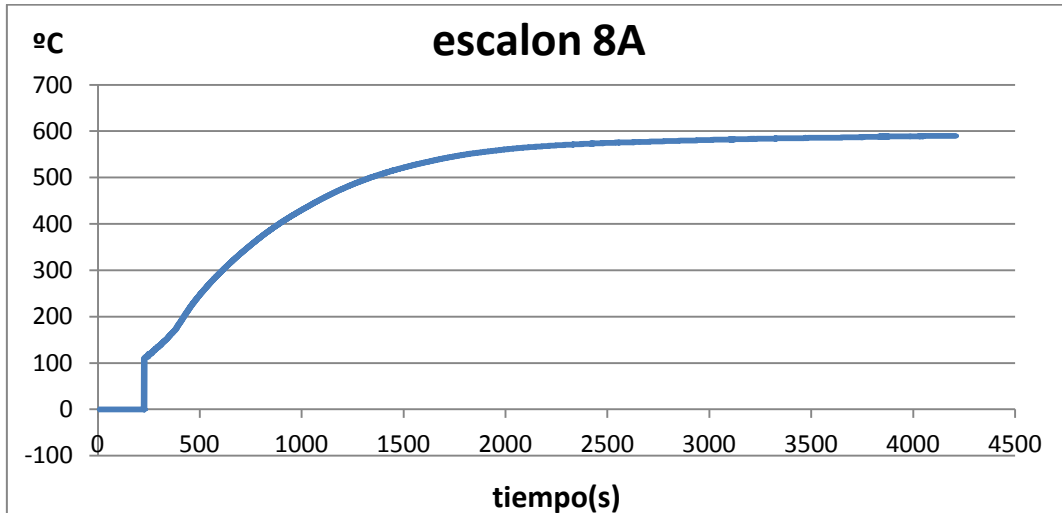
La figura 7.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 7 Amperios y una vez estabilizada la temperatura se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 7.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede apreciar cambios de pendiente. Desde 0 hasta 500 segundos donde llega a 190 grados. Desde 500 segundos hasta 1200 segundos donde llega a 325

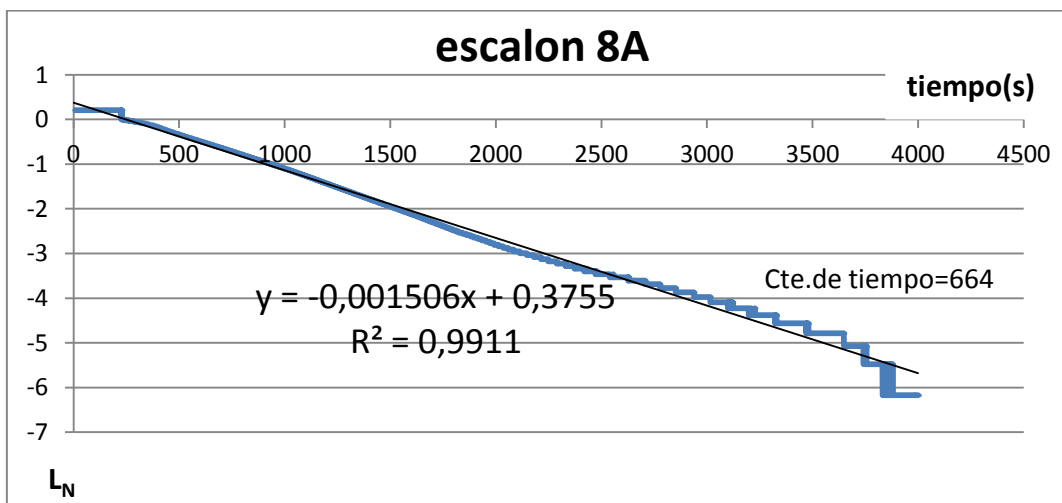


grados. Desde 1200 hasta 2600 segundos donde llega a 450 grados. Desde 2600 segundos hasta el final del registro donde llega a 510 grados.

ENTRADA ESCALON 8A



(a)



(b)

Figura 8: (a) Temperatura ante escalón de 8Amp. (b) estimación de la constante de tiempo

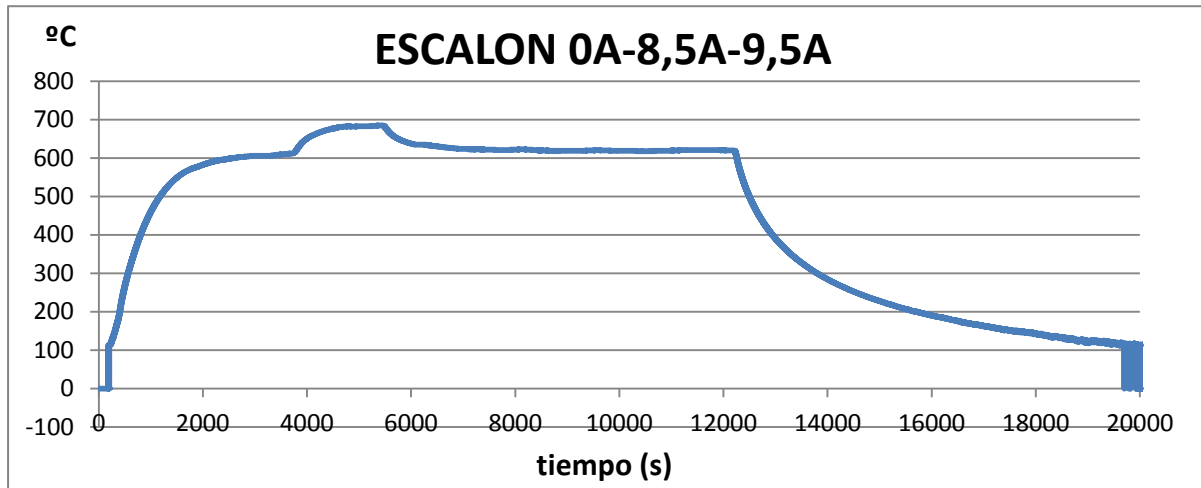
La figura 8.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 8 Amperios y una vez estabilizada la temperatura se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 8.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede apreciar cambios de pendiente: Desde 200 hasta 400 seg.

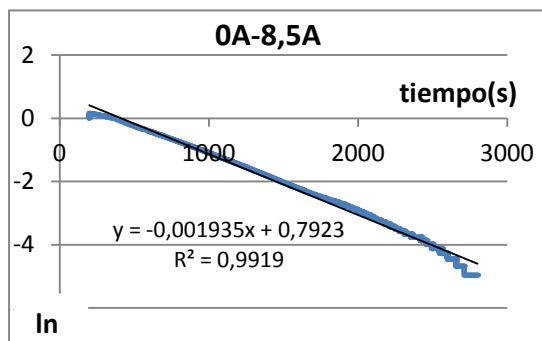


donde llega a 180 grados. Desde 400 segundos hasta 800 segundos donde llega a 350 grados. De 800 a 2000 segundos donde llega a 540 grados. Desde 2000 segundos hasta el final donde llega a 590 grados.

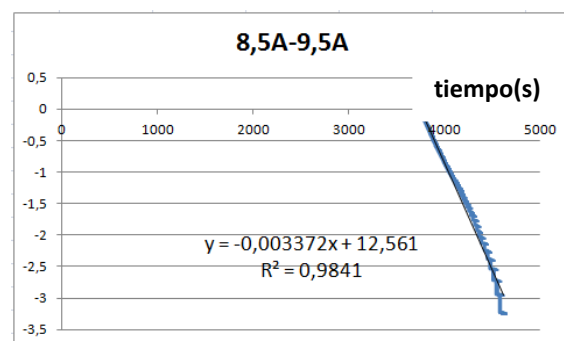
ENTRADA ESCALON 0A - 8,5A- 9,5A



(a)



(b)



(c)

Figura 9:(a) Temperatura ante dos escalones consecutivos: 0A - 8,5A y 8,5A - 9,5A) (b) estimación de la constante de tiempo para escalón 0A-8,5A. (c) estimación de constante de tiempo para escalón 8,5A-9,5A.

La figura 9.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministran dos escalones consecutivos de corriente. El primero va de 0Amp. a 8,5Amp. y se mantiene hasta que la temperatura se estabiliza. A continuación, se eleva la corriente a 9,5Amp. y se vuelve a esperar a que se estabilice la temperatura. Una vez estabilizada se apaga el horno. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

Las gráficas 9b y 9c representan la estimación de las constantes de tiempo de los dos escalones efectuados respectivamente. La figura 9b pertenece al escalón 0A - 8,5A. La figura 9c pertenece al escalón 8,5A - 9,5A. En la gráfica 9.b del primer escalón se aprecian las mismas pendientes observadas en la gráfica 8b. En la gráfica 9.c del



segundo escalón se pueden apreciar al menos dos pendientes distintas. Como se puede ver en las ecuaciones de las rectas de los dos escalones, la pendiente de la recta del segundo escalón, gráfica 9c, casi duplica a la del primero, gráfica 9b.

9.2 CARACTERIZACION DEL BOMBARDEO IÓNICO

Con el fin de evaluar la linealidad del efecto del bombardeo iónico sobre las muestras, se diseñaron una serie de experimentos.

Tal y como se mencionó en el apartado 7: Determinación de las variables de interés pàg.13, la variable de entrada que se utilizará para registrar la evolución de la temperatura será la potencia aplicada. La alta tensión aplicada y la corriente media suministrada es un valor conocido con antelación; por tanto, la potencia proporcionada será el producto de la alta tensión por la corriente media. Es decir, se suministran distintas potencias con valores de alta tensión prefijados.

En las gráficas que se exponen a continuación se observará que la evolución de la temperatura ante entradas escalón a distintas potencias se aproxima bien a un sistema de primer orden.

ENTRADA ESCALON 10KV (200W)

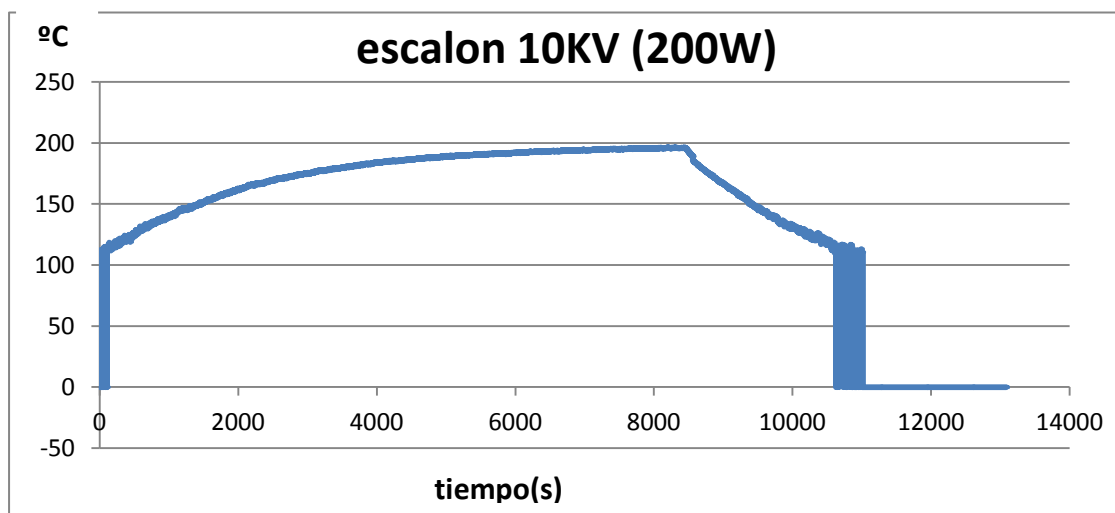


Figura 10.a: Temperatura ante escalón de 200W (10KV)

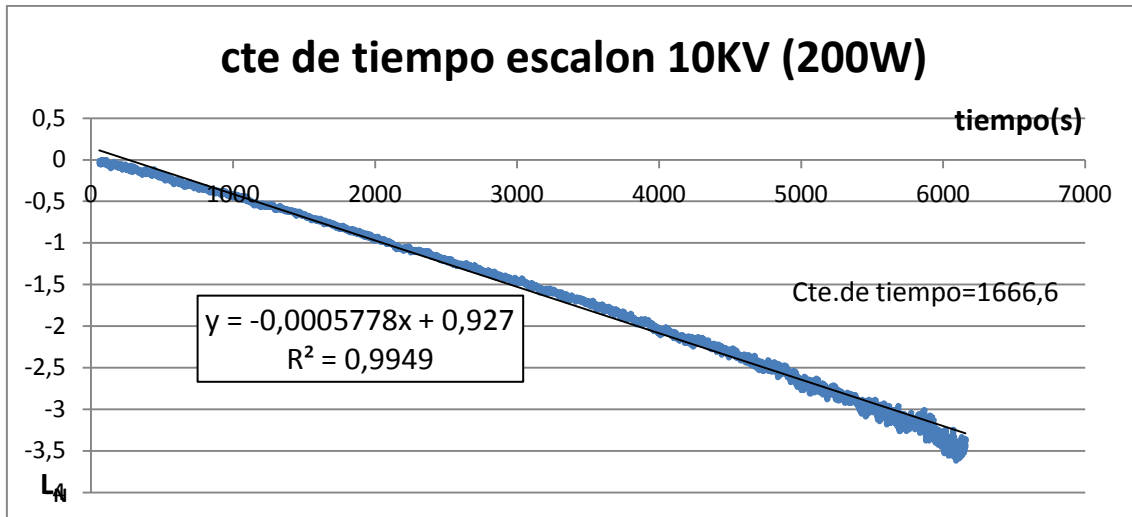


Figura 10.b: estimación de la constante de tiempo para entrada escalón de 200W

La figura 10.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando generador se le suministra un escalón de 200W a 10KV. Una vez estabilizada la temperatura se apaga el generador. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 10.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede apreciar que el ajuste lineal por mínimos cuadrados con una sola recta del aumento de la temperatura es asumible, salvo un cambio dependiente en los primeros 400 segundos.

ENTRADA ESCALON 20KV (800W)

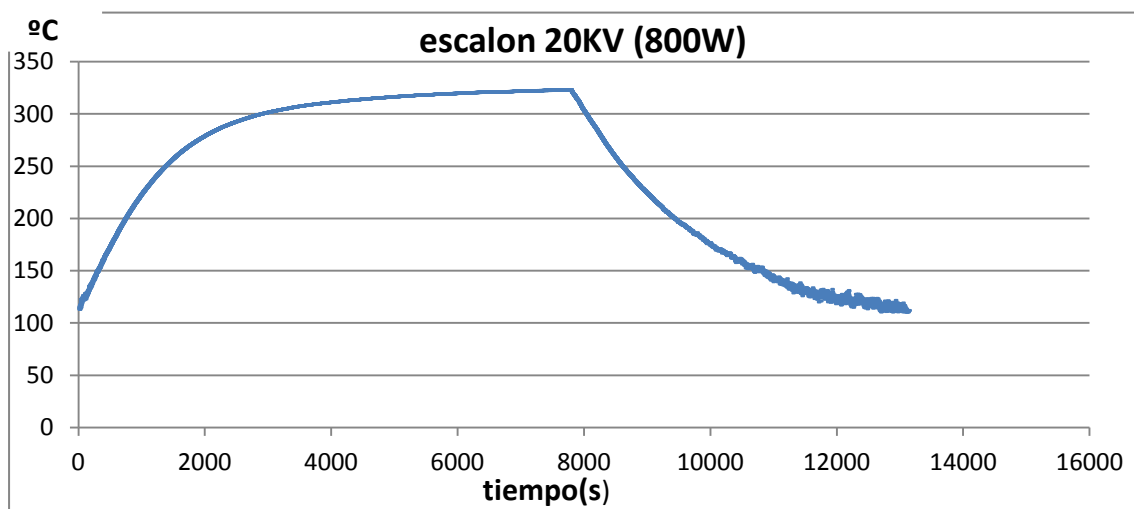


Figura 11.a: Temperatura ante escalón de 800W (20KV)

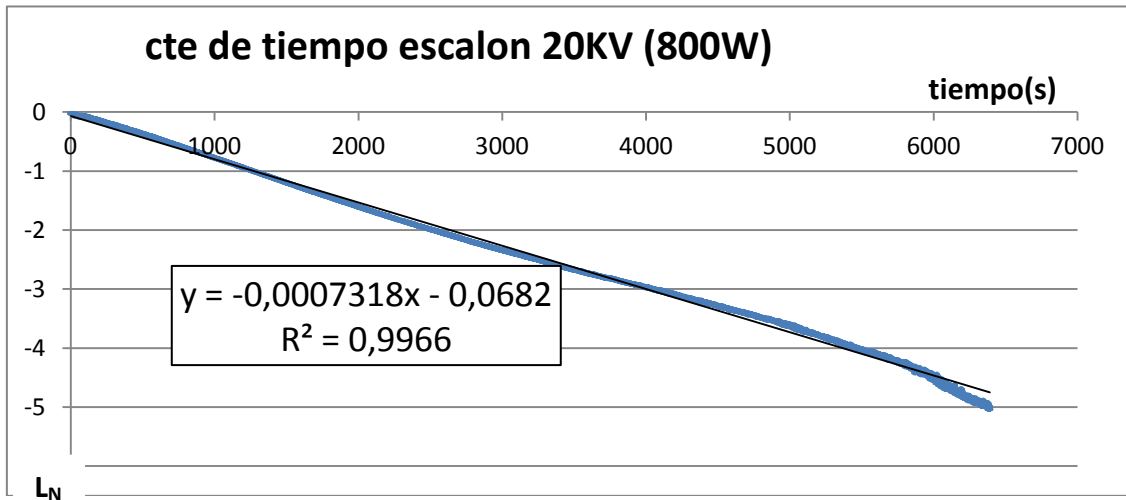


Figura 11.b: estimación de la constante de tiempo para entrada escalón de 800W

La figura 11.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando generador se le suministra un escalón de 800W a 20KV. Una vez estabilizada la temperatura se apaga el generador. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 11.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede apreciar que el ajuste lineal por mínimos cuadrados con una sola recta del aumento de la temperatura es asumible, salvo un cambio de pendiente a partir de los 5800 segundos.

