

Capítulo 3

Metodología

El carácter del proyecto es de tipo experimental, esto implica que el proceso se enfocó -mas no se limitó- a la recolección y análisis de información con el objetivo de concluir si el módulo de Young de piezas termorociadas, el cual es obtenido por el método de la curvatura, es independiente de la geometría de la pieza. Como se ha descrito previamente, la teoría alrededor de procesos de TR sugiere ciertos comportamientos predeterminados de los materiales implicados: base y recubrimiento. Aún así, la teoría de deformación de placas bi-metálicas ante gradientes de temperatura en geometrías bidimensionales tridimensionales supone el advenimiento de una investigación más detallada. Así, con el objetivo de analizar el comportamiento de dichos cuerpos y extender, por ende, el modelo teórico, se implementó una estación de medición, que bajo una adecuada calibración, permitiese medir la deformación de placas multiformes a diferentes temperaturas. Las secciones subsecuentes detallan el desarrollo de la estación de trabajo desde un punto de vista funcional; es decir, haciendo hincapié en su modo de funcionamiento más que en su construcción o diseño.

3.1. Estructura Física

La estación de trabajo debía tener ciertas características adecuadas para el desarrollo del proyecto. en primer lugar, debía estar ubicado dentro del espacio de trabajo de uno de los brazos robóticos disponibles en el laboratorio de robótica de la Universidad San Francisco de Quito cuyas instalaciones serían puestas a disposición del proyecto. Además, las estación debería estar en la capacidad de poder anclar y sujetar piezas de diversos tamaños y tener la capacidad de incorporar una cámara web para registrar en video el proceso de deformación y de toma de datos. Por último, debía estar en capacidad de soportar altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de deformación de las probetas de análisis.

Para el desarrollo de la estructura física de la estación se buscó adaptar la mesa de trabajo propia del brazo robótico SCORA-ER. Este robot de 4 grados de libertad fue elegido debido a su alta resolución en movimiento, su alta precisión y su nivel de vibraciones mecánicas menor que el de otros robots disponibles (más información del robot en la sección de anexos). La mesa de trabajo de aproximadamente $1m$ de largo y $50cm$ de ancho permitiría el montaje de la estación de trabajo sobre ésta. La Figura 3.1 muestra el resultado de la adaptación del espacio:

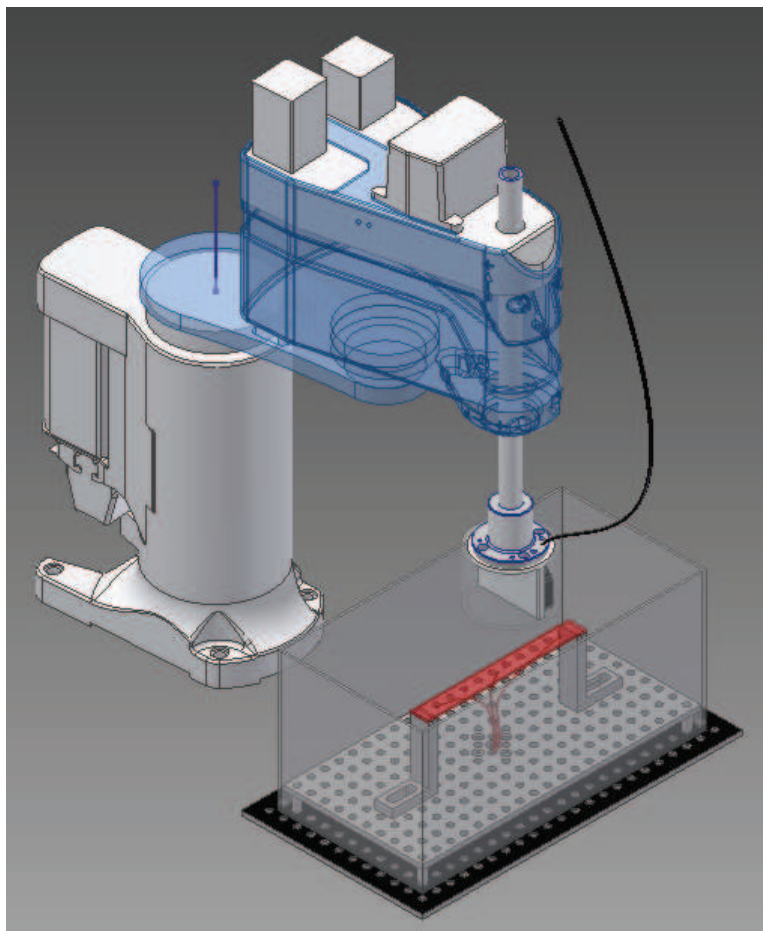


Figura 3.1: Modelo Tridimensional de la Estructura Física. (El modelo del robot se obtuvo de la página del fabricante [Chung(1990)]).

Como se observa en la Figura 3.1, sobre la mesa de sujeción del robot se colocó una base metálica separada de la mesa principal con el objetivo de preservar la mesa de cualquier daño causado durante el proceso de medición. Sobre esta base se colocó una plataforma metálica con un arreglo de agujeros roscados e igualmente espaciados. Estos agujeros permitirían el sujeción de soportes metálicos en forma de L que servirían de pilares para la sujeción de las probetas de análisis. Las probetas se posicionarían sobre dichos soportes y tendrían adheridas varias termocuplas que permitirían un análisis en tiempo real de la temperatura a lo largo de las mismas. El sensor debe estar sujeto a la punta del brazo robótico permitiendo así que se realicen mediciones transversales y longitudinales sobre toda la pieza o probeta. Los planos de tallados de las partes se encuentran en la

sección de anexos.

3.2. Filosofía de control

El sistema de control considera todas las situaciones posibles -de rutina y de emergencia- para poder proveer confiabilidad al sistema. El robot deberá tener una posición de equilibrio a la que acuda siempre que exista algún problema o se detenga el sistema con el botón de paro de emergencia. Esta posición será siempre la posición inicial del proceso de toma de datos o escaneo. Una vez encendido el sistema, el sistema de control debe permitir llevar a cabo el proceso de enceramamiento (*homing*) de el sistema control de trayectoria de robot. Asimismo, el sistema debería estar en capacidad de permitir la calibración de la posición inicial de escaneo. Lo que se busca con la calibración es establecer una posición de inicio y de final de la pieza que corresponda a una altura óptima dentro del rango del sensor. El sistema deberá ser capaz de almacenar en SCORBASE dicha posición.

Una vez la pieza esté en su lugar y los procesos de calibración y *homing* hayan sido llevado a cabo, el sistema debe iniciar el programa del SCORBASE que, entre otras cosas, deberá permitir que el usuario elija el método de escaneo correspondiente. Entonces, el sistema deberá esperar a que el usuario dé la señal desde la plataforma de MATLAB para activar el desplazamiento del robot. Desde la plataforma de adquisición de datos de MATLAB se podrá ver en tiempo real la pieza, almacenar un video en cualquier momento, comenzar y parar el proceso de escaneo. De esta manera se puede controlar la adquisición de datos, pararla para calentar la pieza y ver en tiempo real las curvas teórica y práctica de curvatura vs. temperatura. El proceso de escaneo paso a paso para cada tipo de piezas se explicará en las secciones siguientes.