ENTRADA ESCALON 30KV (2400W)

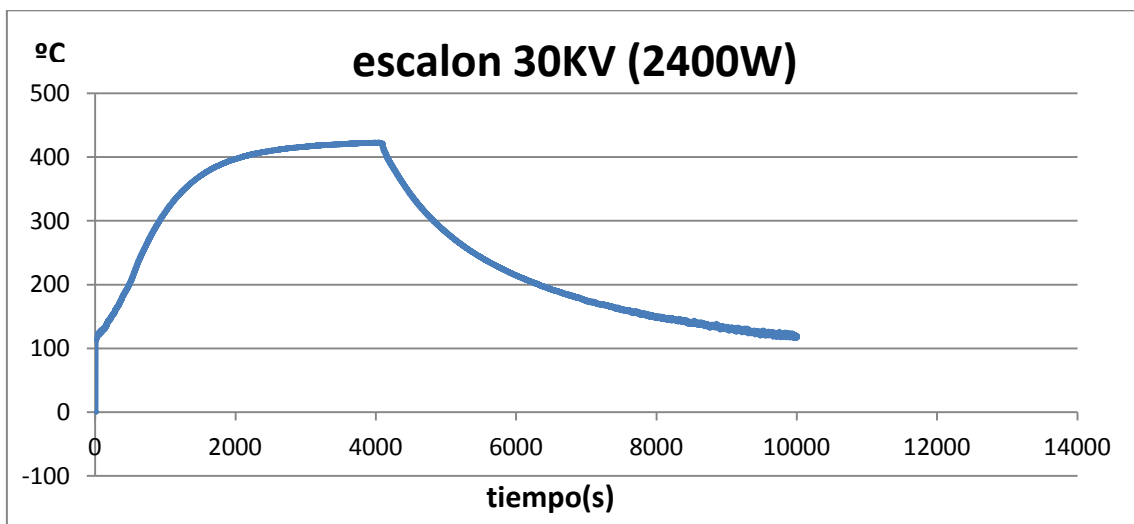


Figura 12.a: Temperatura ante escalón de 2400W (30KV)

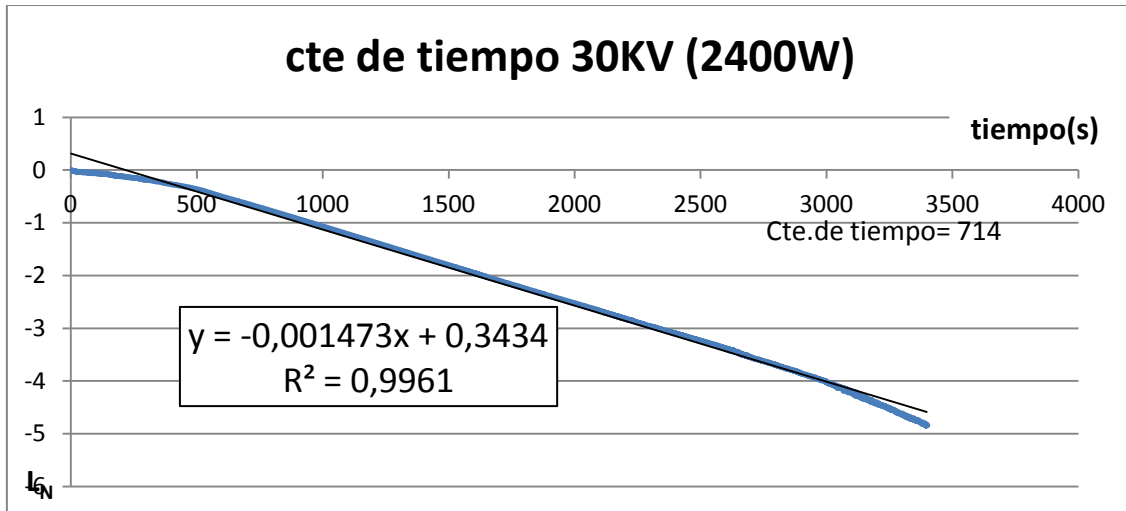


Figura 12.b: estimación de la constante de tiempo para entrada escalón de 2400W

La figura 12.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando generador se le suministra un escalón de 2400W a 30KV. Una vez estabilizada la temperatura se apaga el generador. Al principio y al final del registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C. Se puede apreciar que el tiempo de estabilización respecto a los escalones anteriores, figura 11.a y figura 10.a, ha disminuido prácticamente a la mitad.

La figura 12.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Se puede apreciar que el ajuste lineal por mínimos cuadrados con una sola recta del aumento de la temperatura es asumible, salvo dos cambios de pendiente respecto a la recta de regresión. Uno al principio: desde 0 segundos hasta 500 segundos; y otro al final: desde 3000 segundos hasta el final.



10. MODELOS MATEMATICOS DE LA PLANTA

Una vez obtenida la caracterización de las dos fuentes de calor que contribuyen a la temperatura de las muestras, se utilizaron técnicas de identificación de sistemas dinámicos que ofrecen algunos programas informáticos. En este caso se utilizó la Toolbox IDENT que incorpora el programa MATLAB [5]. Apoyándonos en los datos de las constantes de tiempo analizadas en el apartado 9.1 y 9.2 de la caracterización, identificaremos la planta y se validarán las funciones de transferencia.

A continuación se exponen la identificación del horno y del bombardeo iónico con los mismos escalones que se utilizaron para realizar la caracterización.

10.1 IDENTIFICACION DEL HORNO DE VACIO

ENTRADA ESCALON 3,2A

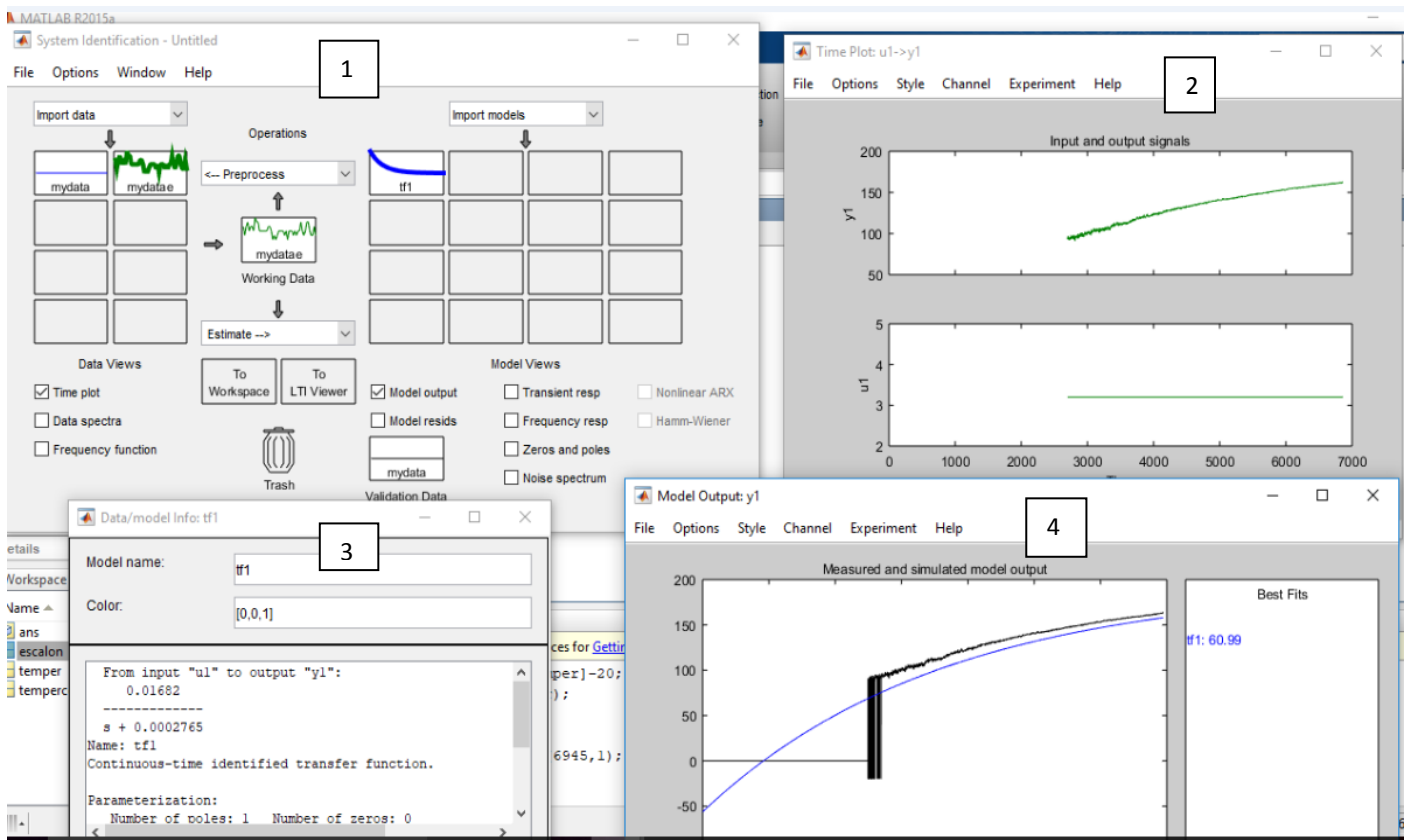


Figura 13: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 3,2 Amperios.



En la figura 13 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 3,2 A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 13, que a pesar de que el registro no llegó hasta la estabilización de la temperatura, el programa es capaz de calcular una función de transferencia que ajusta aceptablemente la respuesta.

ENTRADA ESCALON 3,5A

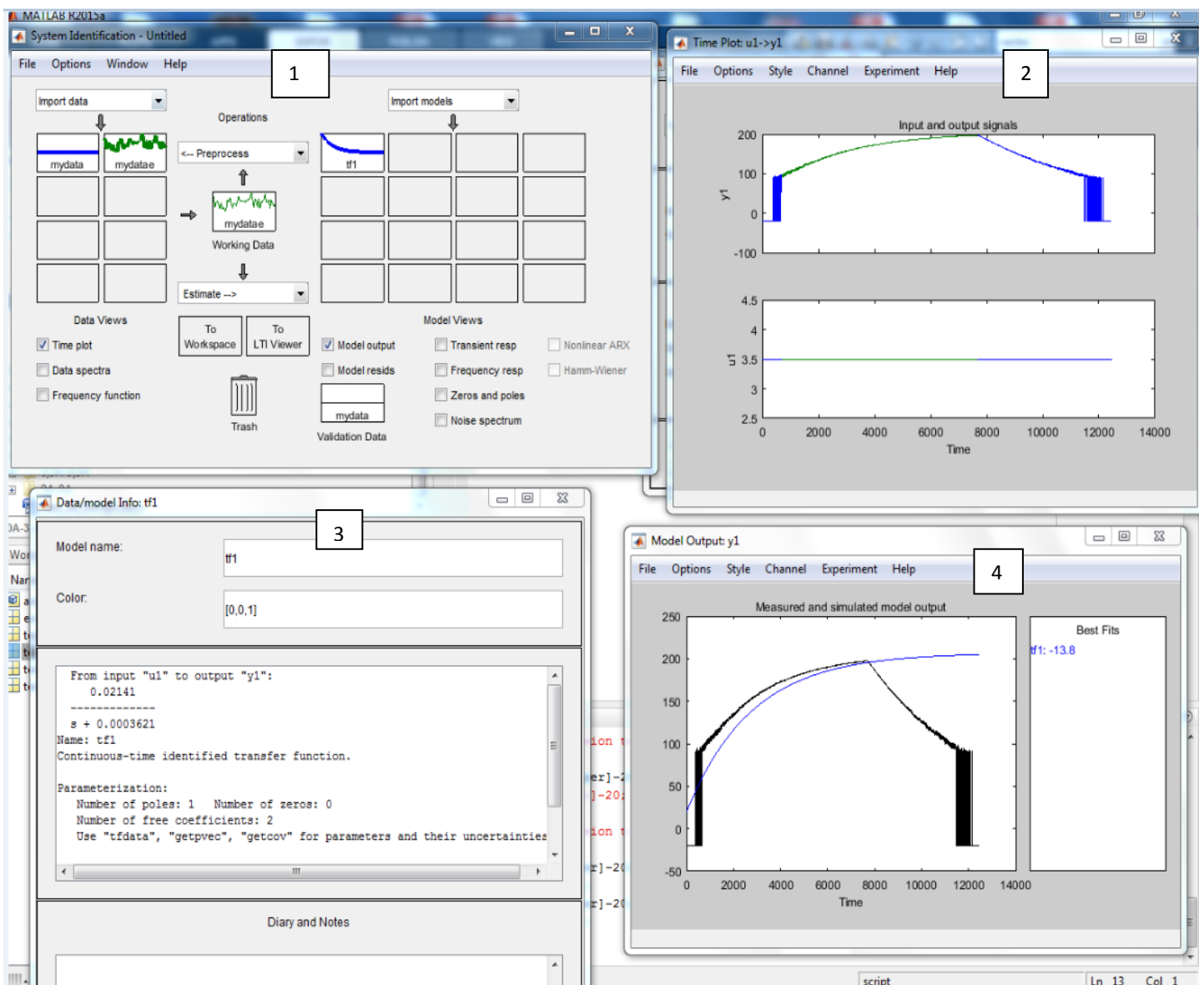


Figura 14: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 3,5 Amperios.



Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 14, que a pesar de que el registro no llegó hasta la estabilización de la temperatura, el programa es capaz de calcular una función de transferencia que ajusta aceptablemente la respuesta.

En la figura 14 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 3,2 A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Se puede ver en el bloque 2 de la figura 14, que a pesar de que el ensayo no tiene datos al inicio del registro ni se ha llegado a la estabilización de la temperatura final, el software es capaz de hacer la identificación del sistema de manera aceptable mediante un sistema de primer orden. También se observa que sólo se toman para la identificación los datos correspondientes al calentamiento por las razones expuestas en el apartado 9. Desarrollo experimental, pag17.

ENTRADA ESCALON 5A

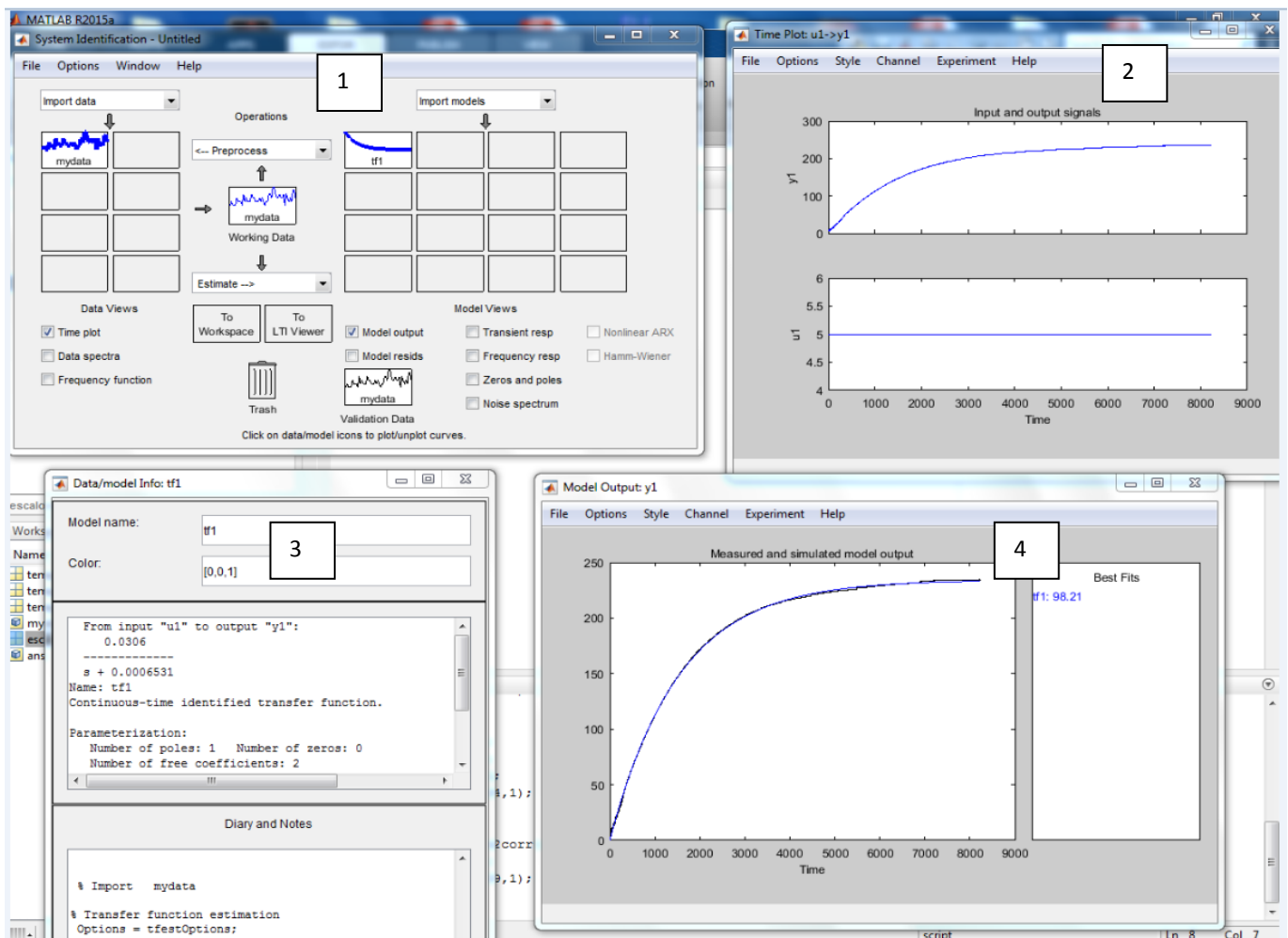


Figura 15: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 5 Amperios.



En la figura 15 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 5A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real. Como se puede apreciar en el bloque 4 de la figura 15, la función de transferencia ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden: $Tf = \frac{0.0306}{s+0.0006531}$

La función de transferencia tiene la forma $TF = \frac{a}{s+\frac{1}{\tau}}$, y la ecuación de la respuesta de una función de primer orden ante entrada escalón utilizada en la caracterización de la planta es: $Ln\left(\frac{Tf-T(f)}{Tf-To}\right) = -\frac{1}{\tau} * t$, ver pag 18. Por tanto la inversa del polo de la función de transferencia $Tf = \frac{0.0306}{s+0.0006531}$ y la inversa de la pendiente de la recta de regresión de la caracterización de la figura 5.b, pag.20 es la constante de tiempo. Comparándolas respectivamente, 1531 segundos y 1478 segundos, vemos que el valor es muy similar.

ENTRADA ESCALON 6A

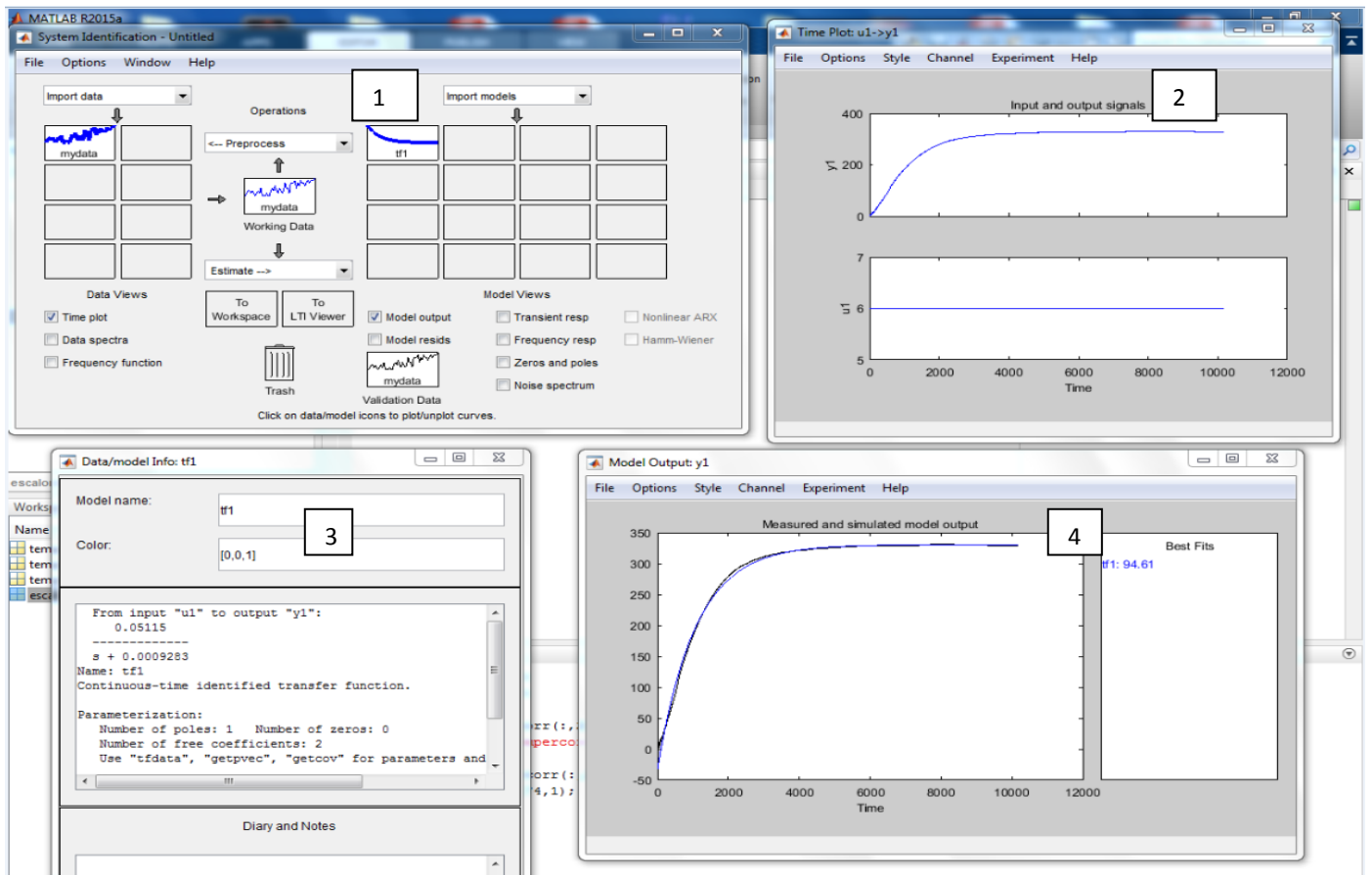


Figura 16: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 5 Amperios.



En la figura 16 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 5A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Como se puede apreciar en el bloque 4 de la figura 15, la función de transferencia ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden: $Tf = \frac{0.05115}{s + 0.0009283}$.

La función de transferencia tiene la forma $TF = \frac{a}{s + \frac{1}{\tau}}$, y la ecuación de la respuesta de una función de primer orden ante entrada escalón utilizada en la caracterización de la planta es: $Ln\left(\frac{Tf - T(f)}{Tf - T_o}\right) = -\frac{1}{\tau} * t$, ver pag 18. Por tanto la inversa del polo de la función de transferencia $Tf = \frac{0.05115}{s + 0.0009283}$ y la inversa de la pendiente de la recta de regresión de la caracterización de la figura 6.b, pag21 es la constante de tiempo. Comparándolas respectivamente, 1077 segundos y 1185 segundos, vemos que el valor es muy similar.

ENTRADA ESCALON 7A

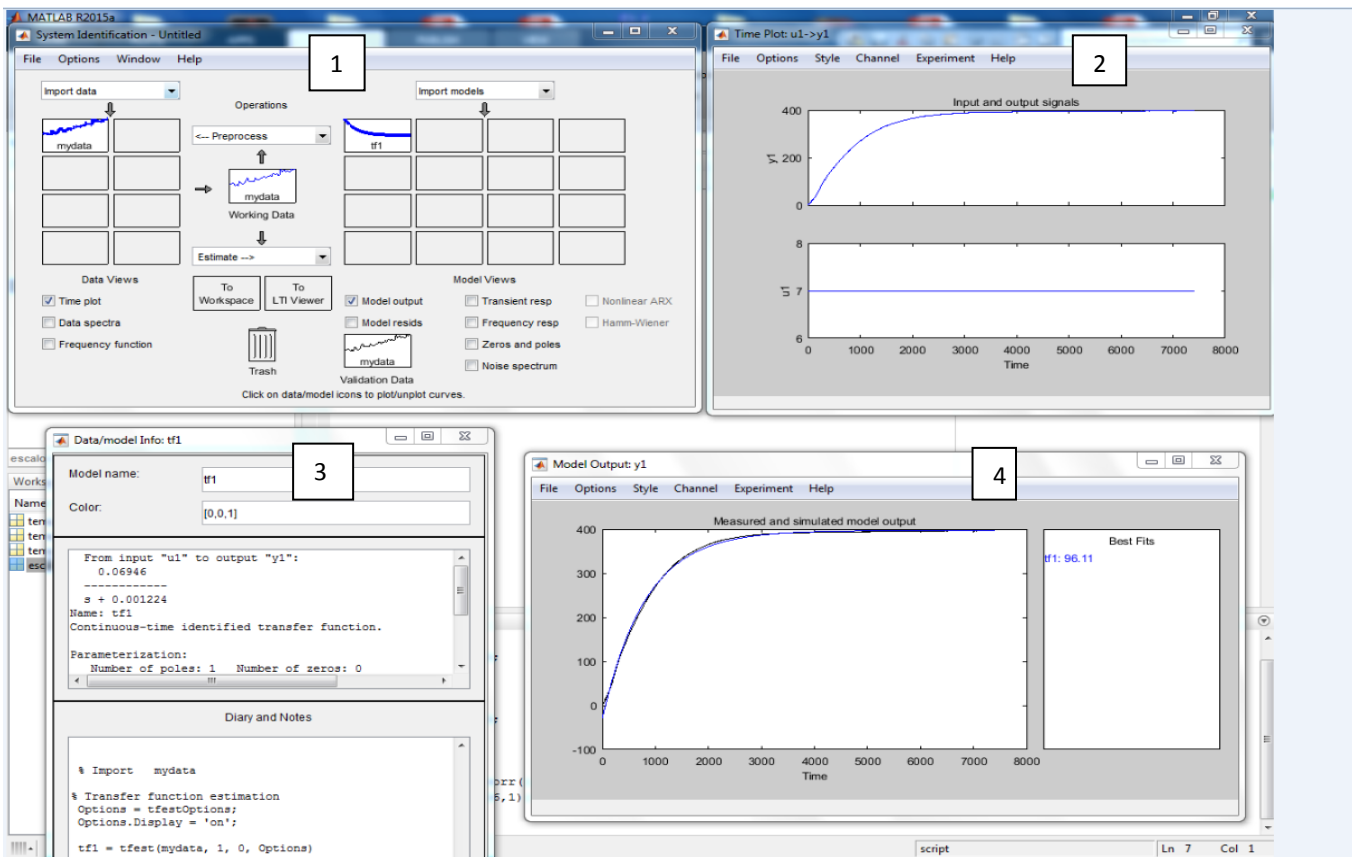


Figura 17: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 7 Amperios.



En la figura 17 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 5A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Como se puede apreciar en el bloque 4 de la figura 17, la función de transferencia ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden: $Tf = \frac{0.06946}{s+0.001224}$.

La función de transferencia tiene la forma $TF = \frac{a}{s+\frac{1}{\tau}}$, y la ecuación de la respuesta de una función de primer orden ante entrada escalón utilizada en la caracterización de la planta es: $Ln\left(\frac{Tf-T(f)}{Tf-To}\right) = -\frac{1}{\tau} * t$, ver pag 18. Por tanto la inversa del polo de la función de transferencia $Tf = \frac{0.06946}{s+0.001224}$ y la inversa de la pendiente de la recta de regresión de la caracterización de la figura 7.b, pag22 es la constante de tiempo. Comparándolas respectivamente, 816 segundos y 750 segundos, vemos que el valor es muy similar.

ENTRADA ESCALON 4,2A – 7A

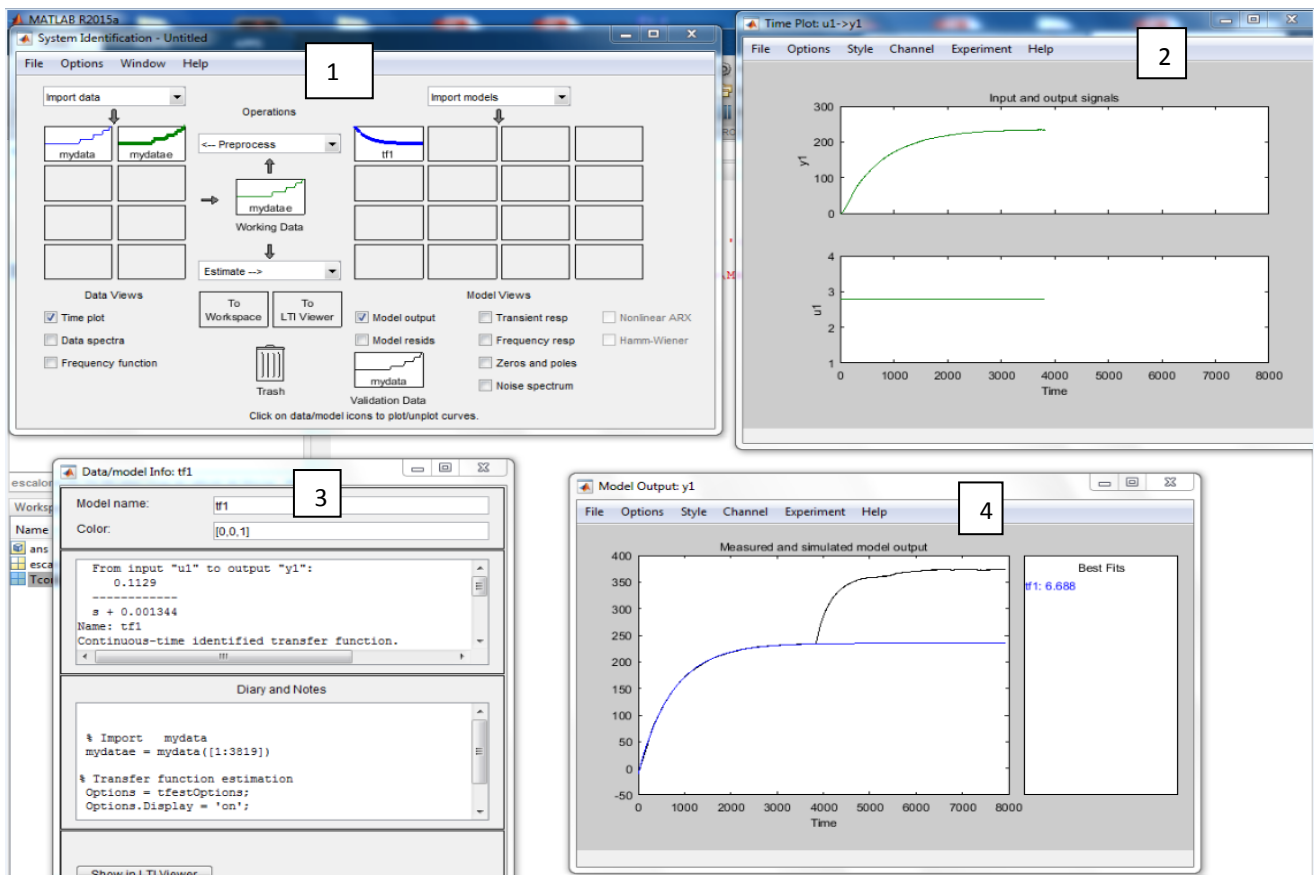


Figura 18: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para el escalón de corriente 4,2A-7A.



En el bloque 4 de la figura 19 se puede ver la representación de dos escalones consecutivos. El primer escalón se realiza desde 4,5A hasta 7A; el segundo, desde 7A hasta 9A. Sin embargo, la identificación que se hace en la figura 19 es solamente relativo al primer escalón: 4,2A – 7A.

En la figura 18 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón 4,2A - 7A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

En la figura 18 se obtiene la relación entre la variación de la temperatura con la variación de la corriente, respecto de un punto de operación; en este caso, del primer escalón de corriente 4.5A – 7A, ver bloque 4 de la figura 18. Como se puede apreciar, la función de transferencia ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden: $Tf = \frac{0.1129}{s+0.001344}$.

Se puede observar en la figura 18 bloque 4 que la función de transferencia del primer escalón ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden.

ENTRADA ESCALON 8,5A – 9,5A

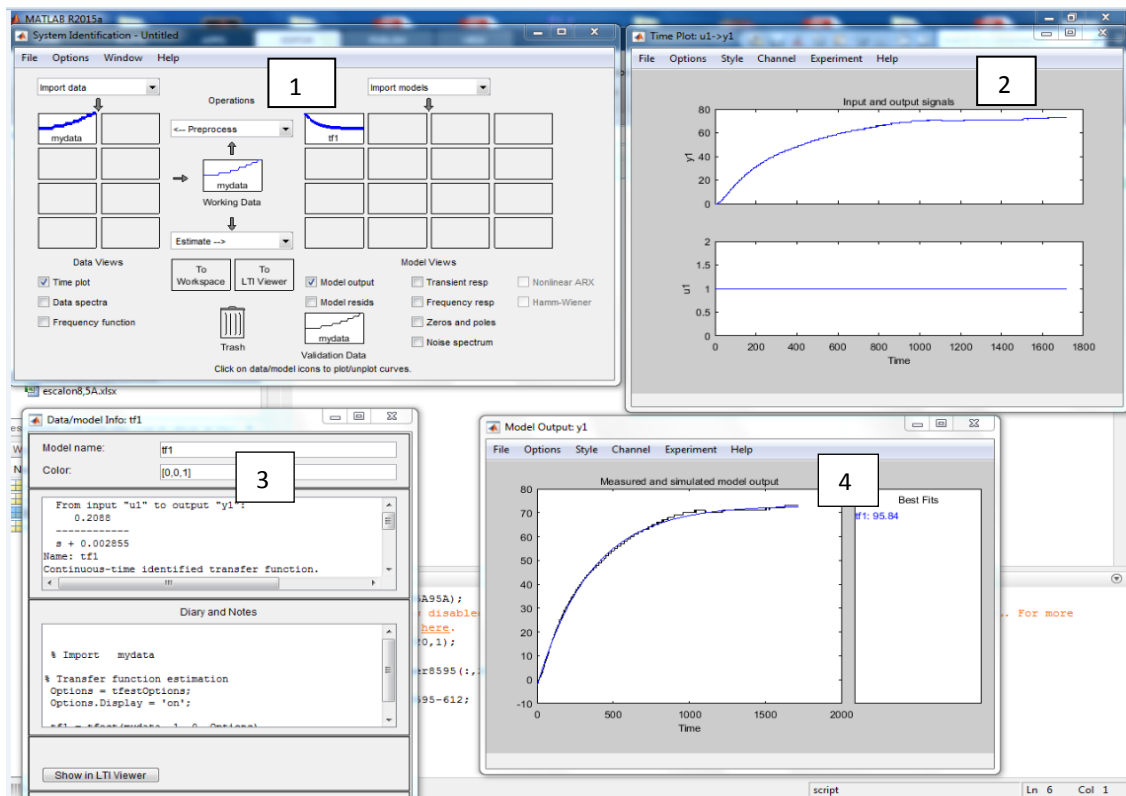


Figura 19: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para el escalón de corriente 8,5A – 9,5A.



En la figura 19 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón 8,5A-9,5A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

En la figura 19 se obtiene la relación entre la variación de la temperatura con la variación de la corriente, respecto de un punto de operación; en este caso, del escalón de corriente 8,5A – 9,5A.

Como se puede apreciar en el bloque 4 de la figura 19, la función de transferencia ajusta bien la respuesta mediante un sistema de primer orden: $Tf = \frac{0.2088}{s+0.002855}$.

Se puede observar en la figura 18 bloque 4 que la función de transferencia del primer escalón ajusta perfectamente la respuesta mediante un sistema de primer orden.

10.2 IDENTIFICACION DEL BOMBARDEO IÓNICO

En este apartado se realiza la identificación del bombardeo iónico, por lo tanto, la variable de entrada será la potencia aplicada por el generador de pulsos.

Apoyándonos en los datos de las constantes de tiempo analizadas en el apartado 9. Caracterización del horno, identificaremos el bombardeo iónico y se validarán las funciones de transferencia.



ENTRADA ESCALON 10KV (200W):

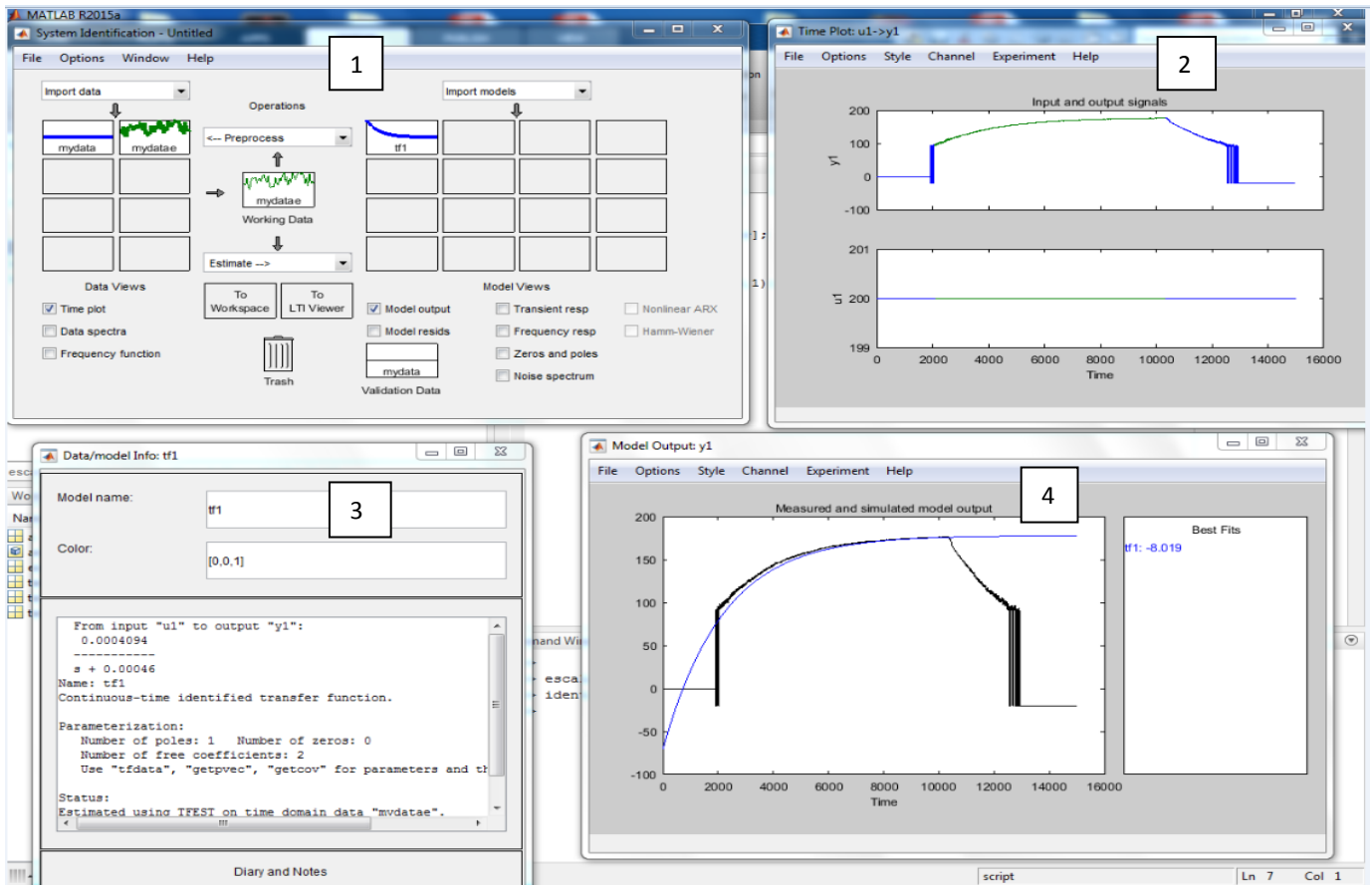


Figura 20: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de potencia de 200W

Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 20, que a pesar de que no hay datos de temperatura al principio del registro, el programa es capaz de calcular una función de transferencia que ajusta aceptablemente la respuesta.