3.3. Hardware de Control

El hardware de Control se refiere al conjunto de circuitos desarrollados con el objetivo de producir una intercomunicación e interacción entre el software de control del robot (SCORBASE), el software de adquisición de datos (MATLAB) y los sensores y dispositivos tales como las termocuplas, la cámara web, el sensor de distancia láser e inclusive el controlador del mismo robot. El circuito diseñado se muestra en la Figura 3.2:

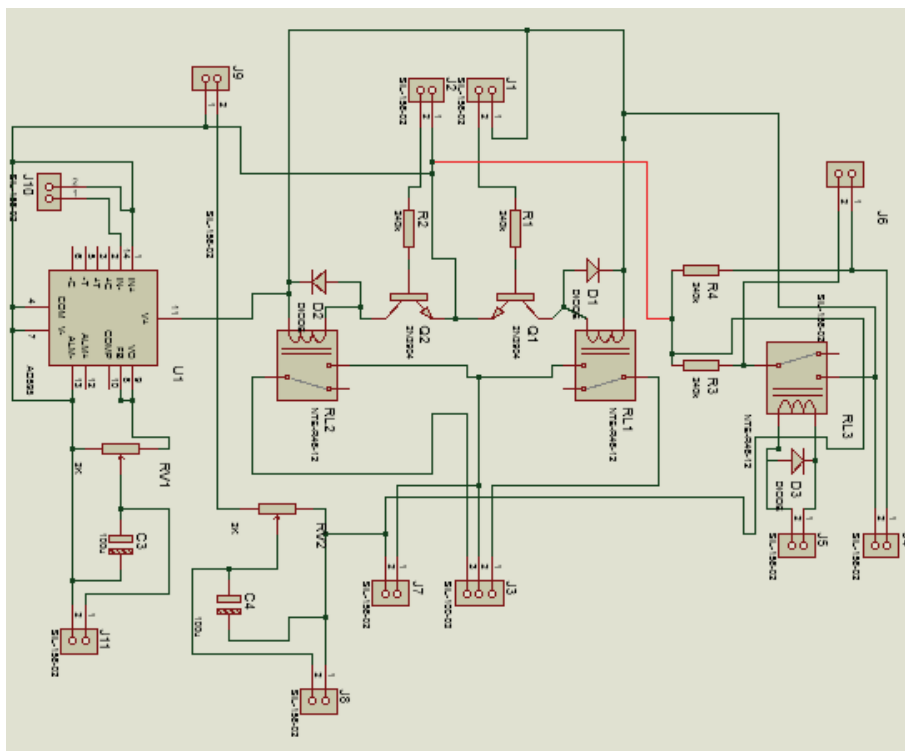


Figura 3.2: Esquema del circuito de control diseñado en Proteus.

El circuito se puede resumir en un arreglo de acoplamientos entre los diversos dispositivos. Con el objetivo de hacer la explicación de los circuitos mucho más clara, se analizarán los puertos (J_i) de entrada y salida y su respectiva interconectividad:

1. **Conector J_1 :** al puerto 1 de ésta bornera se conectan $5V+$ provenientes de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212 y uno de los puertos

digitales de salida, en este caso el puerto P06 de la misma tarjeta. Los 5V se distribuyen para diversos circuitos con relé mientras que el puerto digital se conecta mediante una resistencia de 10kohm a un transistor que activa un relé conectado a la bornera de salida J_3 .

2. **Conector J_2** : al puerto 1 de ésta bornera se conectan 0V provenientes de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212 y uno de los puertos digitales de salida, en este caso el puerto P06 de la misma tarjeta. Los 0V sirven de referencia para diversos circuitos con relé mientras que el puerto digital se conecta mediante una resistencia de 10kohm a un transistor que activa un relé conectado a la bornera de salida J_3 . Los 0V se conectan a la referencia del controlador del robot con el objetivo de no tener tierras flotantes y tener todos los voltajes a una misma referencia.
3. **Conector J_3** : al puerto 2 de ésta bornera se conectan 24V provenientes de la bornera J_7 . Estos 24V se conectan a la entrada común de los relés activados por las borneras J_1 y J_2 respectivamente. Los otros dos puertos se conectan a los extremos NO (Normalmente Abiertos) de los relés antes mencionados. Estos 2 puertos deberán ser interconectados con las entradas digitales del controlador del robot.
4. **Conector J_4** : El puerto 1 de esta bornera se conecta al puerto 1 de la bornera J_6 mediante una resistencia de pull-down para mantener la referencia a cero en caso de no conexión. En su otro extremo, este puerto estará conectado a la salida NO (Normalmente abierta) de la salida digital 3 del controlador del robot. El puerto 2, por el otro lado, se conecta a 5V que se alimentan a la entrada *común* de la salida digital 3 del controlador del robot (salida tipo relé).
5. **Conector J_5** : Los puertos de esta bornera se conectan a la salida digital 5 del controlador del robot, esta salida es de tipo colector común por lo que

requiere de un relé externo (RL3) para activar la salida que se conectará al puerto $J6$.

6. **Conector J_6 :** El puerto 1 recibe la señal desde el puerto 1 de la bornera J_4 mientras que el puerto 2 de esta bornera recibe la señal del relé RL3 que se activa con la señal de la bornera J_5 . Por el otro extremo, estas entradas pasan a entradas digitales de la DAQ (Data Acquisition Card) NI USB 6212. Los puertos utilizados son P01 y P02.
7. **Conector J_7 :** al puerto 1 y 2 de ésta bornera se conectan $24V+$ y $0V$, respectivamente, provenientes del controlador del robot. Los $24V$ se distribuyen conectan a los relés activados por las entradas digitales de las borneras J_1 y J_2 . Por su lado, el valor de $0V$ se conectan a la referencia del la DAQ con el objetivo de no tener tierras flotantes y tener todos los voltajes a una misma referencia.
8. **Conector J_8 y J_9 :** estas borneras permiten interconectar el sensor láser de distancia hacia la tarjeta de adquisición de datos haciéndole pasar antes por un filtro pasa bajos formado por el capacitor C4 y el potenciómetro RV2. En la bornera J_8 se conecta el sensor y en la bornear J_9 se recupera la señal filtrada y la alimenta a la DAQ.
9. **Conector J_{10} :** a esta bornera se conectan los extremos de la termocupla central que es la que permite graficar las curvas deformación vs. temperatura. en tiempo real.
10. **Conector J_{11} :** estas bornera permite recuperar la señal de temperatura una vez que ha sido amplificada y modificada mediante el filtro pasabajos formado por el capacitor C3 y el potenciómetro RV1. Este señal es entonces alimentada a la DAQ.

El circuito fue diseñado en PROTEUS con el objetivo de poder realizar un

modelamiento tridimensional además de tener la plataforma para la construcción de la placa PCB. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran el modelo 3D y PCB:

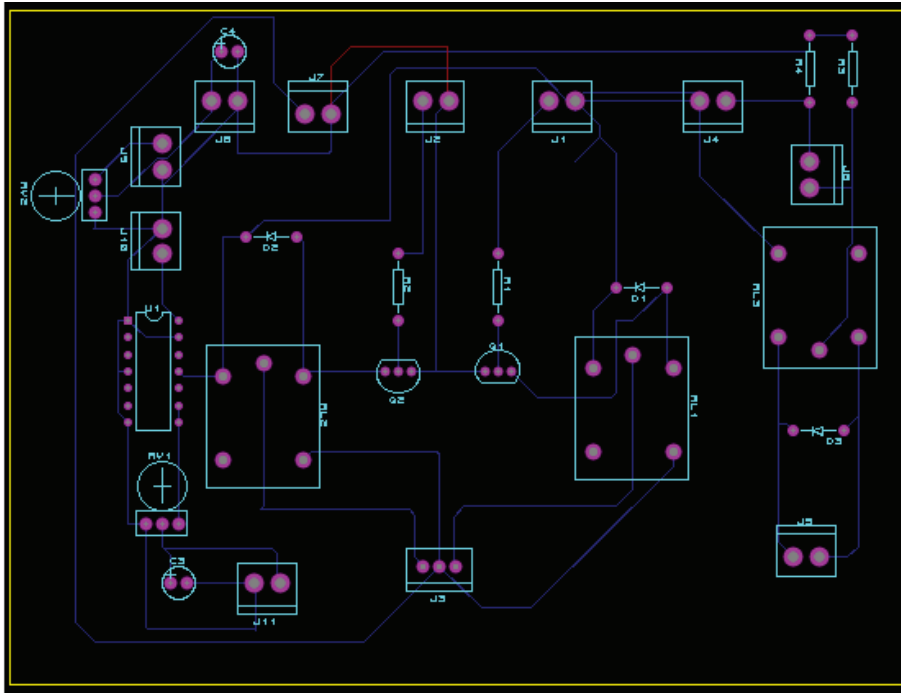


Figura 3.3: Esquema del circuito de control para PCB diseñado en Proteus.