En la figura 20 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón de 200W. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

En el bloque 2 de la figura 20 se observa que sólo se toman para la identificación los datos correspondientes al calentamiento por las razones expuestas en el apartado 9. Desarrollo experimental, pag17.

Como se puede apreciar en el bloque 4 de la gráfica 20, la función de transferencia de primer orden ajusta bastante bien la respuesta ante este escalón:
$$Tf = \frac{0.0004094}{s+0.00046}$$



ENTRADA ESCALON 20KV (800W):

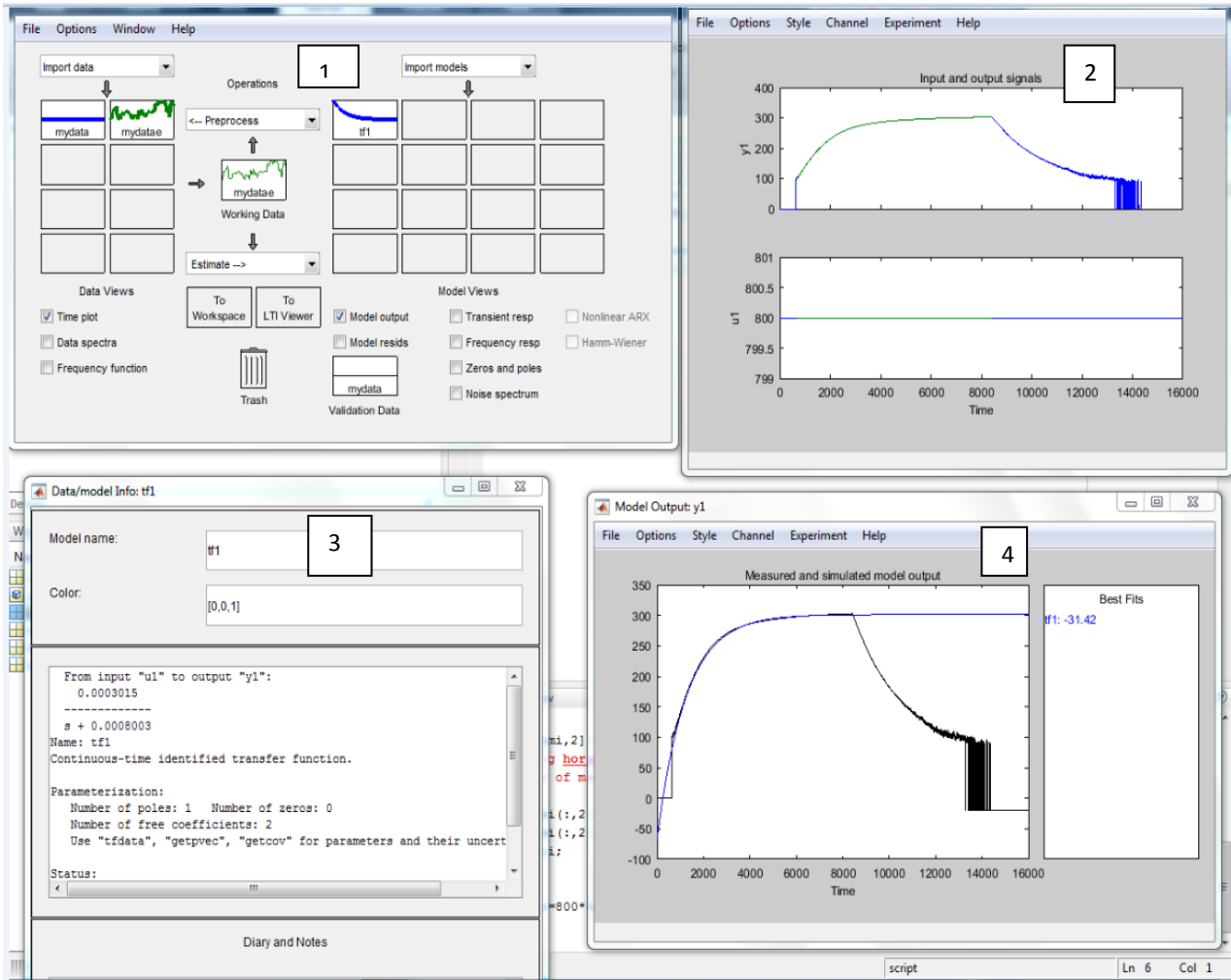


Figura 21: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de potencia de 800W.

En la figura 21 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón de 800W. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

En el bloque 2 de la figura 21 se observa para la identificación se toman los datos correspondientes al calentamiento por las razones expuestas en el apartado 9.Desarrollo experimental, pag17.



Como se puede apreciar en el bloque 4 de la gráfica 21, la función de transferencia de primer orden ajusta bastante bien la respuesta ante este escalón: $Tf = \frac{0.0003015}{s+0.0008003}$

ENTRADA ESCALON 30KV (2400W):

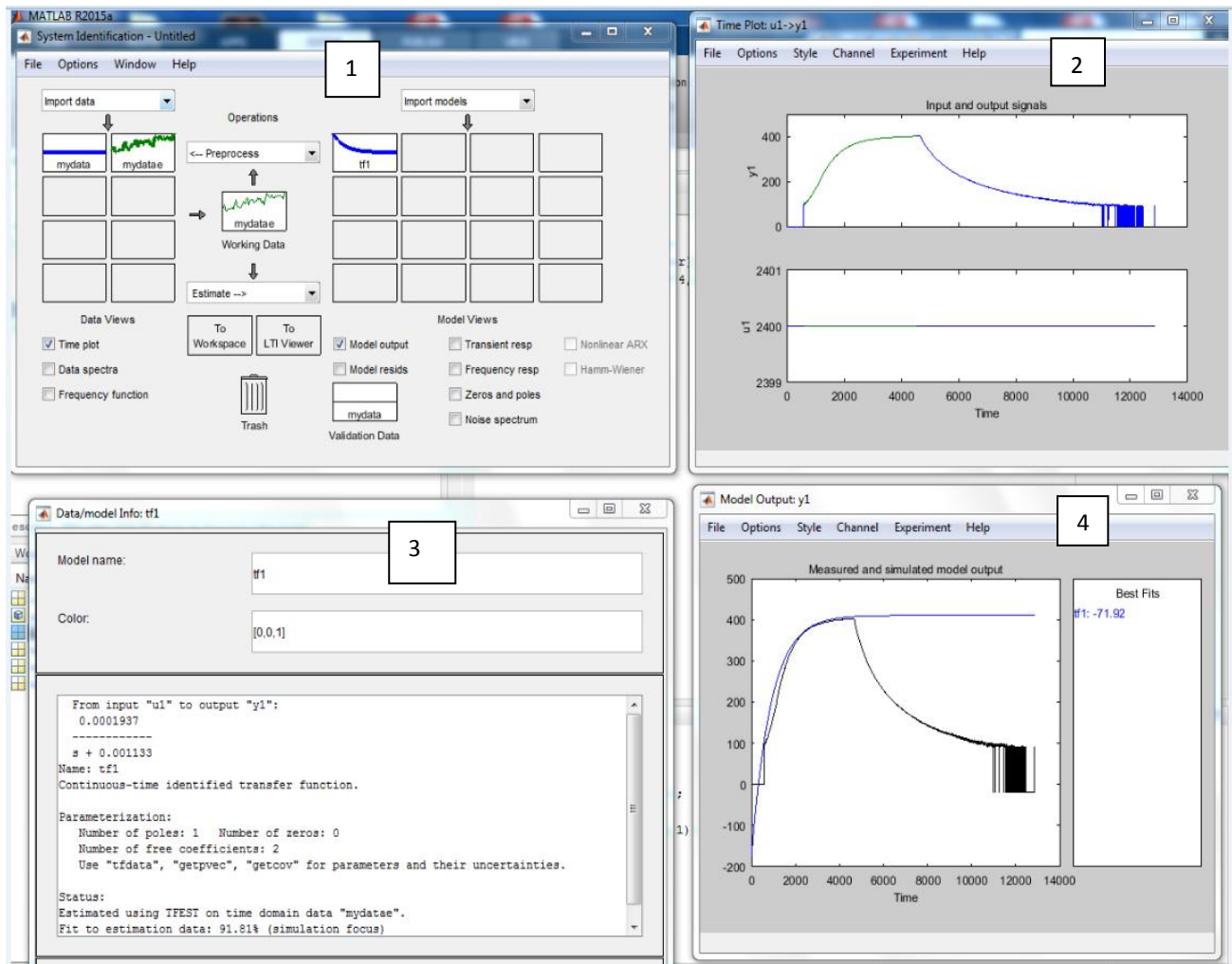


Figura 22: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de potencia de 800W

En la figura 22 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón de 2400W. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 22, que a pesar de que no hay datos de temperatura al principio del registro, el programa es capaz de calcular una función de transferencia que ajusta aceptablemente la respuesta.



En el bloque 2 de la figura 22 se observa que para la identificación se toman sólo los datos correspondientes al calentamiento por las razones expuestas en el apartado 9.Desarrollo experimental, pag17.

Como se puede apreciar en el bloque 4 de la gráfica 22, la función de transferencia de primer orden ajusta aceptablemente la respuesta ante este escalón: $Tf = \frac{0.0001937}{s+0.001133}$

PUNTOS DE OPERACIÓN SELECCIONADOS PARA LA APLICACIÓN:

Teniendo en cuenta los cambios de pendiente de las rectas del ajuste por mínimos cuadrados para distintas entradas escalón analizadas en el apartado 9.1.Caracterización del horno de vacío, pag 17. Considerando las funciones de transferencia para distintas entradas escalón realizado en el apartado 10.1 y 10.2 de la Identificación de sistemas, y valorando los rangos de temperatura que utiliza habitualmente el proceso, se delimitaron cuatro tramos de temperaturas en los cuales se podía acotar un comportamiento similar. A partir de estos tramos se obtienen los puntos de operación seleccionados. Lógicamente, es posible extraer más pendientes y por tanto más tramos que los que se han decidido aquí, pero se considera que estos cuatro son suficientes para reproducir con suficiente aproximación el comportamiento del horno en las temperaturas típicas que se utilizan en los procesos de implantación, sin perjuicio de que una vez el control real esté probado, éste necesite de más puntos de operación.

Estos tramos son:

- 1.- Desde temperatura ambiente hasta 181°C. Esto se corresponde con una entrada escalón de 0A – 3,2A. Este punto de operación será 0A -20°C.
- 2.- Desde 181°C hasta 284°C. Esto se corresponde con el tramo de entrada escalón 3,2A – 4,2A. Este punto de operación será 3,2A - 181°C.
- 3.- Desde 284°C hasta 517°C. Esto se corresponde con el tramo de entrada escalón de 4,2A – 7A. Este punto de operación será 4,2A - 284°C.
- 4.- Desde 517°C hasta 657°C. Esto se corresponde con el tramo de entrada escalón de 7A -9A. Este punto de operación será 7A - 517°C.

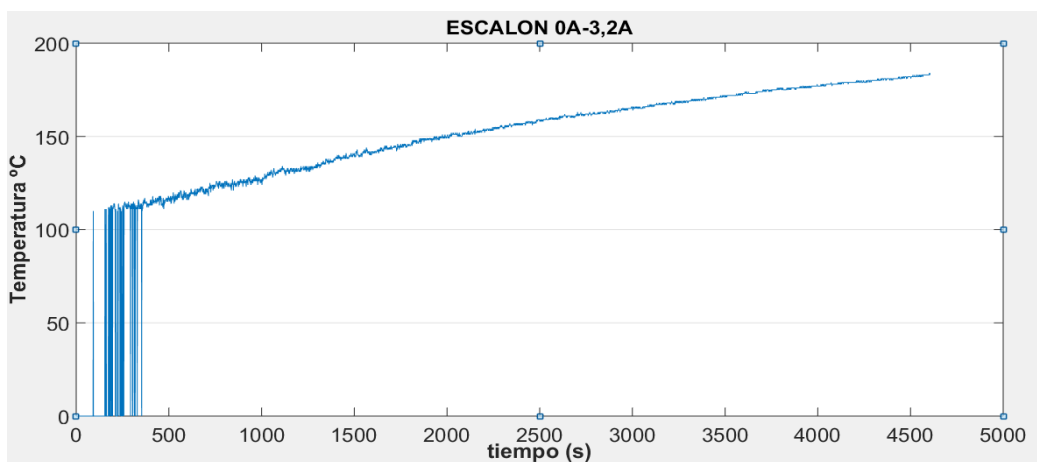
Con estos tramos se pretende conseguir tener un rango de temperaturas controladas suficiente como para realizar tratamientos a la práctica totalidad de las aplicaciones industriales, y con la suficiente precisión para los tratamientos más sensibles. En general, que el tiempo de estabilización se pueda mejorar un 10% no es determinante, sin embargo, que la temperatura final tenga mucha precisión sí es importante para no producir revenido (ablandamiento) en el material implantado.



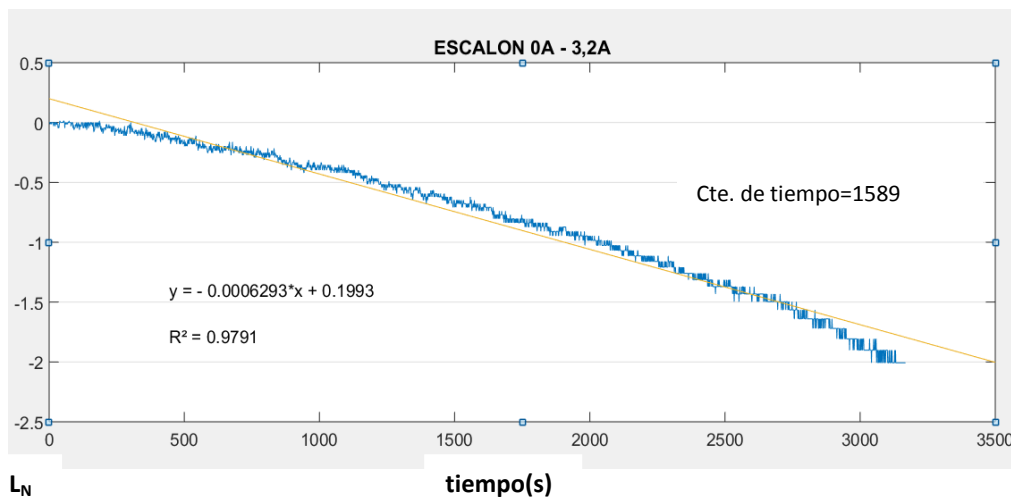
CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA PARA LOS PUNTOS DE OPERACIÓN:

En estos ensayos aplicaremos un escalón de corriente al horno y esperaremos a que se establezca la temperatura. De esta manera tendremos condiciones iniciales nulas para volver a aplicar un nuevo escalón de corriente a partir del valor anterior, produciendo como consecuencia un incremento de la temperatura desde el valor estabilizado previamente. Con estos ensayos calculamos la relación que existe entre las variaciones de temperatura con las variaciones de corriente respecto de un punto de operación

PUNTO DE OPERACIÓN 20°C



(a)



(b)

Figura 23: (a) Temperatura ante escalón de 3,2Amp. (b) estimación de la constante de tiempo

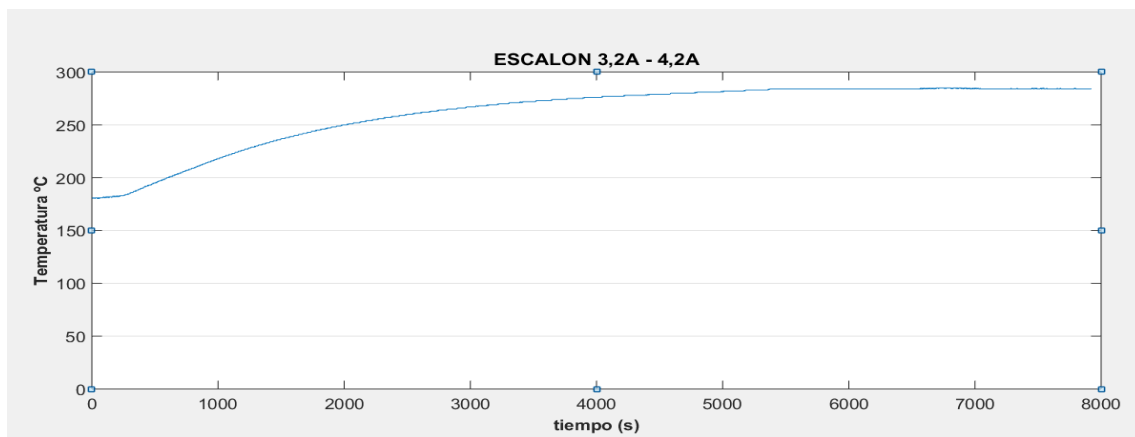
La figura 23.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón de 3,2 Amperios. Este registro no se pudo terminar porque surgió un problema que obligó a detener el experimento antes de que la temperatura se estabilizara. No obstante, con los datos registrados es suficiente para



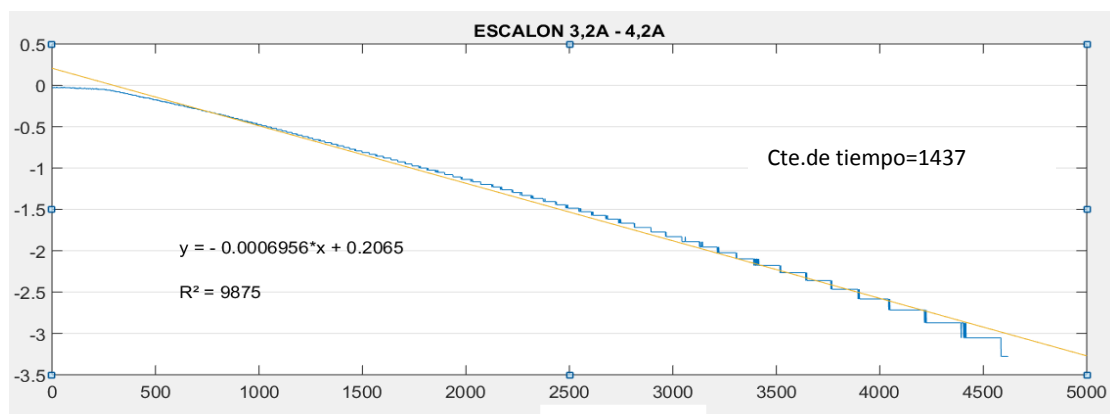
tomar algunas consideraciones que se podrán confrontar después con la identificación de sistemas. Al principio registro se puede apreciar una serie de interrupciones en la medida de la temperatura cuando se aproxima al inicio del rango de medida del sensor, esto es 110°C.

La figura 23.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del calentamiento. Aunque se podrían extraer dos o tres pendientes distintas de este registro, se asume una única recta de ajuste por mínimos cuadrados ya que es un punto de transición que no se utilizará en los procesos.

PUNTO DE OPERACIÓN 181°C



(a)



(b) tiempo(s)

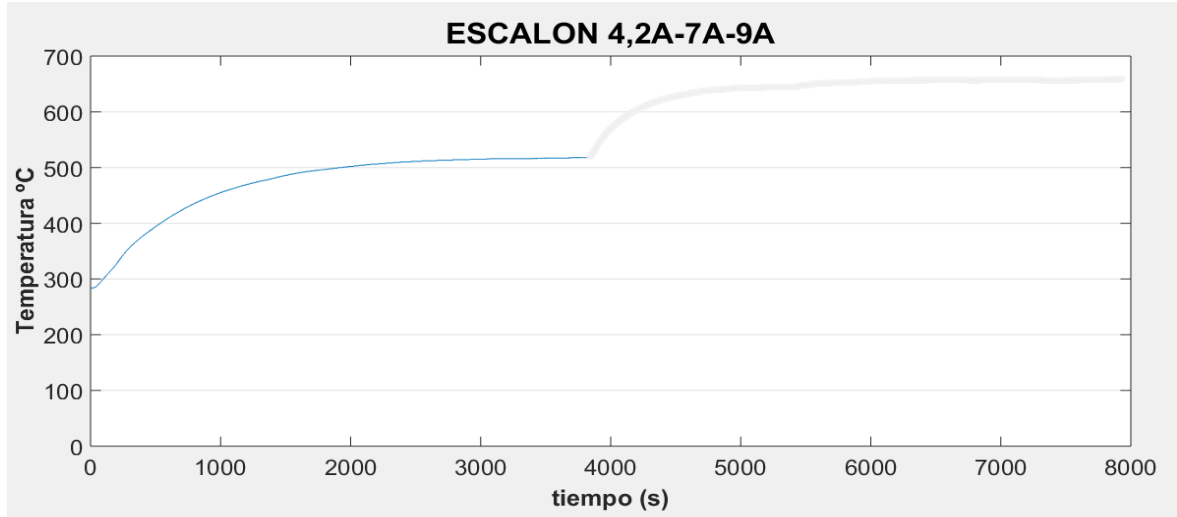
Figura 24:(a) Temperatura ante escalón de 3,2-4,2A. (b) estimación de la constante de tiempo

La figura 24.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministra un escalón 3.2A – 4.2Amperios.

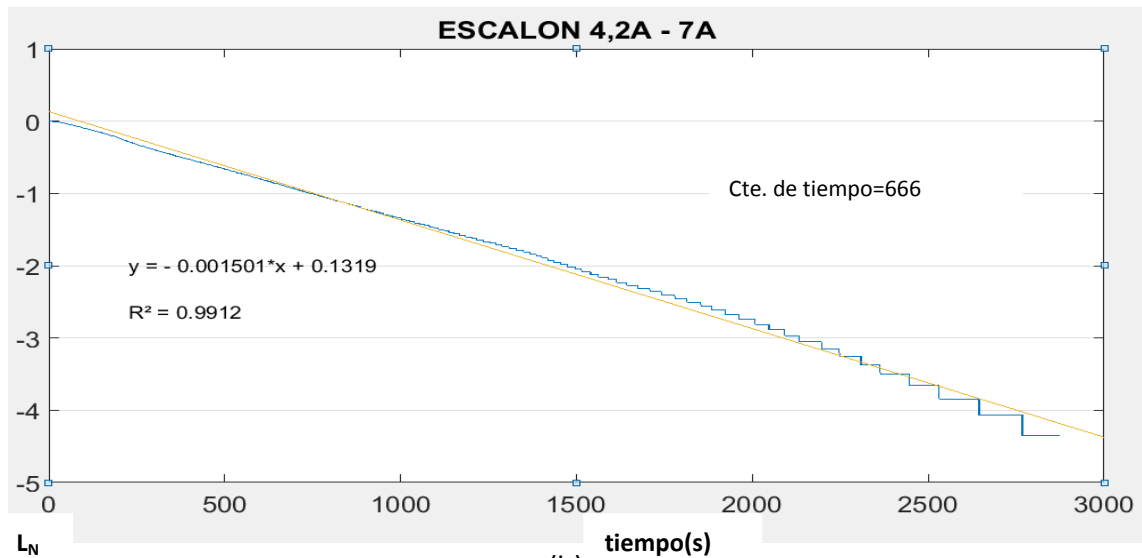


La figura 24.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro. Se puede observar una pendiente entre 0 y 350seg. y otro desde 350seg hasta el final del calentamiento.

PUNTO DE OPERACIÓN 284°C



(a)



(b)

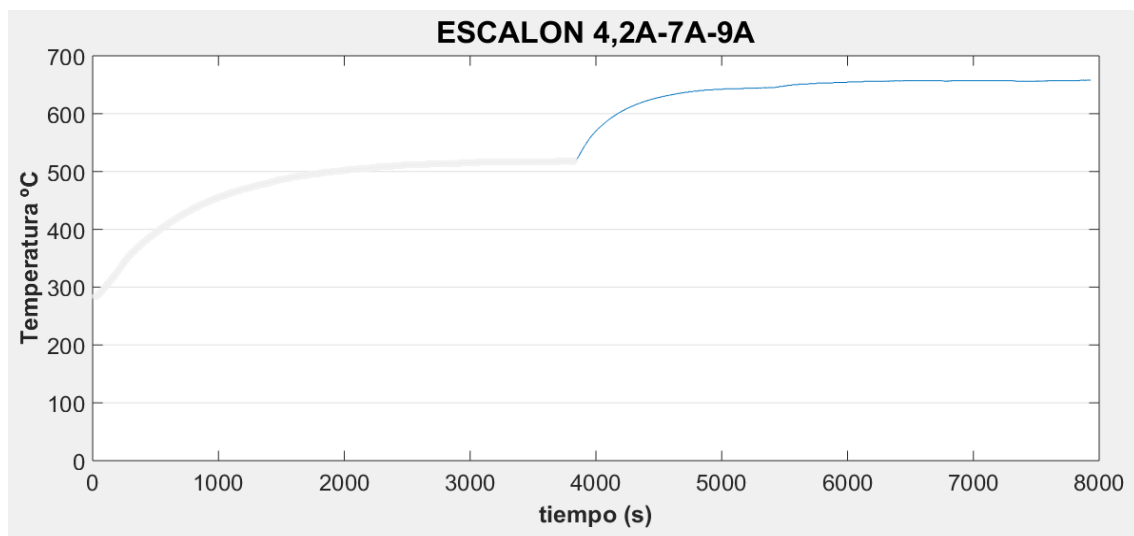
Figura 25:(a) Temperatura ante escalón de 4,2-7A. (b) estimación de la constante de tiempo

La figura 25.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministran dos escalones consecutivos. El primer escalón se realiza desde 4,2A hasta 7A; el segundo, desde 7A hasta 9A. Sin embargo, la caracterización de este punto de operación corresponde sólo del primer escalón: 4,2A – 7A.

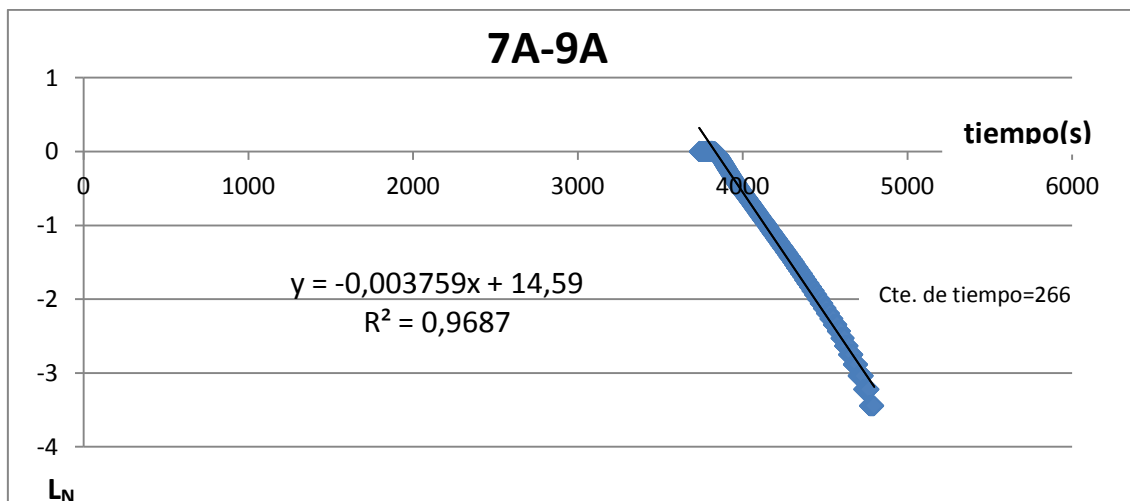


La figura 23.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del primer escalón. Se podrían extraer tres pendientes distintas. Desde 0 segundos a 350segundos. Desde 350segundos hasta 1400 segundos. Por último, desde 1400 segundos hasta el final.

PUNTO DE OPERACIÓN 517°C



(a)



(b)

Figura 26:(a) Temperatura ante escalón de 7A-9A. (b) estimación de la constante de tiempo

La figura 26.a representa un registro de la evolución de la temperatura cuando al horno se le suministran dos escalones consecutivos. El primer escalón se realiza desde



4,2A hasta 7A; el segundo, desde 7A hasta 9A. Sin embargo, la caracterización de este punto de operación corresponde sólo del segundo escalón: 7A – 9A.

La figura 23.b muestra la estimación de la constante de tiempo del registro sólo del segundo escalón. Se podrían extraer dos pendientes distintas. Desde 0 segundos a 4600segundos. Desde 4600 segundos hasta el final.

Aunque se podrían extraer dos pendientes distintas de este registro, la pendiente del ajuste por mínimos cuadrados la podemos tomar como aceptable ya que nos encontramos en el final del rango de operación de esta aplicación. En ese caso, se observa que la recta de ajuste por mínimos cuadrados posee una constante de tiempo que es más del doble del valor del registro anterior.

IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA PARA LOS PUNTOS DE OPERACIÓN SELECCIONADOS :

PUNTO DE OPERACIÓN 20°C, 0A

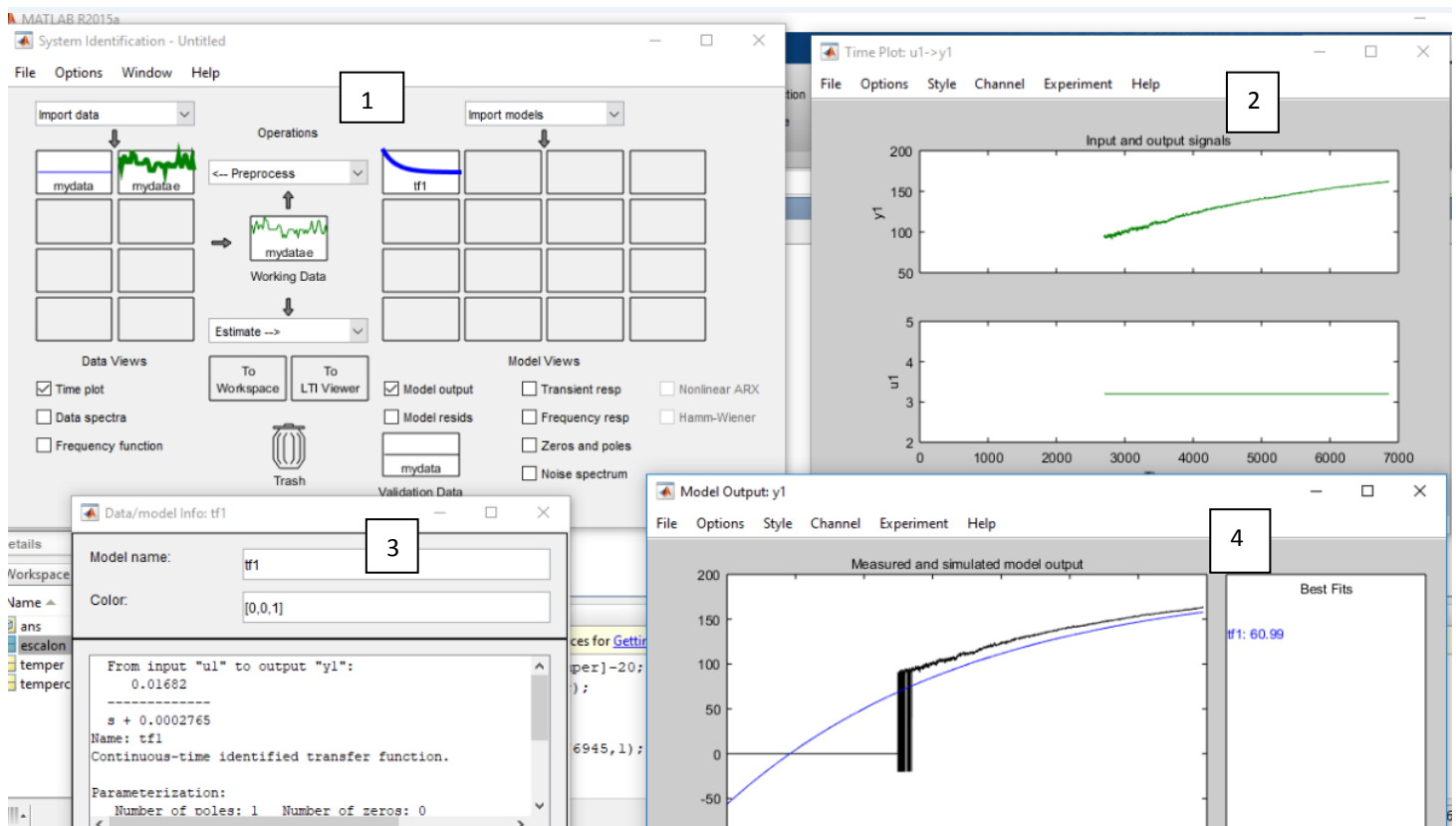


Figura 27: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón de 3,2 Amperios en punto de operación 20°C, 0A

En la figura 27 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente a un escalón de 3,2



A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 27, que a pesar de que el registro no llegó hasta la estabilización de la temperatura, el programa es capaz de calcular una función de transferencia. Se ve que al no partir del reposo el modelo no es muy fiable, pero sólo se necesita como modelo de transición ya que este rango de temperatura no se va a utilizar en el proceso de implantación.

En el bloque 2 de la figura 27, se puede observar en la función de transferencia:

$$\frac{0.0168}{s+0.0002765}$$
 que la constante de tiempo: 3616 seg., es muy distinta a los 1589 seg. que se deduce del ajuste por mínimos cuadrados de la caracterización de la figura 23.b, pag41.; pero, como se ha dicho, sólo se utilizará como modelo de transición.

PUNTO DE OPERACIÓN 181°C, 3.2A

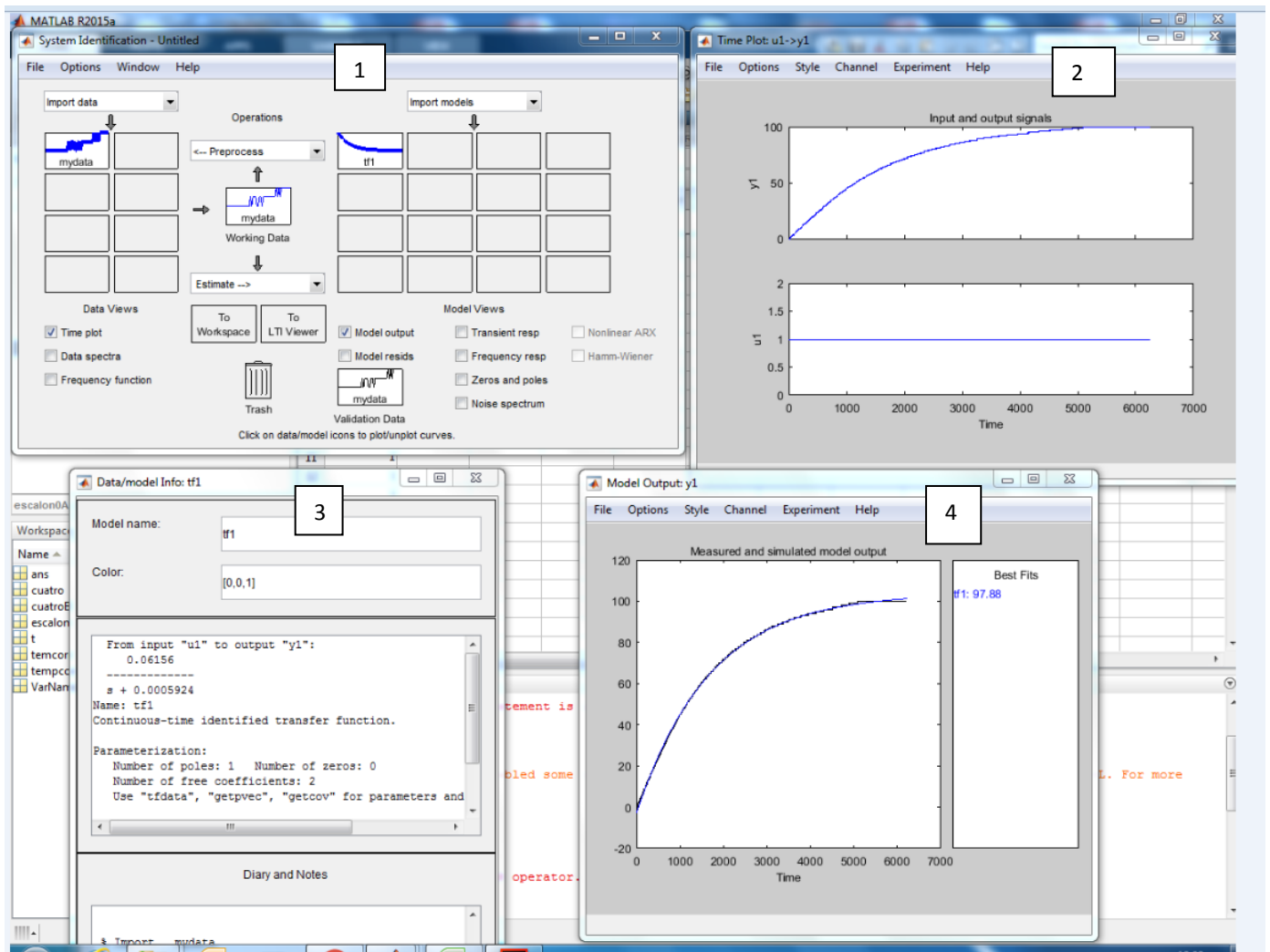


Figura 28: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón 3,2A - 4,2A en punto de operación 181°C,3.2A



En la figura 28 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón 3,2 A-4,2A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.

Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 28, que la función de transferencia de primer orden ajusta perfectamente la respuesta de la planta en este punto de operación.

En el bloque 2 de la figura 28, se puede observar la función de transferencia:

$\frac{0.06156}{s+0.0005924}$ que la constante de tiempo: 1688 seg. Si se compara con los 1437seg.de la constante de tiempo de la recta de regresión de la caracterización, figura 24.b, pag42 , hay una diferencia de 14% . Esta incertidumbre se puede asumir en la constante de tiempo ya que no es determinante que llegue a estabilizarse un poco antes o después. En cambio, no sería asumible en la ganancia estática, ya que la precisión de la temperatura final sí que es decisiva para tener un correcto resultado del tratamiento

En el bloque 4 de la figura 28, se puede ver que la función de transferencia de primer orden ajusta perfectamente la respuesta de la planta en este punto de operación.