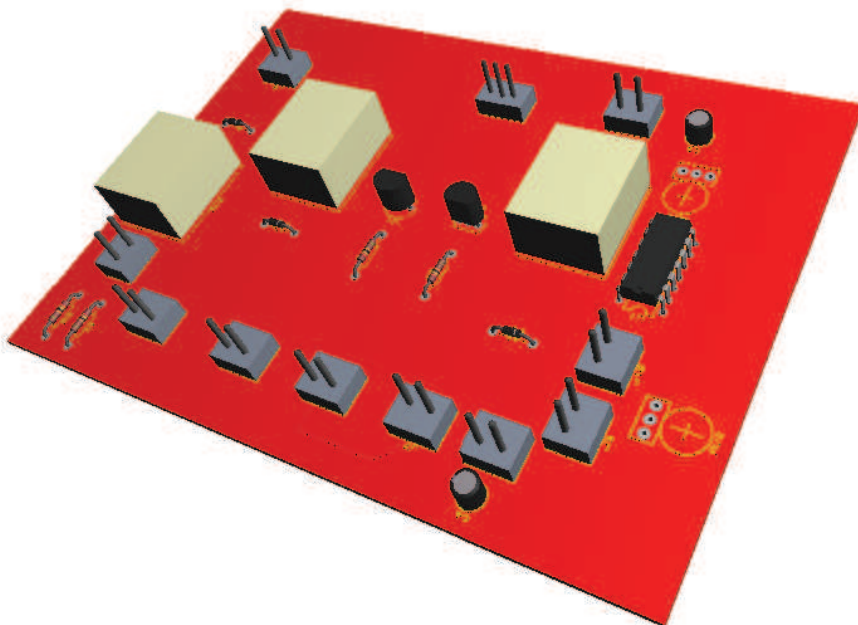


Figura 3.4: Esquema del circuito de control diseñado en Proteus - Modelo 3D.

Con el objetivo de calibrar los valores de voltaje suministrados por el circuito

de adaptación de la termocupla, se utilizó un termómetro análogo de mercurio y el un termómetro digital OMEGA” para determinar la curva de linealización. Los resultados se muestran en la Figura 3.5:

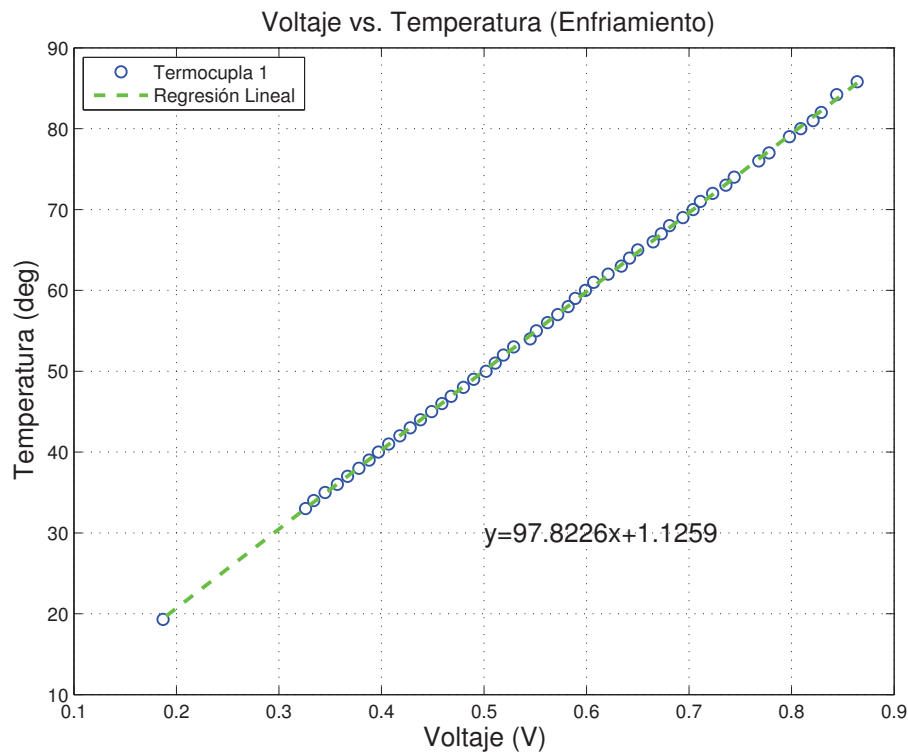


Figura 3.5: Curva de Calibración de la termocupla.

Los datos de la regresión lineal fueron provistos al software de adquisición de datos para la correcta medición de temperatura.

3.4. Software de Control MATLAB

El software de control se refiere a la plataforma HMI programada para que el usuario tenga control del sistema en general, interactúe con el mismo y pueda, en tiempo real, visualizar los resultados obtenidos por el sistema de medición. La estructura de control se compone por varias centenas de líneas de código que se encuentra en la parte de ANEXOS, en el caso que se desee un análisis más exhaustivo del mismo. El software de control fue desarrollado usando la herra-

mienta de GUI (Graphic User Interface) de MATLAB. Esta herramienta permite el desarrollo en conjunto de la plataforma gráfica junto con la programación que corre por detrás y a la cual el usuario no tiene acceso. Se realizaron dos plataformas dependiendo del tipo de escaneo: lineal o superficial. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de ellos.

3.4.1. Unidimensional

Esta plataforma fue diseñada para adquirir datos de probetas cuyo ancho sea considerablemente menor que su longitud. Esta asunción permite realizar medición a lo largo de la pieza sin prestar atención a su deformación transversal. La Figure 3.6 muestra el diseño de la plataforma gráfica para la adquisición de datos en una placa con asunción unidimensional.

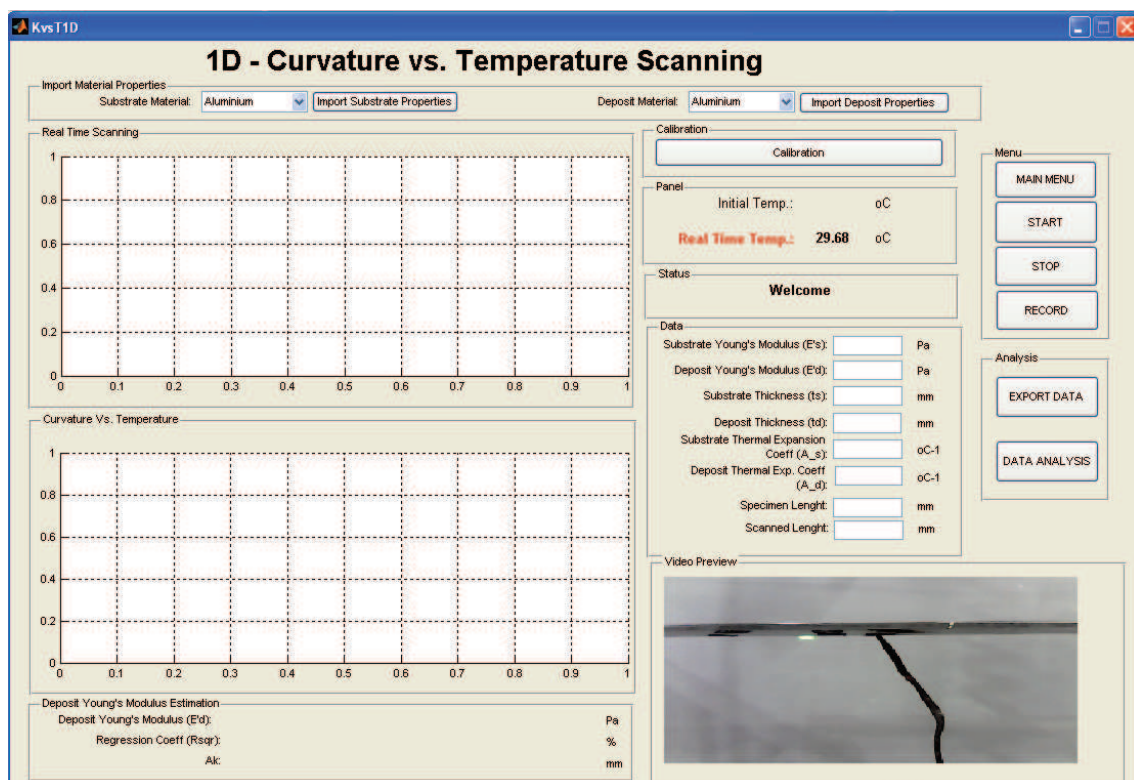


Figura 3.6: GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Control.