PUNTO DE OPERACIÓN 284°C, 4.2A

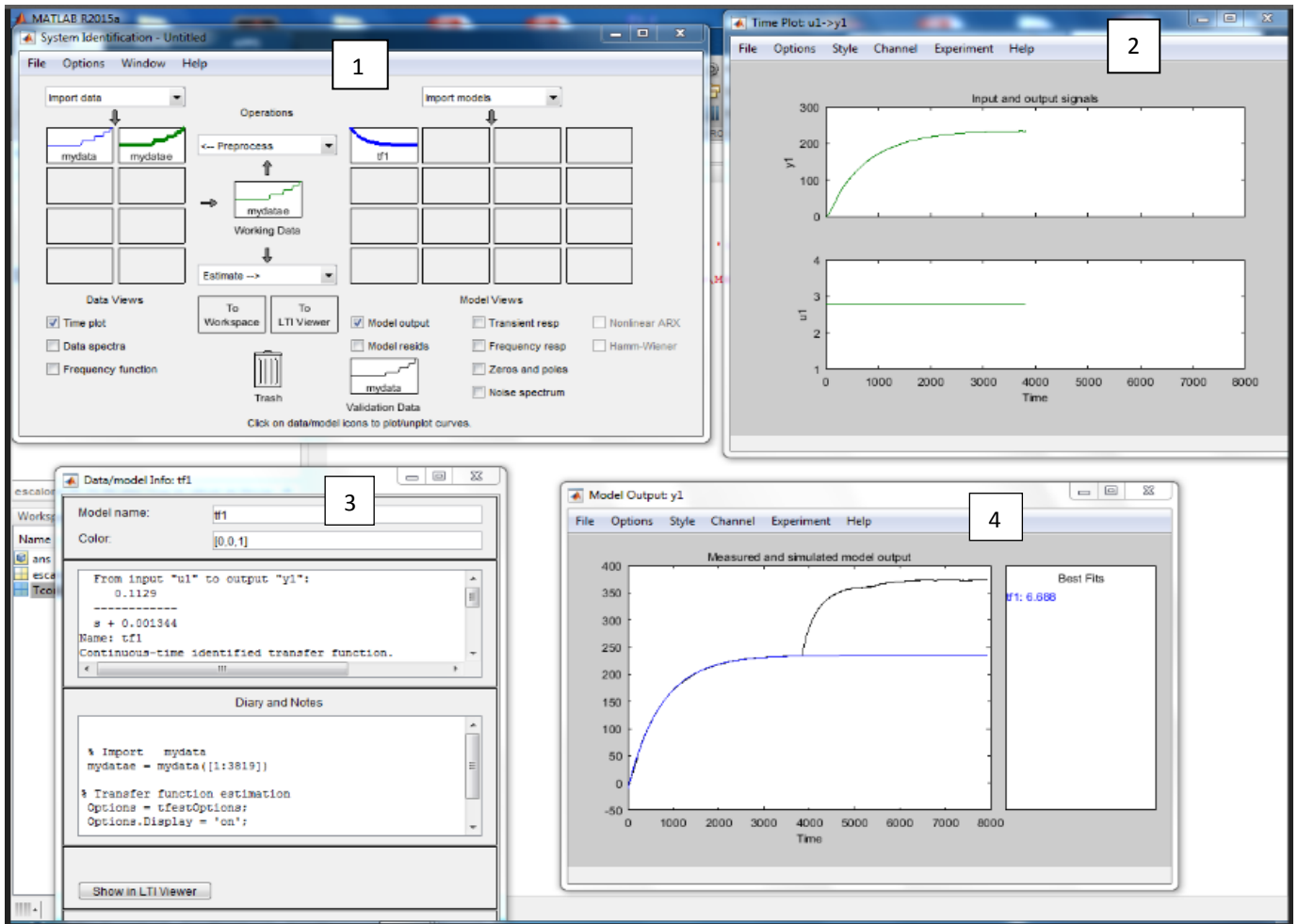


Figura 29: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón 4,2A – 7A, en punto de operación 284°C,4.2A

En el bloque 4 de la figura 29 se puede ver la representación de dos escalones consecutivos. El primer escalón se realiza desde 4,2A hasta 7A; el segundo, desde 7A hasta 9A. Sin embargo, la identificación que se hace en la figura 29 es solamente relativo al primer escalón: 4,2A – 7A.

En la figura 29 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón 3,2 A-4,2A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real.



Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 29, que la función de transferencia de primer orden ajusta perfectamente la respuesta de la planta en este punto de operación.

En el bloque 2 de la figura 29, se puede observar la función de transferencia: $\frac{0.1129}{s+0.001344}$ que la constante de tiempo: 744 seg. Si se compara con los 666 seg. de la constante de tiempo de la recta de regresión de la caracterización, figura 25.b, pag43. , hay una diferencia de 10% . Esta incertidumbre se puede asumir en la constante de tiempo ya que no es determinante que llegue a estabilizarse un poco antes o después. En cambio, no sería asumible en la ganancia estática, ya que la precisión de la temperatura final sí que es decisiva para tener un correcto resultado del tratamiento

En el bloque 4 de figura 28, se puede ver que la función de transferencia de primer orden ajusta perfectamente la respuesta de la planta en este punto de operación.

PUNTO DE OPERACIÓN 517°C, 7A.

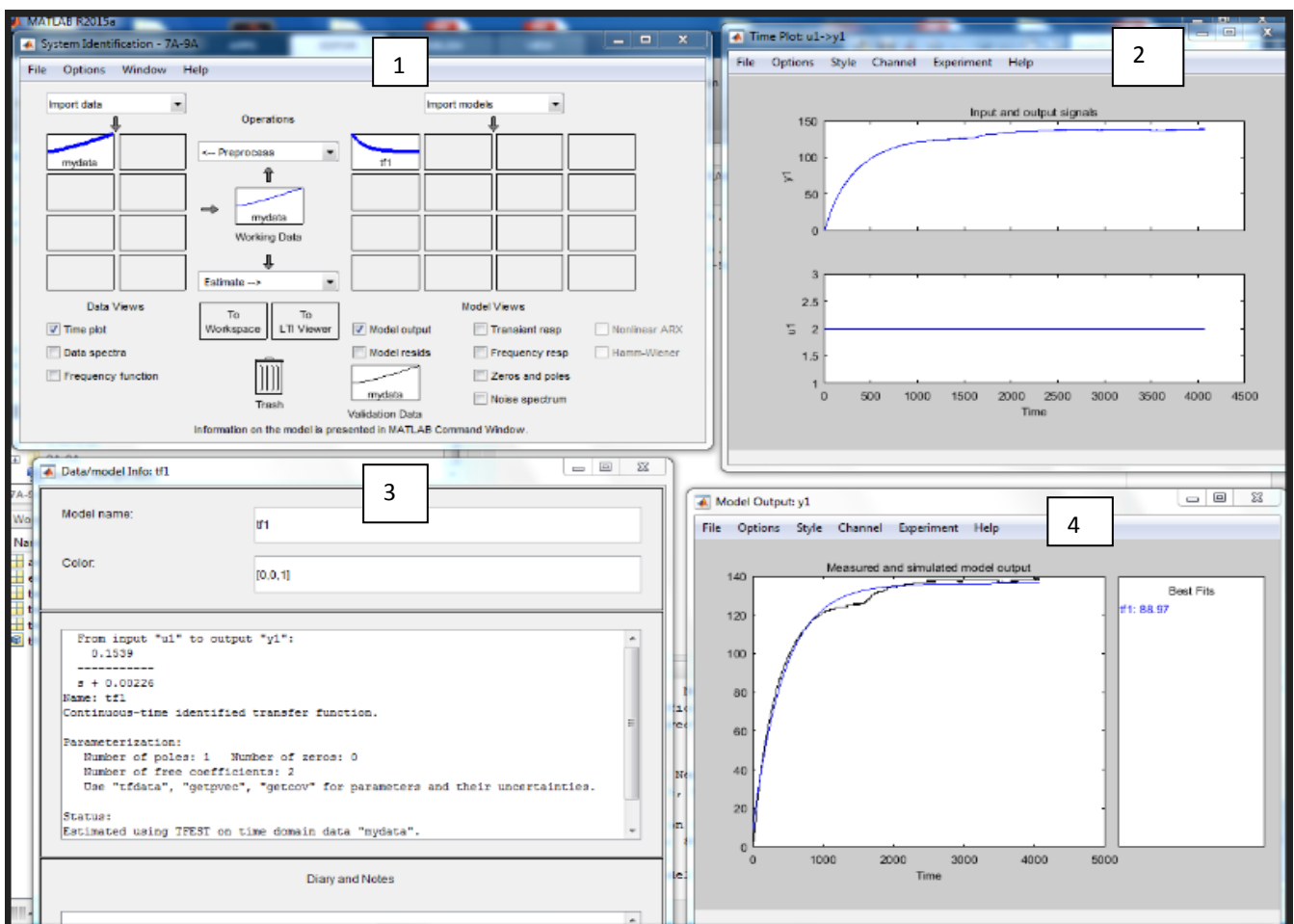


Figura 30: extractos de distintas herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab para un escalón 7A – 9A, en punto de operación 517°C, 7A



En la figura 30 se representa una recopilación de 4 extractos de herramientas de la Toolbox IDENT de Matlab [5] para la identificación correspondiente al escalón 7A-9A. El bloque 1 representa la introducción de datos experimentales, el preprocesado de las señales y el cálculo de los modelos. En el bloque 2 figuran los datos utilizados para la identificación. El bloque 3 muestra la función de transferencia. El bloque 4 presenta una comparativa entre la respuesta del modelo obtenido y la del sistema real. Se puede apreciar en el bloque 2 de la figura 29, que la función de transferencia de primer orden ajusta perfectamente la respuesta de la planta en este punto de operación.

En el bloque 2 de la figura 30, se puede observar la función de transferencia: $\frac{0.1539}{s+0.00226}$ que la constante de tiempo: 442 seg. Si se compara con los 266 seg. de la constante de tiempo de la recta de regresión de la caracterización, figura 26.b, pag44, hay una diferencia de 39%. Esta incertidumbre se puede asumir en la constante de tiempo ya que no es determinante que llegue a estabilizarse un poco antes o después. En cambio, no sería asumible en la ganancia estática, ya que la precisión de la temperatura final sí que es decisiva para tener un correcto resultado del tratamiento

En el bloque 4 de figura 28, se puede observar que la función de transferencia de primer orden de la planta en este punto de operación hay una zona en el codo que no ajusta.

Después de realizar la identificación de los puntos de operación, los módulos lineales se combinaron para realizar el modelo de la planta. Para ello se utilizó la herramienta Simulink de Matlab [5].

La combinación de los módulos lineales se realizó como se indica a continuación en la figura 31.

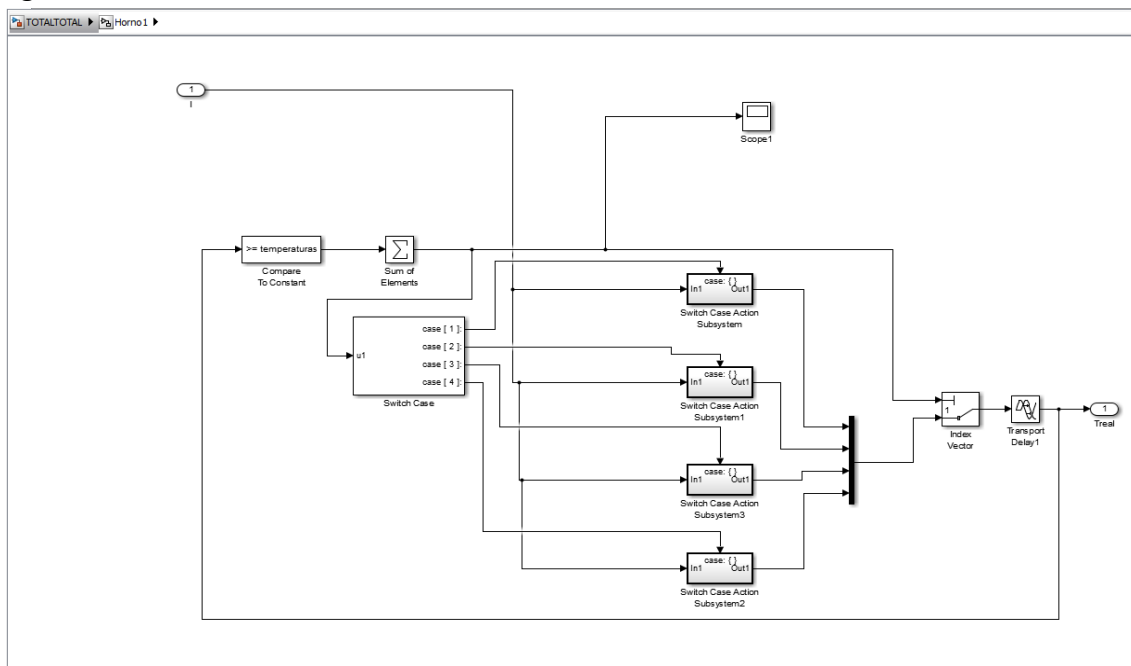


Figura 31: Combinación de los módulos lineales.



11. CONTROL DE LA PLANTA:

Este apartado no estaba previsto realizarlo en el anteproyecto de la Propuesta de Trabajo Fin de Estudios, pero en vista de que el Proyecto es más ambicioso de lo que abarca este trabajo y se está muy interesado en finalizarlo hasta la implementación, se aprovechó todo el tiempo disponible para adelantar trabajo.

11.1 ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR

CONTROLADOR ANTICIPATIVO (FEED-FORWARD)

El controlador feed-forward es un tipo de controlador que mide las perturbaciones que llegan al sistema y actúa compensándolas para que no afecten a la salida. Es decir, este tipo de controlador se anticipa a las modificaciones que va a sufrir el sistema y las compensa antes de que cambie la salida. Por tanto, se debe medir las perturbaciones, conocer el modelo de la planta y su respuesta a las perturbaciones para incorporarla al control. Como desventaja, este controlador no es aplicable a perturbaciones que no se puedan medir.

CONTROLADOR PI (FEED-BACK)

Para que el controlador pueda responder a las perturbaciones que no se pueden medir, se realimenta el sistema tal y como se hace con un PID. En este caso se utilizará únicamente un control PI. Este tipo de controlador reacciona bien ante perturbaciones no medibles, pero es de tipo reactivo, es decir, reacciona cuando la salida ya ha cambiado. En este caso, aunque el controlador PI deje de actuar porque la salida haya excedido su valor de referencia, el bombardeo iónico seguirá actuando y por tanto contribuyendo a que la temperatura siga subiendo, resultando un control insuficiente.

Por tanto, la configuración del sistema que se utilizará para este diseño será la combinación de un feedforward y un feedback, de manera que sumen las ventajas de ambos. Gracias a que la perturbación puede ser medida antes de que afecte a la salida del sistema mediante el feedforward, el controlador PI encontrará un error menor que corregir.

En esta configuración, el controlador PI junto con el horno forman el sistema realimentado feedback. Por otro lado, el bombardeo iónico formará el feedforward, que será la perturbación medible que habrá que compensar para que no modifique la salida. De esta manera, el sistema se anticipa a la contribución de calor que va a generar el bombardeo.



La configuración final del sistema será la siguiente:

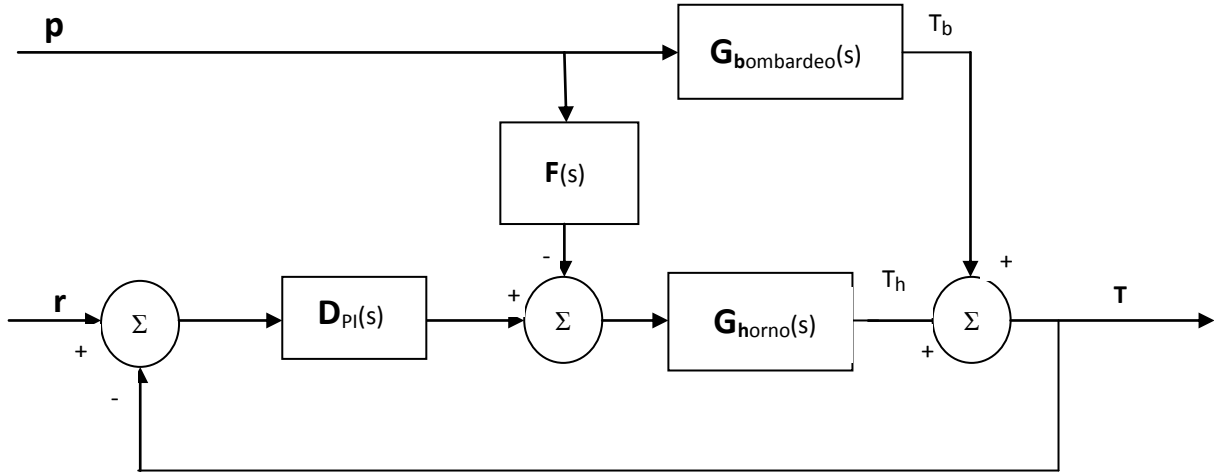


Figura 32: configuración del sistema final

En el esquema de la figura 32, la entrada “r” es la entrada de corriente del horno. La entrada “p” es la potencia que suministra el generador de pulsos. La salida “T” es la temperatura final. Tal y como se ve en la figura 4, la temperatura final es la suma de la temperatura del horno y la temperatura de bombardeo. Sin embargo, se observa que a la entrada del horno llega la señal del controlador PI y se le resta una señal que depende de la potencia de entrada del bombardeo; en este punto es donde se compensa la señal del bombardeo con la señal que proporciona el controlador PI, anticipándose a la modificación que el bombardeo ocasionaría en la temperatura final.

En los capítulos hasta ahora descritos hemos obtenido el modelo del horno y el modelo del bombardeo; sin embargo, se ve en la figura 32 que la entrada del horno se ve afectada por el controlador PI y por un módulo que se resta en el sumatorio, F(s), del que no se ha calculado su modelo. Por tanto, a continuación se procede a la deducción de este valor:

$$T = T_b + T_h$$

$$T = p * G_b + [(r - T) * D - (p * F)] * G_h$$

$$T = p * G_b + (r * D * G_h - T * D * G_h - p * F * G_h)$$

$$T + T * D * G_h = p * G_b - p * F * G_h + r * D * G_h$$

$$T * (1 + D * G_h) = r * D * G_h + p(G_b - F * G_h)$$

$$T = \frac{D * G_h}{1 + D * G_h} * r + \frac{G_b - F * G_h}{1 + D * G_h} * p \quad (\text{ecu.2.2})$$



Donde “T” es la temperatura final de salida. “Tb” es la tempertura de salida del bombardeo iónico. “Th” es la temperatura de salida del horno. “p” es variable de entrada del bombardeo iónico, que se corresponde con la potencia del generador. “r” es la variable de entrada del horno, que se corresponde con la corriente del horno.

Para que la temperatura final no dependa de la entrada “p”, el valor del término “Gb – F * Gh” en la ecuación 2.2 de la página anterior, debe ser cero; por tanto, $G_b - F * G_h = 0$; $F = -\frac{G_b}{G_h}$. De esta manera, la contribución del bombardeo a la entrada del horno, ver figura 32, será $p * F * G_h = p * -\frac{G_b}{G_h} * G_h = -p * G_b$, con signo negativo; y la contribución del bombardeo a la salida del horno será $p * G_b$, con signo positivo. Es decir, restamos a la entrada del horno la misma contribución del bombardeo que actúa a la salida del horno. De esta manera queda compensada.

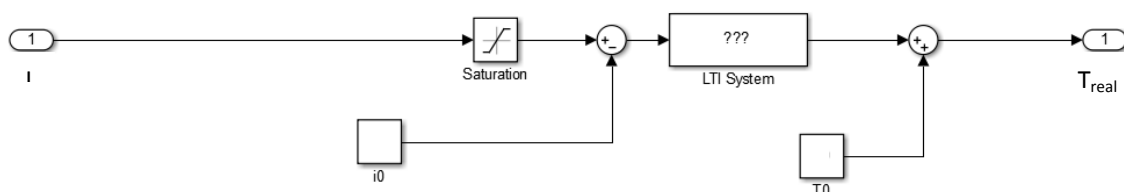
11.2 ESQUEMA:

La forma de abordar el modelo fue comenzar por el diseño del feedback, es decir, por la contribución únicamente del horno sin tener en cuenta la contribución del bombardeo iónico. Una vez se comprobó el correcto funcionamiento de esta parte se pasó al diseño del feedforward añadiendo la contribución del bombardeo iónico de la forma expuesta en el apartado anterior. Todo ello se realizó con la herramienta simulink de MatLab. El modelo propuesto se expone a continuación:

feedback-PI:



(a)



(b)

Figura 33: (a) feedback (b) modelo de planta con un punto de operación.



La figura 33 muestra el diseño básico del feedback-PI, sin bombardeo, con el que se probaron cada uno de los tramos con su función de transferencia y sus puntos de operación.

Sin embargo, es necesario que el sistema sea capaz de cambiar automáticamente de modelo en función del punto de operación que se vaya alcanzando dinámicamente.

Para ello se diseñó un sistema basado en estructuras “case” de la herramienta simulink en la cual se compara continuamente el valor de la temperatura actual con los valores de los puntos de operación para que, una vez alcance cada punto de operación en su evolución ascendente vaya aplicando el modelo correspondiente a cada tramo por el que va pasando la temperatura. En las siguientes figuras se detalla este diseño:

En la figura 33.a se muestra el diseño básico del feedback sin la contribución del bombardeo iónico, donde el módulo de la planta, Horno 1, es el que alberga el diseño automático con los puntos de operación y las funciones de transferencia de cada tramo.

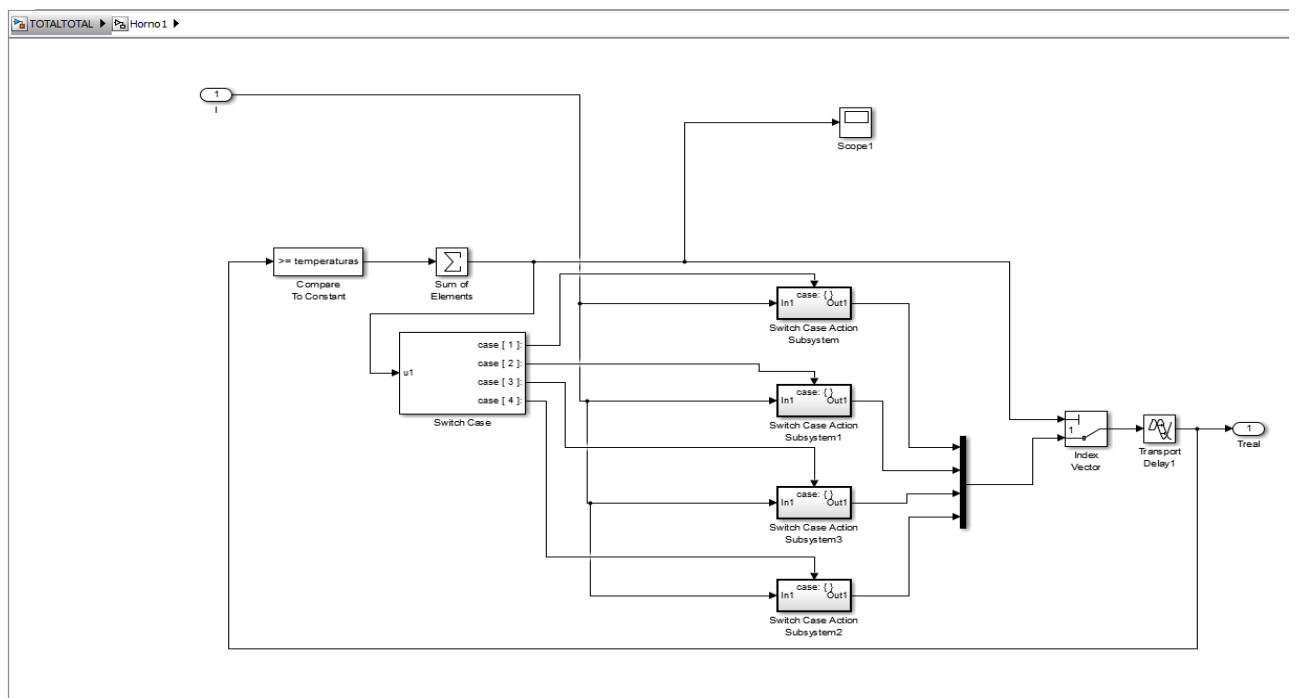


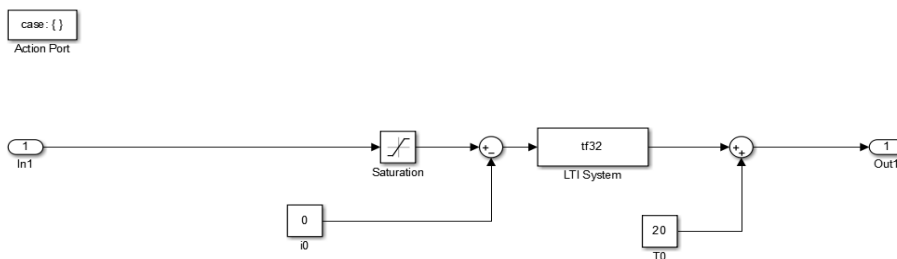
Figura 34: Configuración de los modelos lineales

La figura 34 muestra el interior del diseño de la planta, Horno 1, del feedback de la figura 33. Se aprecia la estructura “Switch case” donde accede a cada uno de los cuatro subsistemas en cuyo interior se aplica la función de transferencia y los puntos de operación de cada tramo. Asimismo se puede observar dónde se compara la temperatura de salida con el vector de puntos de operación donde se van sumando el



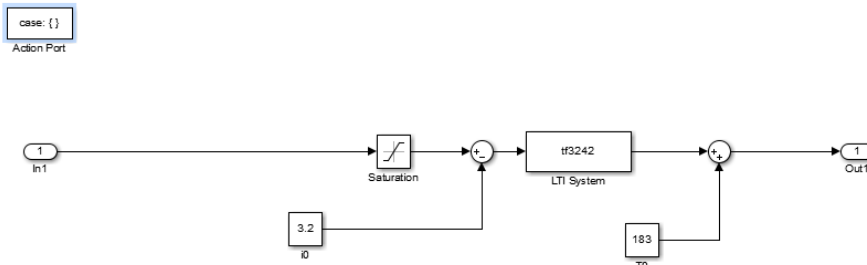
valor booleano de la comparación anterior para que se vayan incrementando los valores del 1 al 4 de la estructura “case”. Finalmente llega a un vector indexador a través de un multiplexor que da paso al valor del subsistema que actúa en cada momento, si no se pusiera el vector indexador, acumularía el valor del subsistema anterior. Dentro de cada una de los cuatro módulos “Switch Case Action Subsystem”, están las funciones de transferencia y los puntos de operación de cada tramo seleccionado. A continuación, en las figuras 35.a.b.c.d se detalla el interior de uno de estos cuatro módulos.

TOTALTOTAL ▶ Pa Horno 1 ▶ Pa Switch Case Action Subsystem



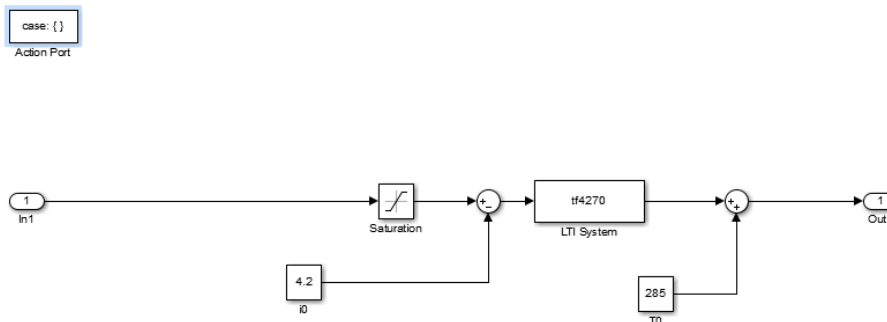
(a)

TOTALTOTAL ▶ Pa Horno 1 ▶ Pa Switch Case Action Subsystem1

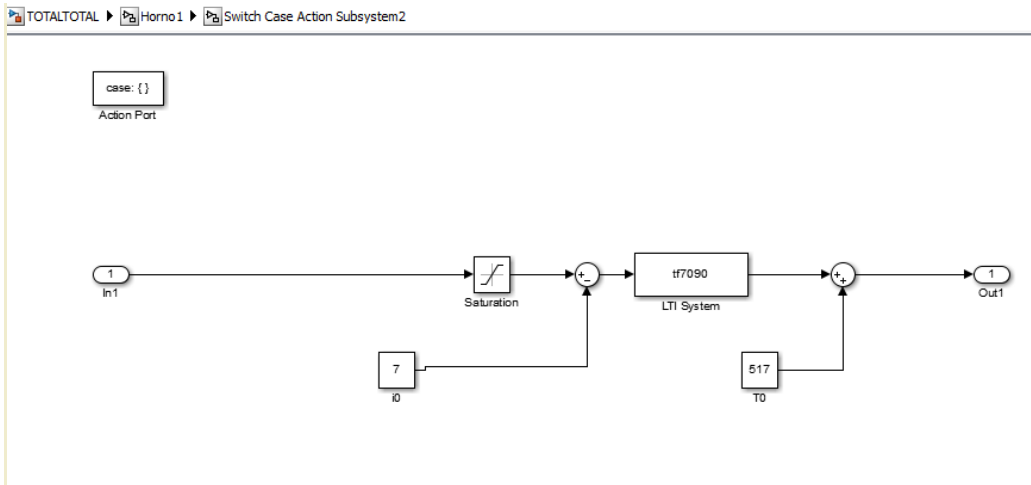


(b)

TOTALTOTAL ▶ Pa Horno 1 ▶ Pa Switch Case Action Subsystem3



(c)



(d)

Figura 35: (a),(b),(c),(d) son todos los modelos lineales con sus puntos de operación

Feedback + feedforward

Una vez se comprobó el correcto funcionamiento del feedback, se procedió a añadir la contribución del bombardeo mediante el feedforward, figura 36.

Primeramente se pensó para el feedforward una estructura “case” similar a la del feedback que fuera cambiando de modelo a medida que fuera incrementando la temperatura actual. Después de algunos ensayos con cada uno de los modelos del bombardeo iónico y viendo que el feedback-PI era capaz de controlar el sistema cuando se fijaba uno sólo de los modelos de bombardeo en el módulo feedforward, se decidió fijar al modelo más restrictivo de la contribución del bombardeo iónico en el diseño completo de feedforward + feedback. Por tanto, el diseño final quedó así:

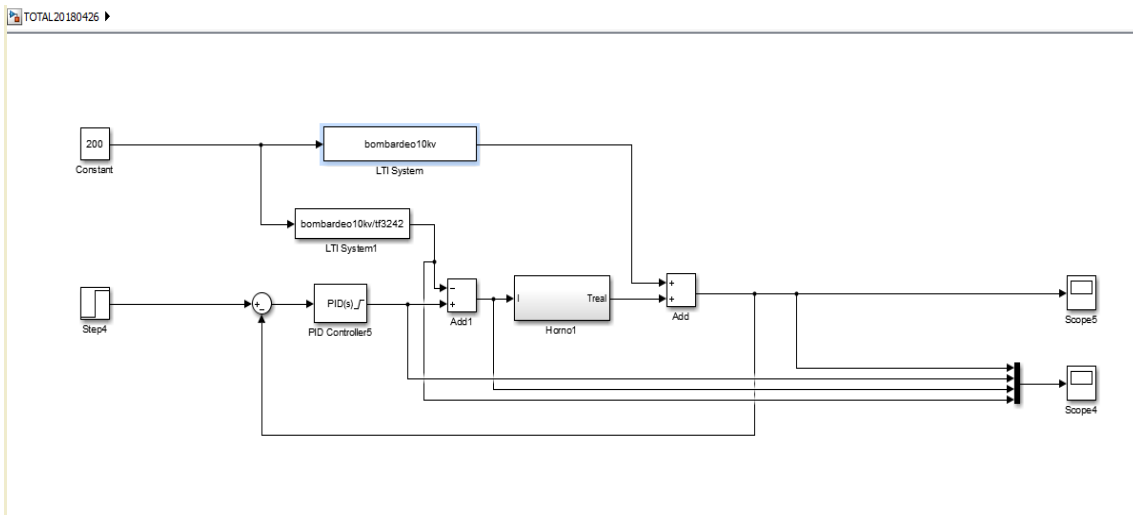


Figura 36: modelo final feedforward + feedback



11.3 SIMULACIONES

El análisis del lugar de las raíces del sistema de primer orden de la evolución de la temperatura, figura 37, revela un polo lento entre $2,76e-4$ y $2,26e-3$, dependiendo del punto de operación, donde $S_p = \frac{K+1}{\tau}$.

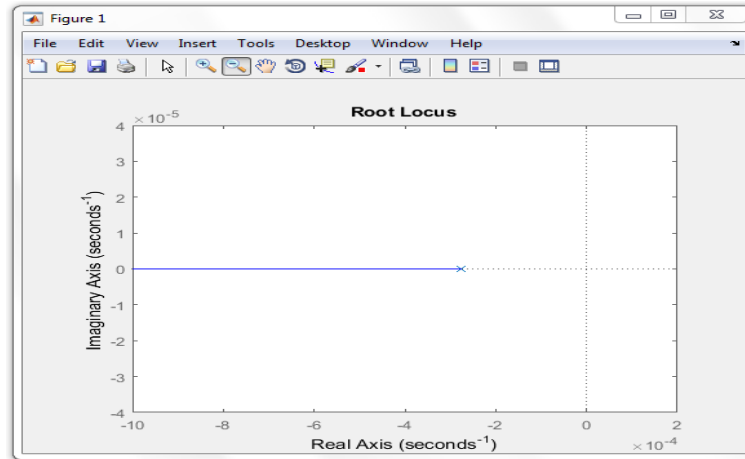


Figura 37: Lugar de las raíces.

En cualquier caso, sólo tenemos una rama que va desde el valor del polo, para $K=0$, hasta infinito. En estas condiciones se puede afirmar que el sistema es siempre estable para $K>0$, y que el tiempo de estabilización disminuye al aumentar el valor de K [1]. Por tanto, el valor de K que optimiza el control sería $K=\infty$. Lógicamente este valor supone una corriente también de valor infinito, cosa que es imposible. Tenemos la limitación real del magnetotérmico de protección del horno que son 16 A. Esta limitación la incorporamos al diseño añadiendo un módulo de saturación a la entrada del horno con estos 16A. Aunque el aumento de la ganancia hace el sistema más rápido, puede generar problemas debido a dinámicas no modeladas y requerir valores de corriente que el sistema no es capaz de generar.

Una vez se tuvo el diseño del sistema, se procedió a sintonizar manualmente el controlador PID. Al existir cierto nivel de ruido y no aportar mejora al sistema, no se utilizó la parte derivativa, así que el controlador feedback se convierte en un PI. Al tener una saturación tan limitante, se acumula mucho error al principio hasta que deja de actuar, momento en el cual la parte integral del control descarga su valor produciendo "wind-up". Por tanto, en la parte integral se adoptó el anti-windup que proporciona MatLab en el módulo del controlador PID. Después de diversos ensayos



probando valores de la parte proporcional e integral del módulo PID, se llegó a la siguiente configuración:

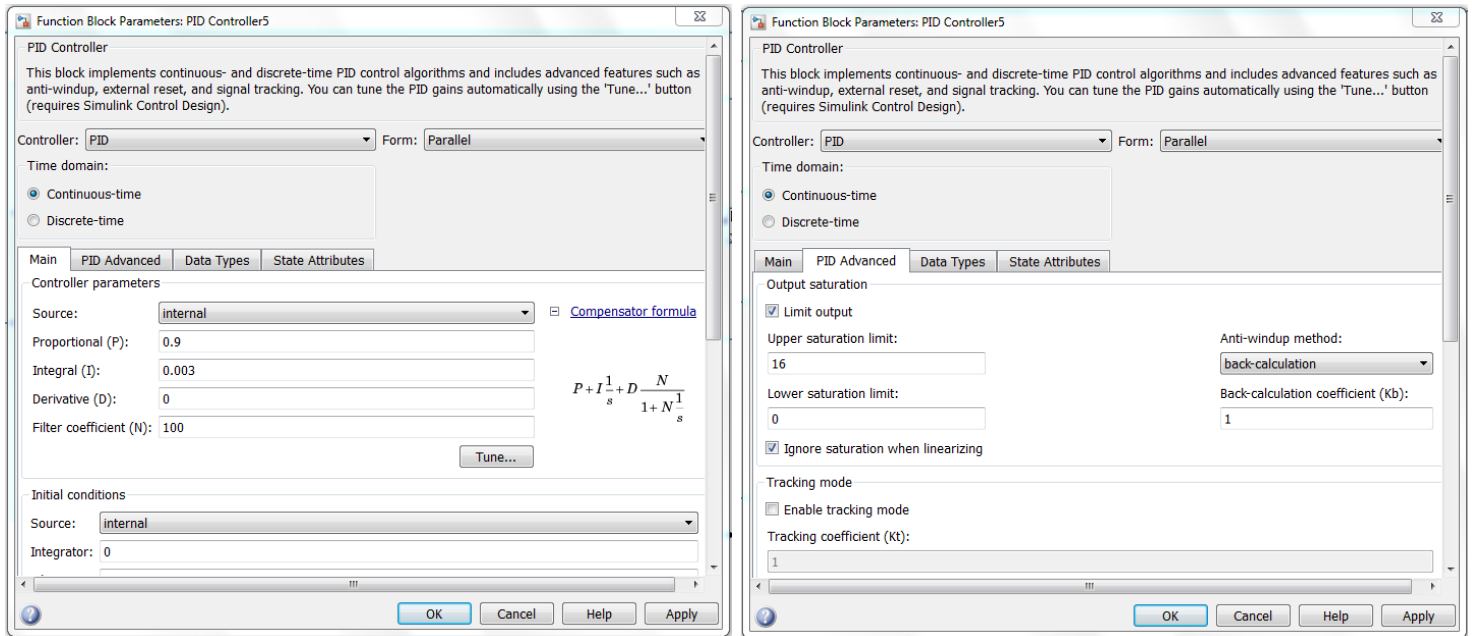


Figura 38: Configuración del PI en Matlab

En la figura 38 se puede ver la configuración del PI en Matlab. La función de transferencia de controlador quedaría así:

$$D(s) = P + I \frac{1}{s} = 0.9 + 0.003 \frac{1}{s} = \frac{0.9s + 0.003}{s} = 0.9 * \frac{s + 0.0033}{s}$$

Así, el controlador es: $D(s) = 0.9 * \frac{s+0.0033}{s} + antiwindup$

Con esta configuración se hicieron simulaciones a distintos valores de temperatura de consigna y potencia de bombardeo. En las siguientes figuras se exponen algunos de los resultados.