En general, el funcionamiento de la plataforma gráfica es amigable con el usuario y basta una explicación no muy detallada para entender su funcionamiento. A

continuación se explicarán uno a uno cada uno de los elementos de la plataforma GUI:

1. **Substrate Material Pop-up-menu:** Permite seleccionar el material del sustrato de una lista predefinida.
2. **Deposit Material Pop-up-menu:** Permite seleccionar el material del depósito o recubrimiento de una lista predefinida.
3. **Import Substrate Button:** Permite importar las propiedades del material del sustrato seleccionado previamente a través de su respectivo pop-menu.
4. **Import Deposit Button:** Permite importar las propiedades del material del depósito seleccionado previamente a través de su respectivo pop-menu.
5. **Calibration Button:** Mientras está activo, muestra sobre la gráfica Real Time Scanning” la medición actual del sensor de distancia para permitir un ajuste de la posición inicial y final del proceso de escaneado.
6. **Initial Temp. Indicator:** Muestra la temperatura de la pieza en el inicio de ciclo de toma de datos. Esta temperatura es adquirida automáticamente del sensor de temperatura en base a los datos obtenidos durante el primer ciclo de datos.
7. **Real Time Temp. Indicator:** Muestra la temperatura instantánea de la pieza con una frecuencia de muestreo de 2Hz.
8. **Status Indicator:** Muestra el estado del sistema que puede ser uno de los siguiente:
 - a) **Welcome:** Mensaje mostrado al iniciar el software antes de realizar ninguna operación o medición.
 - b) **Calibrating:** Mensaje mostrado mientras el botón de calibración está presionado.

- c) **Getting Data:** Mensaje mostrado mientras el proceso de adquisición de datos está en proceso.
- d) **Wait:** Mensaje mostrado entre toma de datos.
9. **Substrate Young's Modulus Input:** Permite ingresar el valor del módulo de elasticidad esperado del sustrato Pa . En general se usa el valor del *bulk*.
10. **Deposit Young's Modulus Input:** Permite ingresar el valor del módulo de elasticidad esperado del recubrimiento en Pa . En general se usa un valor un poco menor al del *bulk*.
11. **Substrate Thickness Input:** Permite ingresar el valor del espesor del material base o sustrato en unidades de mm . Tanto el modelo teórico como la regresión lineal son bastante sensibles a este valor por lo que se sugiere que éste sea lo más preciso posible.
12. **Deposit Thickness Input:** Permite ingresar el valor del espesor del material de aporte o recubrimiento en unidades de mm . Al igual que con el espesor del sustrato, se sugiere que este valor sea lo más preciso posible.
13. **Substrate Thermal Expansion Coeff. Input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de expansión térmica (CTE, en inglés) del material base o sustrato en unidades de oC^{-1} .
14. **Deposit Thermal Expansion Coeff. Input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de expansión térmica (CTE, en inglés) del recubrimiento o depósito en unidades de oC^{-1} .
15. **Length Input:** Permite ingresar el valor de la longitud de la pieza en unidades de mm .
16. **Scanned Length Input:** Permite ingresar el valor de la longitud de la sección de la pieza que va a ser escaneada en unidades de mm .

17. **Deposit Young's Modulus Indicator:** Este indicador muestra el valor del módulo de elasticidad experimental obtenido por medio de una regresión lineal aplicada sobre los valores experimentales de curvatura obtenidos en cada muestreo. Requiere que todos los *Inputs* estén determinados.
18. **Regresion Coefficient Indicator:** Este indicador muestra el valor estadístico R^2 de la regresión lineal. Como se trata de un regresión lineal de una sola variable, entonces el valor de R^2 es una medida de que tan lineal es el comportamiento de los valores experimentales. Valores por sobre el 95 % muestra una alta linealidad y validación del modelo.
19. **Ak Indicator:** Este indicador muestra el valor del desplazamiento máximo en toda la pieza. Da una idea de cuánto se ha deformado la pieza durante el proceso de adquisición de datos.
20. **Main Menu Button:** Este botón cierra la plataforma inicial y muestra el menú principal en donde se elige el método de toma de datos en función de la geometría de la pieza.
21. **Start Button:** Este botón inicia el proceso de adquisición de datos. Al presionar este botón, se envía una señal al robot SCORA-ER para que comience el barrido del sensor sobre la pieza. Cuando el sensor se ubica en posición inicial predeterminada, éste envía una señal al programa para que comience la toma de datos. Asimismo, una vez alcanzada la posición final, el robot envía una señal de parada al software para que detenga la adquisición de datos. Posteriormente, el programa entra a espera de una nueva orden.
22. **Stop Button:** Este botón detiene el proceso de adquisición de datos y envía el robot a una posición segura. Se usa es botón al finalizar el proceso de toma de datos o cuando un evento inesperado ha motivado la ejecución

de la rutina de emergencia.

23. **Record Button:** Este botón inicia el proceso de adquisición de imagen desde la cámara web entrelazada directamente con el software. En la esquina inferior derecha se muestra la imagen adquirida por la cámara en tiempo real. Al presionar el botón, un video a 10 frames por segundo se almacena en memoria. Se activa este botón durante el calentamiento de la pieza con el fin de visualizar el proceso de deformación.
24. **Export Data Button:** este botón muestra un cuadro de diálogo mediante el cual se puede almacenar todos los datos adquiridos por el sistema para luego ser analizados.
25. **Data Analysis Button:** este botón cierra la plataforma de adquisición de datos actual y abre una nueva plataforma que permitirá el análisis de datos previamente obtenidos.
26. **Real Time Scanning Plot:** Muestra en tiempo real los datos obtenidos por el sensor en cada una de los ciclos durante la toma de datos.
27. **Curvature vs. Temperature Plot:** Durante el proceso de adquisición de datos, muestra en tiempo real la temperatura en cada una de los ciclos. Una vez se ha concluido la adquisición de datos, muestra la curva Curvatura vs. Temperatura teórica y experimental.

3.4.2. Bidimensional

Esta plataforma fue diseñada para adquirir datos de probetas cuyo ancho supere a la décima parte de su longitud. Para utilizar el método de determinación de la curvatura a partir de la medición de la deflexión en tres puntos, se requiere una metodología de adquisición diferente. El módulo de elasticidad ocupado tanto

para la plataforma unidimensional como bidimensional es el corregido por el coeficiente de Poisson: $\frac{E}{1-\nu}$. La Figure 3.7 muestra el diseño de la plataforma gráfica para la adquisición de datos en una placa con asunción unidimensional.

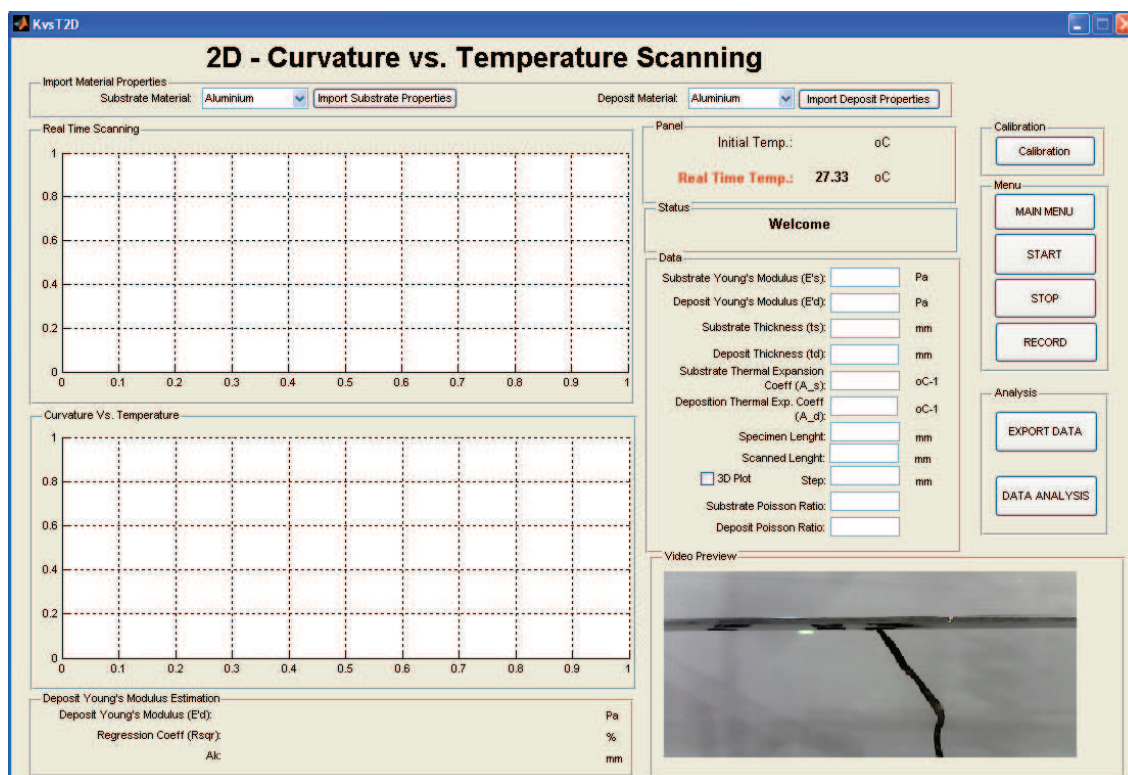


Figura 3.7: GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Control-Escaneo Superficial.