CONSIGNA 250°C Y BOMBARDEO 200W:

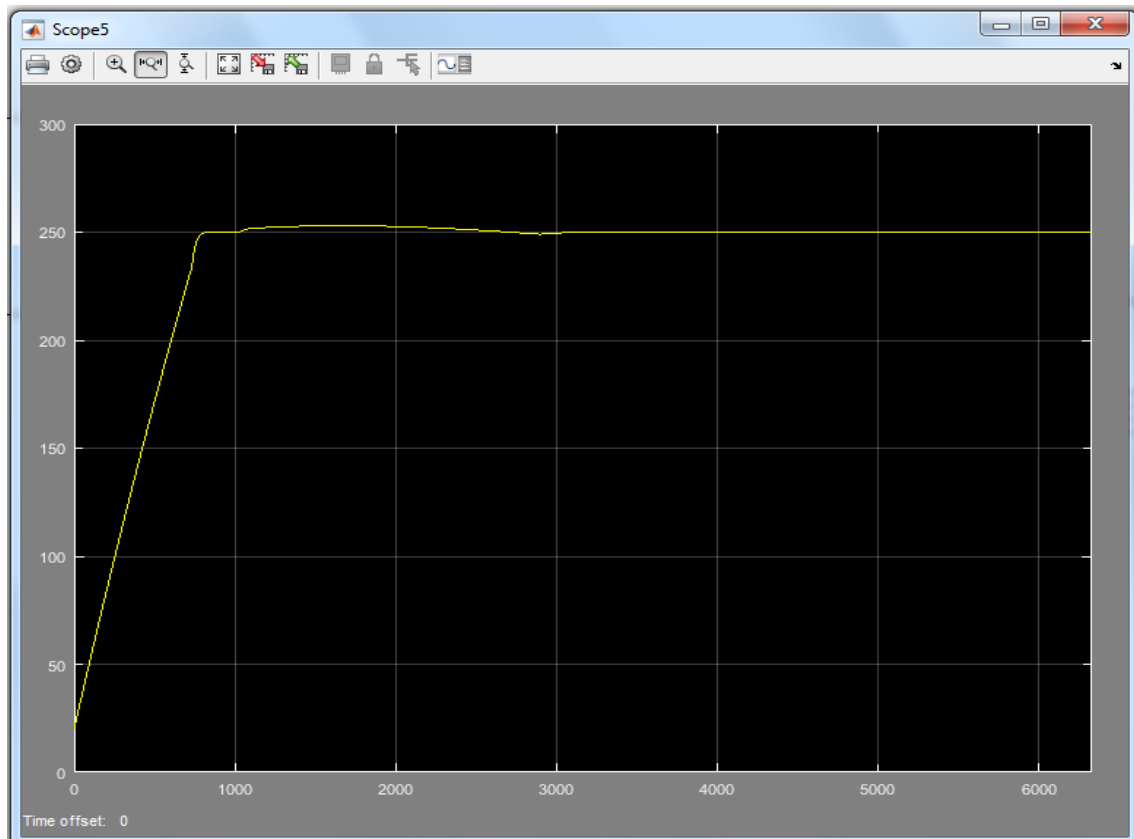


Figura 39: respuesta del sistema con setpoint de 250 °C y bombardeo a 200W

La figura 39 representa una simulación en Matlab de la respuesta del sistema cuando se le fija un setpoint de 250 °C y un bombardeo iónico de 200W. Se puede observar el cambio de pendiente que hay a los 800 segundos cuando conmuta de un modelo lineal a otro.

También se observa un sobrepasamiento de unos 5°C que podría indicar que el modelo lineal en el primer punto de operación está usando un modelo de enfriamiento que no es correcto.

Lógicamente, esto se probará en el sistema real, y si el sobrepasamiento es mayor al de la simulación se valorará añadir otro punto de operación intermedio.

Probablemente se puede llegar a alcanzar esta temperatura solamente con el bombardeo iónico.



CONSIGNA 300°C Y BOMBARDEO 200W

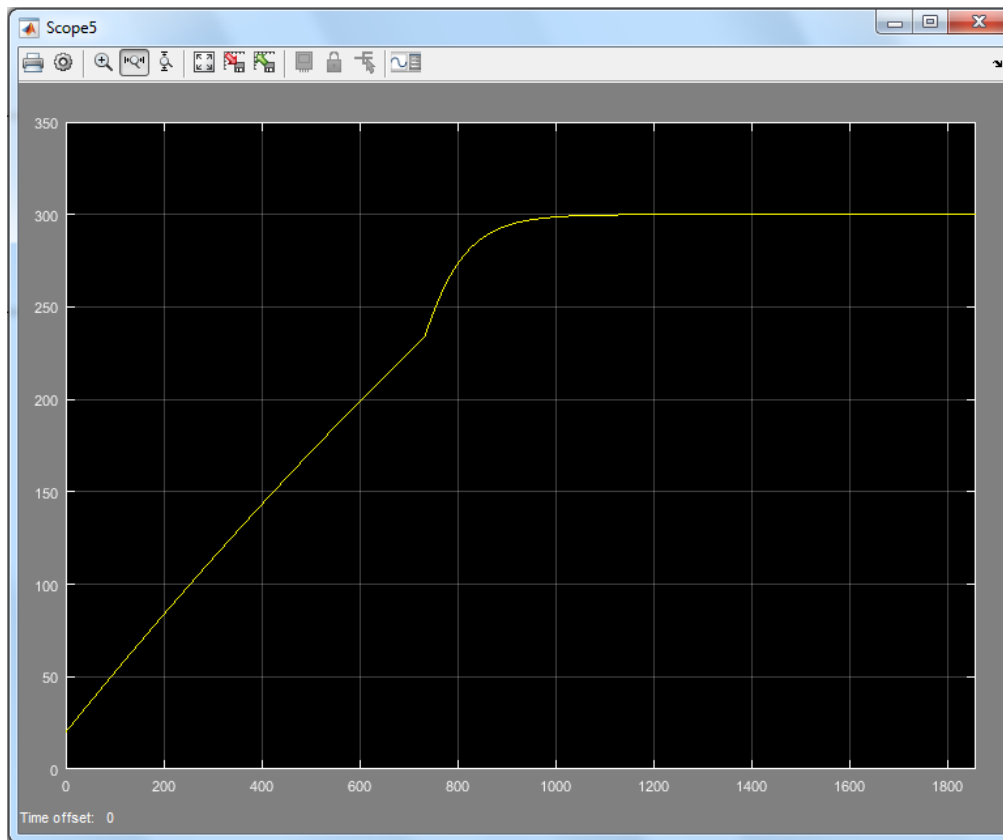


Figura 40: respuesta del sistema con setpoint de 300 °C y bombardeo a 200W

La figura 40 representa una simulación en Matlab de la respuesta del sistema cuando se le fija un setpoint de 300 °C y un bombardeo iónico de 200W. Se puede observar el cambio de pendiente que hay a los 730 segundos cuando conmuta de un modelo lineal a otro. Lógicamente, en el sistema real no se verá una transición tan brusca al pasar de un modelo lineal a otro, pero se valorará si es correcta y si la temperatura final alcanzada es tan precisa.

En esta simulación no hay sobrepasamiento, y el ajuste al valor final es muy acertado.



CONSIGNA 500°C Y BOMBARDEO 500W:

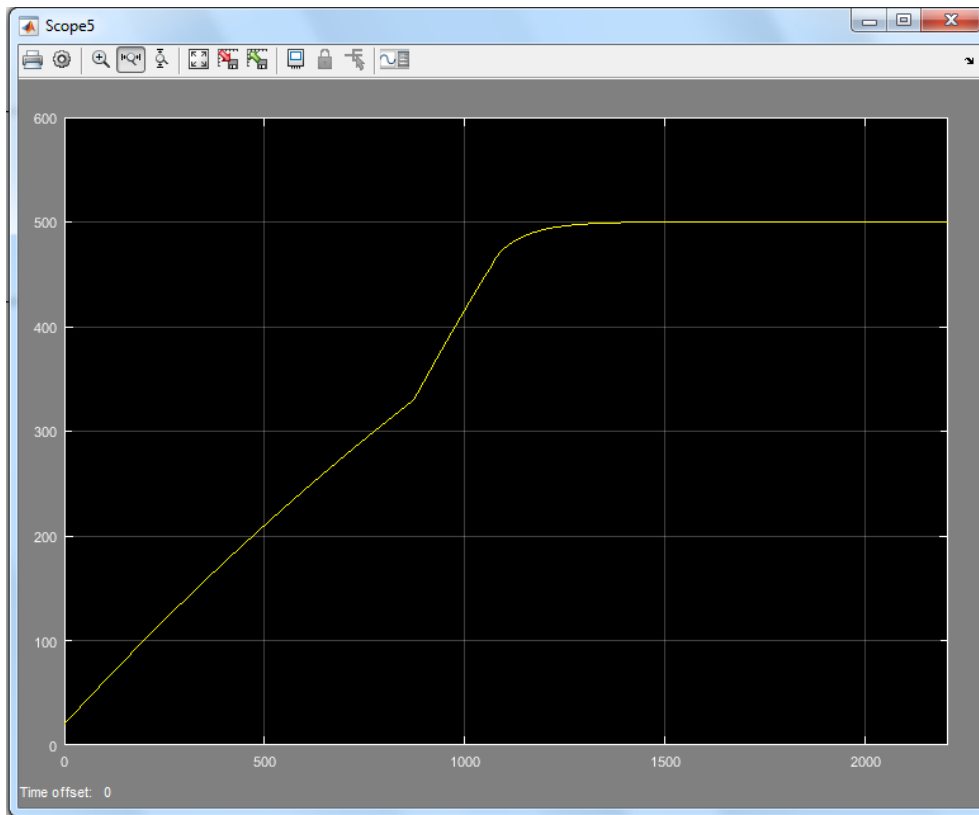


Figura 41: respuesta del sistema con setpoint de 500 °C y bombardeo a 500W

La figura 41 representa una simulación en Matlab de la respuesta del sistema cuando se le fija un setpoint de 500 °C y un bombardeo iónico de 500W. Se puede observar el cambio de pendiente que hay a los 850 segundos cuando conmuta de un modelo lineal a otro. Lógicamente, en el sistema real no se verá una transición tan brusca al conmutar de un modelo lineal a otro, pero se valorará si es correcta y si la temperatura final alcanzada es tan precisa.

En esta simulación no hay sobrepasamiento, y el ajuste al valor final es muy acertado.



CONSIGNA 600°C Y BOMBARDEO 600W:

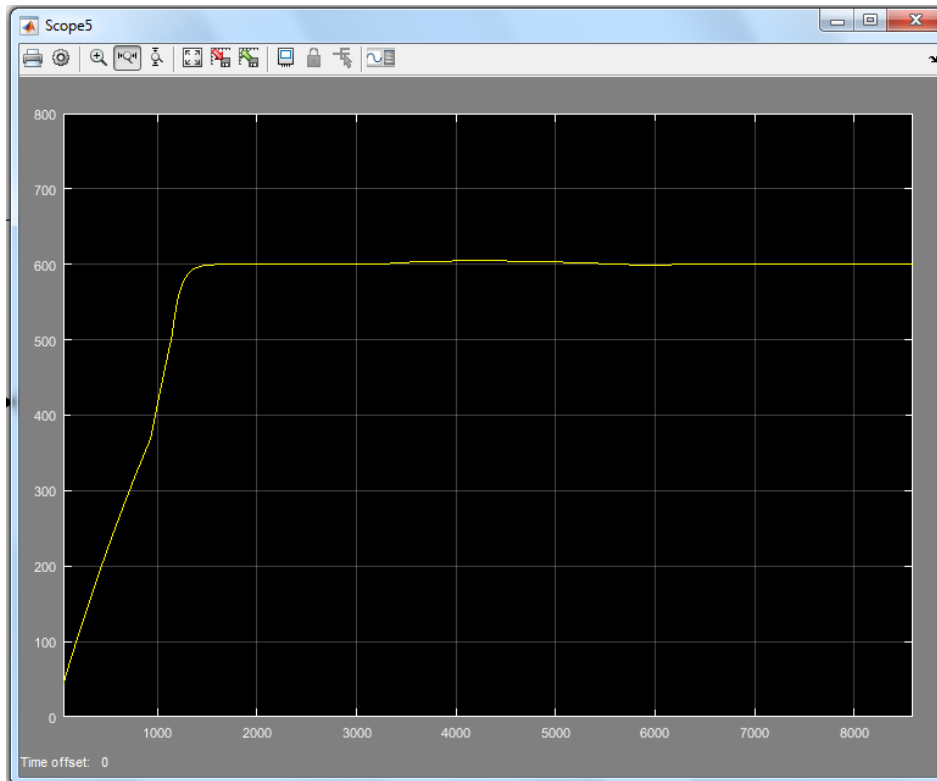


Figura 42: respuesta del sistema con setpoint de 600 °C y bombardeo a 600W

La figura 42 representa una simulación en Matlab de la respuesta del sistema cuando se le fija un setpoint de 600 °C y un bombardeo iónico de 600W. Se puede observar la anomalía del cambio de pendiente que hay a los 900 segundos cuando conmuta de un modelo lineal a otro.

Aparece un ligero sobrepasamiento de 5°C a los 3500 segundos, después de estar estabilizada. El ajuste del valor final es muy acertado.

En el sistema real no se verá una transición tan brusca al conmutar de un modelo lineal a otro, pero se observará si se hay sobrepasamiento, en cuyo caso se considerarán los puntos de operación y el modelo de enfriamiento.



CONSIGNA 650°C Y BOMBARDEO 600W:

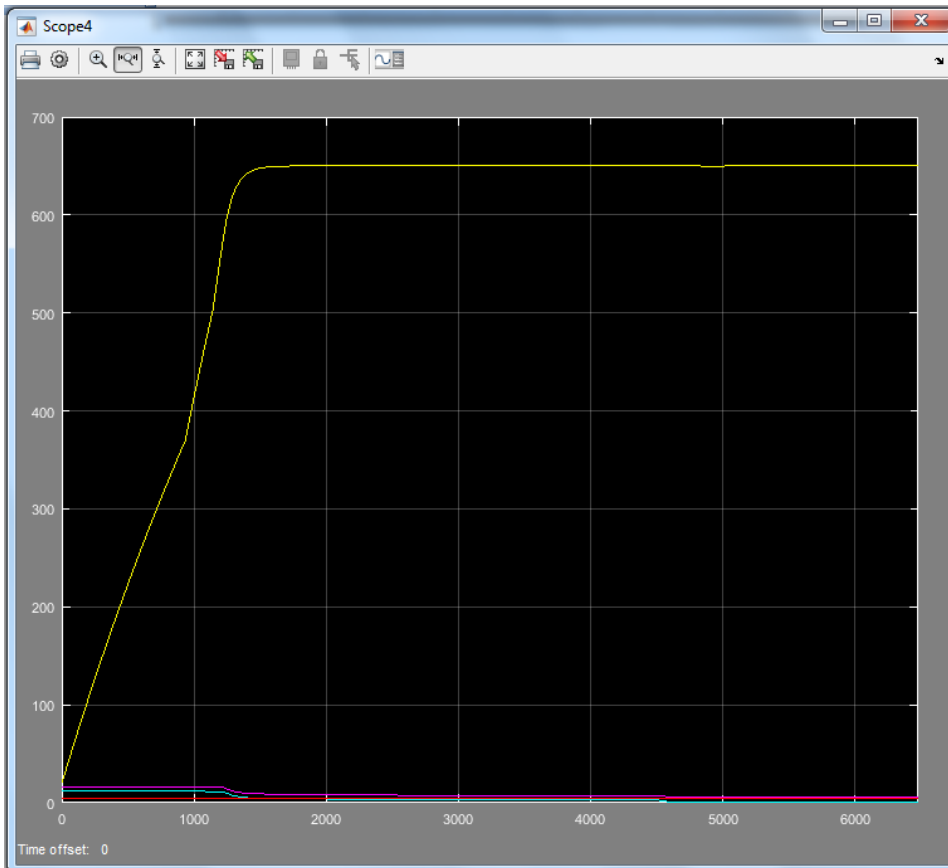


Figura 43: respuesta del sistema con setpoint de 650 °C y bombardeo a 600W

La figura 43 representa una simulación en Matlab de la respuesta del sistema cuando se le fija un setpoint de 650 °C y un bombardeo iónico de 600W. Se puede observar la anomalía del cambio de pendiente que hay a los 900 segundos cuando conmuta de un modelo lineal a otro.

En estas condiciones no aparece sobrepasamiento. El ajuste del valor final es muy acertado.

En el sistema real no se verá una transición tan brusca al pasar de un modelo lineal a otro, pero se observará si la respuesta es correcta.



12. CONCLUSIONES:

En el trabajo realizado en este proyecto se ha contemplado los siguientes aspectos:

- 1.- Se han desarrollado modelos del horno de vacío.
- 2.- Se han desarrollado modelos del bombardeo iónico.
- 3.- Se ha desarrollado una estructura de control feedforward+feedback para el sistema de implantación iónica.
- 4.- Se han escogido controladores apropiados
- 5.- Se ha simulado el sistema, encontrando un control aceptable.

Por otra parte, otro objetivo que se deseaba cumplir consistía en aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera a un caso real para profundizar en el conocimiento de algunos aspectos.

13. ACCIONES FUTURAS

- Para alcanzar el objetivo de controlar la temperatura de las muestras en el proceso de implantación iónica por inmersión en plasma sería necesario continuar este trabajo implementando la estructura de control propuesta y los controladores. Para ello, sería necesario desarrollar un algoritmo para implementarlo en un autómata, donde se filtrará la salida del sensor de forma analógica para reducir el ruido y prevenir aliasing.
- Diseñar o adquirir el actuador para transformar la tensión de salida del controlador en la corriente necesaria para alimentar el horno.
- Una vez implementado se realizarán ensayos donde se confirmará si el comportamiento del sistema real cumple con las especificaciones y es por tanto adecuado. En caso contrario se valorará, según sea preciso:
 - 1.- Añadir más puntos de operación o realizar otro tipo de conmutación de los modelos lineales.
 - 2.- Optimizar los parámetros del controlador.
 - 3.- Modelar la etapa de enfriamiento.



14. BIBLIOGRAFIA

- [1] J.B. Galván, "Control Analógico de Sistemas Lineales", Univ. Pública de Navarra, 2009, p. 87.
- [2] K. Ogata, "Ingeniería de control moderna", Pearson Educación, S.A., Madrid, 2010.
- [3] A.E. Muñoz, "Implantación iónica por plasma en titanio y aceros inoxidable usados en prótesis e instrumental médico", tesis doctoral, Uni. Autónoma del estado de México, Toluca, Mexico, Sep. 2008, pp. 3-11.
- [4] R.J. Shul, "Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition", Ed. André Anders, 2000.
- [5] Arkadiy Turevskiy, "Introduction to System Identification Toolbox", MathWorks, <https://es.mathworks.com/videos/introduction-to-system-identification-toolbox-68901.html>