En general, el funcionamiento de la plataforma gráfica es amigable con el usuario y basta una explicación no muy detallada para entender su funcionamiento. La mayoría de elementos son similares a las del software de escaneo unidimensional explicado anteriormente por lo que a continuación se explicarán únicamente los elementos que no han sido cubiertos en la sección anterior:

1. **Step input:** Permite ingresar la distancia entre barridos del escáner sobre la pieza. Este valor debe coincidir con el valor ingresado en SCORBASE para tener una reconstrucción adecuada.
2. **Substrate Poisson input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de Poisson del sustrato. Este valor es adimensional.

3. **Deposit Poisson input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de Poisson del sustrato. Este valor es adimensional. Este valor es usado para la estimación del módulo de Young del depósito.
4. **3D plot Check Box.-** Al tener activada esta casilla, luego de la adquisición de datos se realizará un plot con la superficie escaneada.

3.5. Software de Control SCORBASE

El robot SCORA-ER usado para el escaneo y medición de las deformaciones se controla a través un software propietario provisto de fábrica. El Software lleva el nombre de SCORBASE y presenta una interfaz gráfica amigable para el control del robot. La Figura 3.8 muestra dicha interfaz.

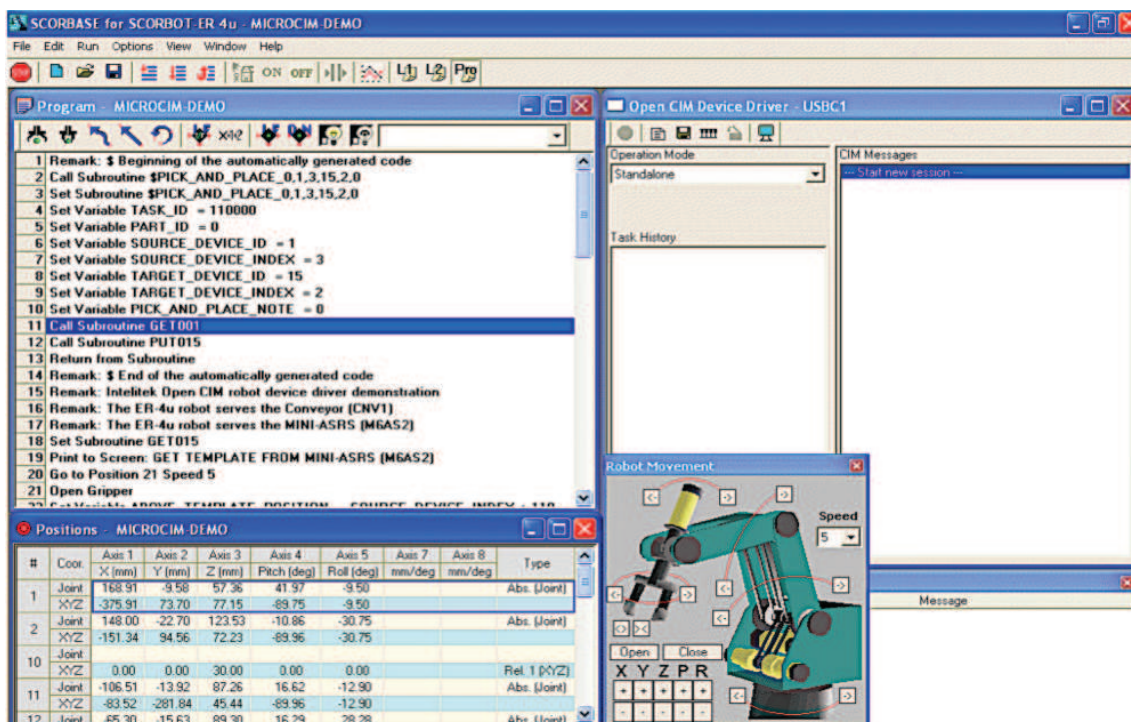


Figura 3.8: Interfaz SCORBASE.

Este software interactúa con un PLC Intelitek que tiene varios puertos de entrada y salida que permite programar interacciones con otros sistemas. Los módulos del PLC se muestran en las Figuras 3.9 y 3.10 [Intelitek(2008)]:

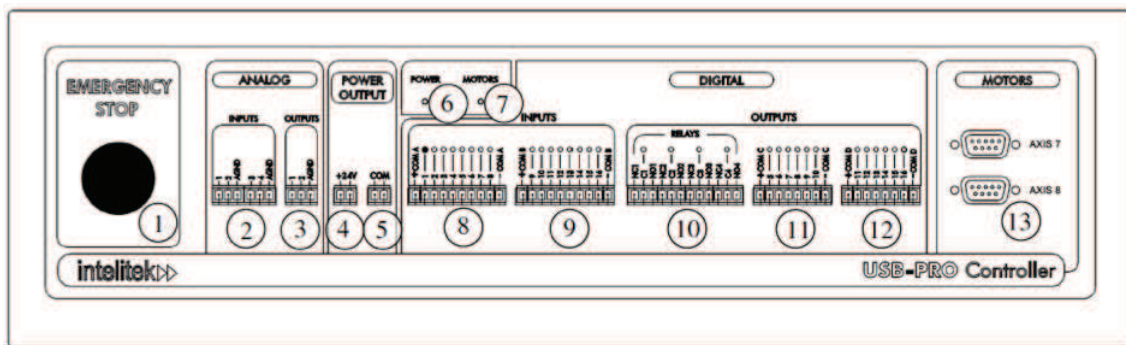


Figura 3.9: Interfaz SCORBASE.

PIN	DESCRIPCIÓN
1	Botón emergencia
2	Entrada analógica 1 a 4
3	Salida analógica 1 y 2
4	Salida +24V
5	Común de salida 24V
6	Indicador del estado del controlador
7	Indicador del estado del motor
8	Entrada digital 1 a 8
9	Entrada digital 9 a 16
10	Salida digital (relays) 1 a 4
11	Salida digital (colector abierto) 5 a 10
12	Salida digital (colector abierto) 11 a 16
13	Conectores de ejes auxiliares 7 y 8

Figura 3.10: Interfaz SCORBASE.

El diseño del sistema requería el manejo de dos señales de entrada y dos señales de salida conectadas en sus respectivos puertos siguiendo el esquemático mostrado en la Figura 3.2. Estas salidas y entradas serían utilizadas dentro del

programa de control con el objetivo de agregar la funcionalidad requerida al sistema.

El programa de control debía garantizar los siguientes requerimientos. En respuesta a una señal enviada desde el software de control (HMI) en MATLAB, el robot debía empezar el proceso de escaneo. Además, debía enviar una señal al HMI cuando se encontrase en las posiciones iniciales y finales de la pieza definidas de antemano. Luego de acabada la toma de datos debía retornar a una posición de equilibrio en espera de una nueva instrucción. Asimismo, en caso de que el botón de parada del HMI fuese presionado, el robot debía -sin importar su posición ni su tarea actual- detener toda acción y desplazarse a una posición segura. Todo este algoritmo de control fue desarrollado en SCORBASE y se describe a continuación:

3.5.1. Script

SCRIPT

```

1  MsgBox " This_script_performs_according_to_the_type_of_scanning_
    selected" ,  vbInformation,  " Scorbase_scripting_sample"
2
3  Function GetM
4      GetM= InputBox(" Enter_the_type_of_scanning_you_are_
    performing:_ (1:1D_2:2D)" )
5  End function
6
7  Function Get_Velocity
8      Get_Velocity= InputBox(" Enter_the_velocity_in_Y_axis_(mm/s)"
    )
9  End function
10
11 Function Get_StepX

```

```

12         Get_StepX= InputBox(" Enter the size of the step X-direction
                (mm) ")
13 End function
14
15 Function Get_Wide
16         Get_Wide= InputBox(" Enter the wide of the part to be scanned
                (mm) ")
17 End function
18
19 Function Get_length
20         Get_length= InputBox(" Enter the length of the part to be
                scanned (mm) ")
21 End function
22
23 Function CalcX ( Xinit , stepX )
24         CalcX=Xinit+stepX
25 End Function

```

La primera parte (SCRIPT) corresponde a las funciones externas al programa que son usadas para interactuar con el usuario, calcular posiciones, entre otras cosas. Estas fueron programadas en lenguaje *VBScript* usando un editor de texto común. El programa principal de control (*SCORBASE*) requiere que este archivo esté en su misma ubicación de directorio para poder operar. Las funciones programadas en este código son:

1. **MsgBox**: Despliega un texto de bienvenida al iniciarse el programa.
2. **GetM**: Muestra un cuadro de diálogo en cual el usuario puede determinar que tipo de escaneo quiere realizar Unidimensional o Bidimensional.
3. **GetVelocity**: Muestra un cuadro de diálogo en cual el usuario puede determinar la velocidad de avance del brazo robótico en *mm/s*.
4. **GetStepX**: Muestra un cuadro de diálogo en cual el usuario puede deter-

minar la distancia entre toma de datos en el caso de un escaneo superficial, en unidades de *mm*.

5. **GetWide**: Muestra un cuadro de diálogo en cual el usuario puede determinar el ancho aproximado de la pieza a escanear, en unidades de *mm*.
6. **GetWide**: Muestra un cuadro de diálogo en cual el usuario puede determinar el largo aproximado de la pieza a escanear, en unidades de *mm*.

3.5.2. Scorbaser

SCORBASE

```

1 Remark :
   *****
2 Remark :          SCANNER DE DEFORMACIONES
3 Remark :          UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
4 Remark :
5 Remark :          AUTOR: DANIEL GAONA ERAZO
6 Remark :          MODIFICADO: 5  ABRIL 2014
7 Remark :
   *****
8 INICIO ::
9 Remark : *****CARGA DE ARCHIVO VBS*****
10 Load script file: PROGRAMA.VBS
11 Remark : *****DEFINICION DE VARIABLES*****
12 * Print to Screen: MOVIMIENTO A POSICION SEGURA
13 Wait 2 (10ths of seconds)
14 Go to Position 10 Speed 10 (%)
15 Set Variable OUTPUT = 3
16 Set Variable STOP = 2
17 Set Variable START = 1
18 Set Variable PRESCANNING = 11
19 Set Variable EMERGENCIA = 5
20 Set Variable SAFE = 10

```

```
21 Enable Input Interrupt STOP
22 On Input Interrupt STOP On Call Subroutine DETENER
23 Turn Off Output OUTPUT
24 Turn Off Output EMERGENCIA
25 Set Variable METODO = SCRIPT.GETM
26 If METODO == 1 Jump to LINEAL
27 If METODO == 2 Jump to SUPERFICIAL
28 End
29 Remark: *****INICIO DEL PROCESO DE ESCANEO 1D*****
30 LINEAL:
31 Set Variable LENGTH = 100*SCRIPT.GETLENGTH
32 Teach Position 2 by XYZ. Relative to: 1. Coordinates: 0 LENGTH 0 0 0
33 LINEAL2:
34 Go to Position 11 Speed 20 (%)
35 Wait Until Digital Input START is ON
36 Go Linear to Position 1 Speed 25 (%)
37 Disable Input Interrupt STOP
38 Turn On Output OUTPUT
39 Wait 1 (10ths of seconds)
40 Turn Off Output OUTPUT
41 Enable Input Interrupt STOP
42 Go Linear to Position 2 Speed 15 (%)
43 Turn On Output OUTPUT
44 Wait 15 (10ths of seconds)
45 Turn Off Output OUTPUT
46 Jump to LINEAL2
47 Remark: *****INICIO DEL PROCESO DE ESCANEO 2D*****
48 SUPERFICIAL:
49 Set Variable STEPX = 100*SCRIPT.GETSTEPX
50 Set Variable WIDE = 100*SCRIPT.GETWIDE
51 Set Variable LENGTH = 100*SCRIPT.GETLENGTH
52 Teach Position 2 by XYZ. Relative to: 1. Coordinates: LENGTH 0 0 0 0
53 SUPERFICIALWAIT:
54 Set Variable ACTUALWIDE = 0
```

```

55 | Go to Position 11 Speed 20 (%)
56 | Turn On Output EMERGENCIA
57 | Wait 10 (10ths of seconds)
58 | Turn Off Output EMERGENCIA
59 | Wait Until Digital Input START is ON
60 | Teach Position 4 by XYZ. Relative to: 2. Coordinates: 0 0 0 0 0
61 | Teach Position 3 by XYZ. Relative to: 1. Coordinates: 0 0 0 0 0
62 | Set Variable INITIALX to the Cartesian 1 Coordinate at Position 1
63 | CICLO:
64 | Go Linear to Position 3 Speed 20 (%)
65 | Record Present Position as Position 5 !
66 | Disable Input Interrupt STOP
67 | Turn On Output OUIPUT
68 | Wait 2 (10ths of seconds)
69 | Turn Off Output OUIPUT
70 | Enable Input Interrupt STOP
71 | Go Linear to Position 4 Speed 15 (%)
72 | Record Present Position as Position 6 !
73 | Turn On Output OUIPUT
74 | Wait 15 (10ths of seconds)
75 | Turn Off Output OUIPUT
76 | Set Variable ACTUALWIDE = ACTUALWIDE+STEPX
77 | If ACTUALWIDE > WIDE Jump to SUPERFICIALWAIT
78 | Teach Position 3 by XYZ. Relative to: 5. Coordinates: 0 STEPX 0 0 0
79 | Teach Position 4 by XYZ. Relative to: 6. Coordinates: 0 STEPX 0 0 0
80 | Jump to CICLO
81 | Remark:
    | *****
82 | Set Subroutine DETENER
83 | Disable Input Interrupt STOP
84 | Turn On Output EMERGENCIA
85 | Go to Position 11 Speed 25 (%)
86 | Go Circular to Position 10 through 12 Speed 25 (%)
87 | Turn Off Output EMERGENCIA

```

88	End
89	Return from Subroutine

La segunda parte del código corresponde al código principal desarrollado en SCORBASE. Se dará una explicación general del código en función de su utilidad y tomando como referencia la numeración mostrada junto a cada línea de código. Las 7 primeras líneas son un preámbulo que contiene información acerca del programa, fecha de modificación y autores. La línea 10 carga el archivo *Script* explicado a detalle en la sección anterior. Por otro lado, la línea 14 desplaza el robot hacia su posición segura predeterminada y almacenada en memoria. Las líneas subsiguientes (de la 15 hasta la 24) inicializan variables que serán usadas a lo largo del programa al mismo tiempo que activan las rutinas de interrupciones enlazadas al puerto de entrada 2 o *STOP*. Esta activación habilita la subrutina de emergencia (*DETENER*, en el código) que envía al robot a su posición segura. Posteriormente, se elige el método de escaneo en la línea 25 y las líneas 26 y 27 realizan un salto a la subrutina correspondiente de acuerdo al método de escaneo seleccionado.

Escaneo Lineal

El código del escaneo lineal abarca desde la línea 29 a la 46. La línea 31 abre un cuadro de diálogo que permite al usuario determinar el largo de la pieza. La línea 31 almacena en memoria la posición 2 en función de la posición 1 y la longitud seleccionada. La línea 34 envía al robot a la posición de espera y la línea 35 realiza una pausa hasta que la entrada *START* esté activa. Una vez esta entrada está en alto, el robot se desplaza a la posición inicial de escaneo (línea 36) y pone en alto la salida *OUTPUT* por un segundo (líneas 37 a 41). A continuación desplaza el robot hasta la posición final de toma de datos (línea 30) y vuelve a poner en alto la salida *OUTPUT* por un segundo y medio (líneas 43 a 45). Finalmente regresa a la posición de espera (línea 43). El ciclo se detiene cuando la entrada *STOP* es

presionada.

Escaneo Superficial

El código del escaneo lineal abarca desde la línea 47 a la 80. En primera instancia, las líneas 49 y 51 adquieren información sobre la pieza: su ancho (variable *WIDE*), largo y los pasos entre toma de datos (variable *STEPX*). La línea 52 almacena en memoria la posición 2 en función de la posición 1 y la longitud seleccionada. La línea 54 inicializa la variable *ACTUALWIDE* a cero mientras que la línea 55 envía al robot a la posición de espera. Las líneas 56 hasta la 58 prenden la salida *EMERGENCIA* por 1 segundo. Esta secuencia permitirá determinar posiciones de parada de robot. Por su lado, la línea 59 realiza una pausa hasta que la entrada *START* esté activa. Una vez esta entrada está en alto, el robot almacena las posiciones iniciales de escaneo en variables auxiliares: *Position 4* y *Position 3* y posteriormente se desplaza a la posición inicial de escaneo (línea 64). A continuación guarda esta ubicación como *posición 5* y pone en alto la salida *OUTPUT* por un segundo (líneas 66 a 70). Acto seguido, desplaza el robot hasta la posición final de toma de datos (línea 71); almacena la posición final como *posición 6*; y vuelve a poner en alto la salida *OUTPUT* por un segundo y medio (líneas 73 a 75). Entonces, se actualiza la variable *ACTUALWIDE* adicionándole el valor de *STEPX* (línea 70) y posteriormente compara el ancho actual de la pieza con el ancho predeterminado por el usuario. Si este el ancho actual es mayor que el predeterminado, entonces el robot salta a la posición de espera (línea 71); de lo contrario, vuelve a escanear la pieza unos con unos cuantos milímetros (*mm*) de offset. Asimismo, se recalibra las posiciones 3 y 4 adicionándoles un valor de *STEPX* de tal manera que el siguiente desplazamiento del robot sea paralelo al primero con un *offset* de *STEPX mm*. El ciclo se detiene cuando la entrada *STOP* es presionada o el ancho es superado. .

3.6. Software de Análisis de Datos (MATLAB)

El software de análisis de datos se refiere a la plataforma HMI programada para que el usuario pueda manipular datos obtenidos previamente con el software o HMI de Control y adquisición de datos. La estructura del software se compone por varias centenas de líneas de código que se encuentra en la parte de ANEXOS en el caso que se desee un análisis más exhaustivo del mismo. El software de análisis de datos fue desarrollado usando la herramienta de GUI (Graphic User Interface) de MATLAB. Esta herramienta permite el desarrollo en conjunto de la plataforma gráfica junto con la programación que corre por detrás y a la cual el usuario no tiene acceso. Se realizaron dos plataformas dependiendo del tipo de escaneo: lineal o superficial. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de ellos.

3.6.1. Unidimensional

Esta plataforma fue diseñada para visualizar los datos adquiridos de probetas cuyo ancho sea considerablemente menor que su longitud. La plataforma permite visualizar y contrastar las curvas teóricas y experimentales de las deformaciones, calcular las propiedades del material de aporte y editar gráficas para elaboración de reportes. La Figure 3.11 muestra el diseño de la plataforma gráfica:

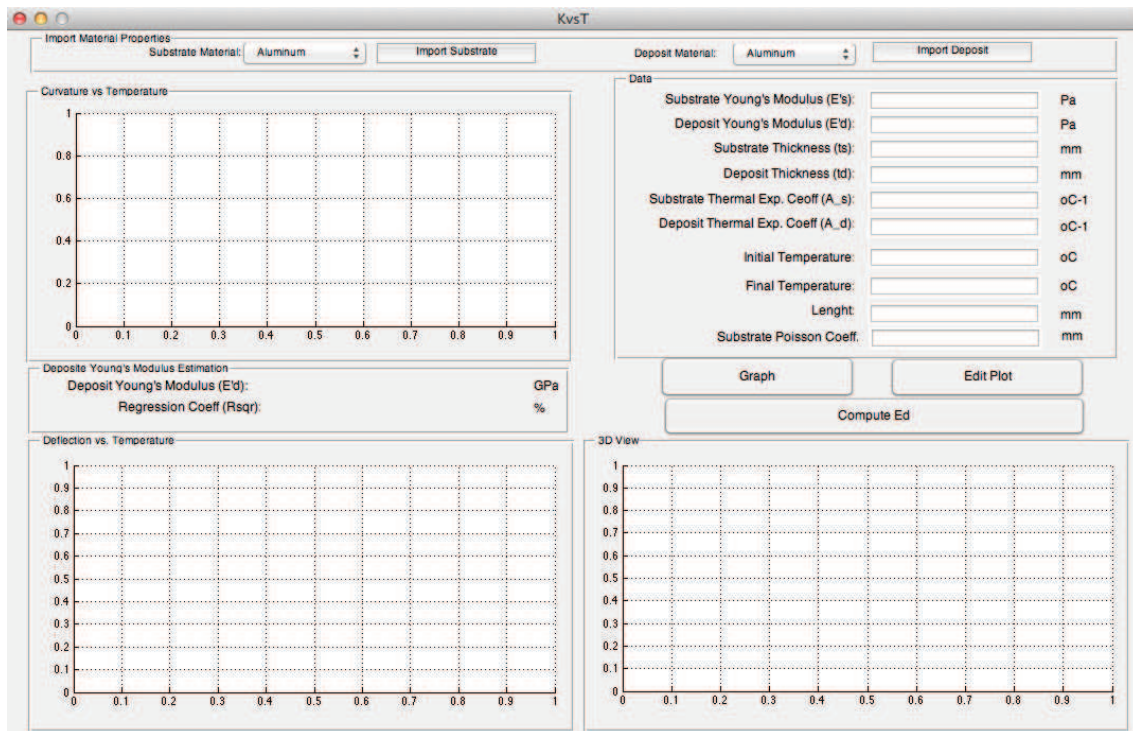


Figura 3.11: GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Análisis de Datos.

En general, el funcionamiento de la plataforma gráfica es amigable con el usuario y basta una explicación no muy detallada para entender su funcionamiento. A continuación se explicarán uno a uno cada uno de los elementos de la plataforma GUI:

1. **Substrate Material Pop-up-menu:** Permite seleccionar el material del sustrato de una lista predefinida.
2. **Deposit Material Pop-up-menu:** Permite seleccionar el material del depósito o recubrimiento de una lista predefinida.
3. **Import Substrate Button:** Permite importar las propiedades del material del sustrato seleccionado previamente a través de su respectivo pop-menu.
4. **Import Deposit Button:** Permite importar las propiedades del material del depósito seleccionado previamente a través de su respectivo pop-menu.

5. **Substrate Young's Modulus Input:** Permite ingresar el valor del módulo de elasticidad esperado del sustrato Pa . En general se usa el valor del *bulck*.
6. **Deposit Young's Modulus Input:** Permite ingresar el valor del módulo de elasticidad esperado del recubrimiento en Pa . En general se usa un valor un poco menor al del *bulck*.
7. **Graph Button:** Este botón grafica sobre los tres ejes (Curvatura vs. Temperatura, Radio de Curvatura vs. Temperatura y Elevación vs. Temperatura) la curvas téóricas en base a los datos del bimetal ingresados como se muestra en la Figura 3.12:

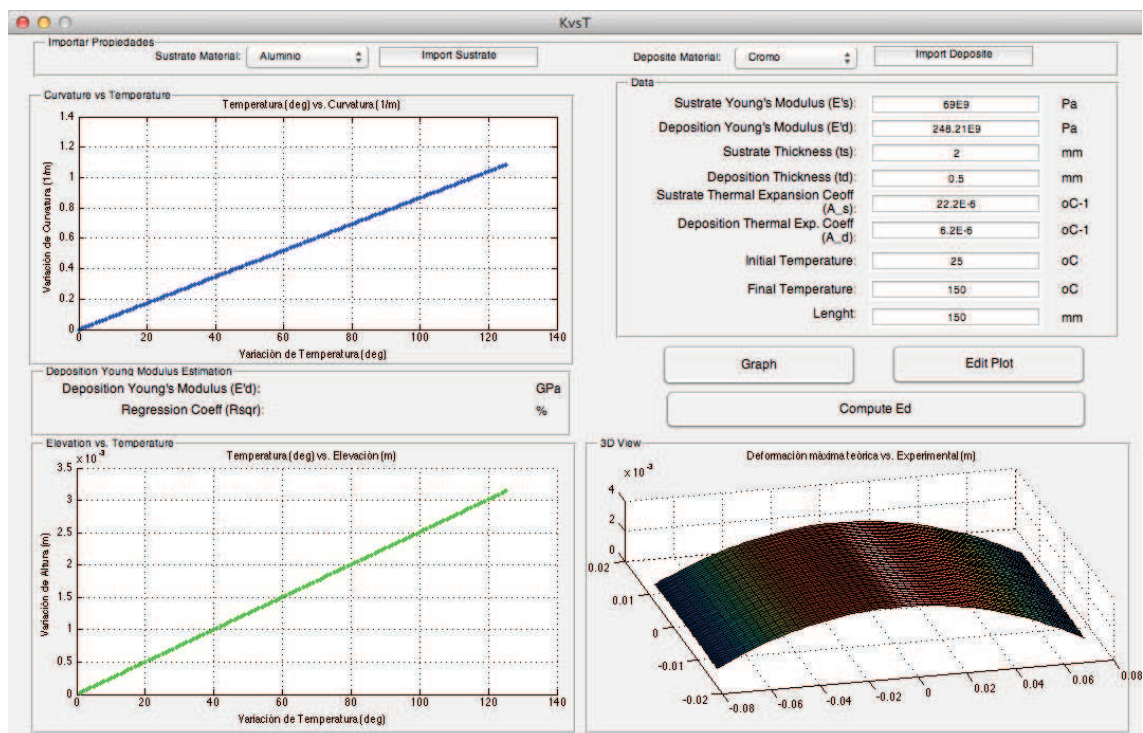


Figura 3.12: Graficación de las Curvas Teóricas.

8. **Initial Temperature Input:** Permite ingresar el valor de la temperatura inicial en grados centígrados cuando se desea visualizar las curvas teóricas de un determinado bi-metal.

9. **Final Temperature Input:** Permite ingresar el valor de la temperatura final en grados centígrados cuando se desea visualizar las curvas teóricas de un determinado bi-metal.
10. **Substrate Thickness Input:** Permite ingresar el valor del espesor del material base o sustrato en unidades de *mm*. Tanto el modelo teórico como la regresión lineal son bastante sensibles a este valor por lo que se sugiere que éste sea lo más preciso posible.
11. **Deposit Thickness Input:** Permite ingresar el valor del espesor del material de aporte o recubrimiento en unidades de *mm*. Al igual que con el espesor del sustrato, se sugiere que este valor sea lo más preciso posible.
12. **Compute Ed Button:** Este botón abre un cuadro de diálogo que permite al usuario ubicar el set de datos a analizar (Figura 3.13).

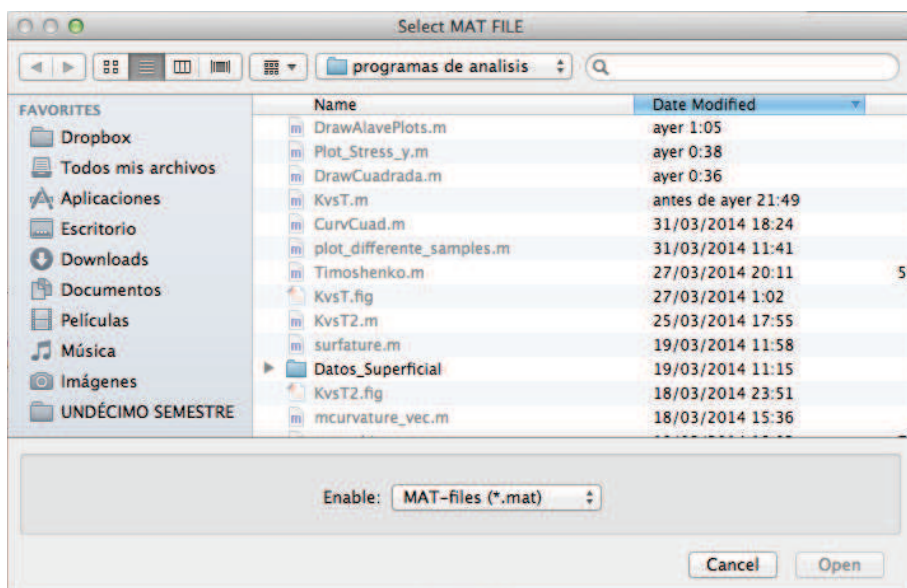


Figura 3.13: Cuadro de diálogo.

Con estos datos, gráfica sobre los tres ejes (Curvatura vs. Temperatura, Radio de Curvatura vs. Temperatura y Deflexión vs. Tempertura) la curvas teóricas y experimentales en base a los datos del bimetall ingresados y a la

vez realiza una estimación del módulo de Young del depósito o material del recubrimiento y lo muestra en el *Deposit Young's Modulus indicator* como se muestra en la Figura 3.14.

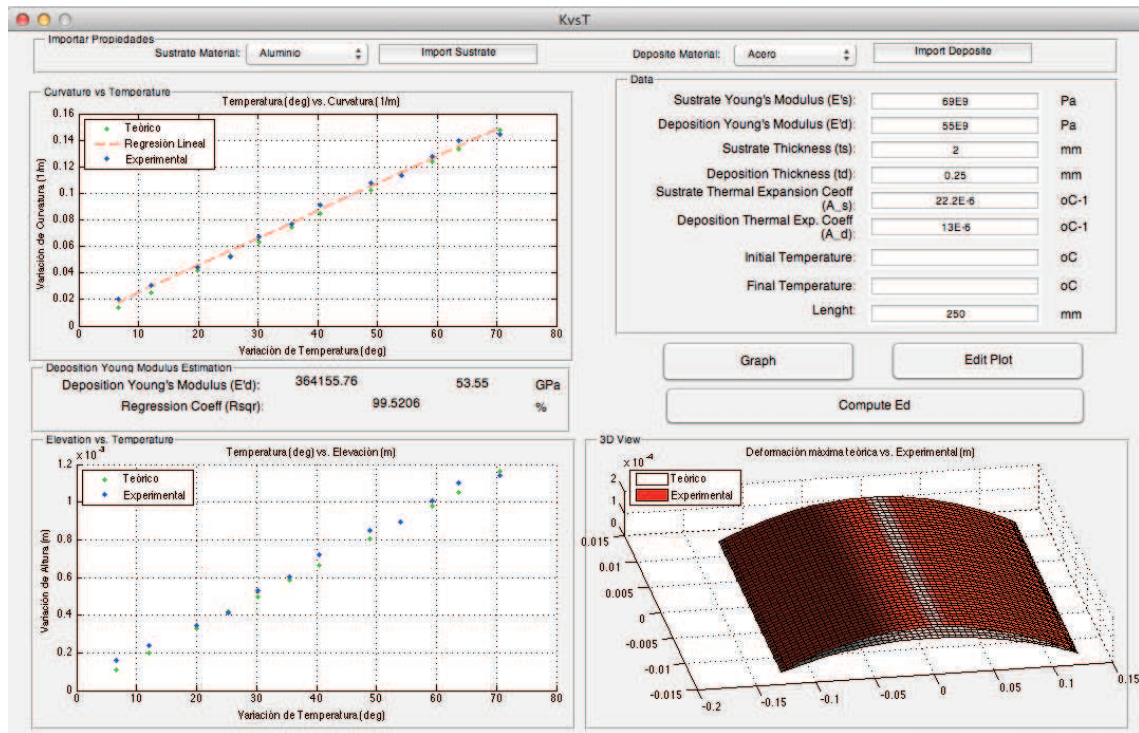


Figura 3.14: Graficación de las Curvas Teóricas y Experimentales. Extrapolación de los módulo de Young.

13. **Deposit Young's Modulus Indicator:** Este indicador muestra el valor del módulo de elasticidad experimental obtenido por medio de una regresión lineal aplicada sobre los valores experimentales de curvatura obtenidos en cada muestreo. Requiere que todos los *Inputs* estén determinados.
14. **Regression Coefficient Indicator:** Este indicador muestra el valor estadístico R^2 de la regresión lineal. Como se trata de un regresión lineal de una sola variable, entonces el valor de R^2 es una medida de que tan lineal es el comportamiento de los valores experimentales. Valores por sobre el 95% muestra una alta linealidad y validación del modelo.

15. **Substrate Thermal Expansion Coeff. Input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de expansión térmica (CTE, en inglés) del material base o sustrato en unidades de oC^{-1} .
16. **Deposit Thermal Expansion Coeff. Input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de expansión térmica (CTE, en inglés) del recubrimiento o depósito en unidades de oC^{-1} .
17. **Substrate Poisson input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de Poisson del sustrato. Este valor es adimensional.

3.6.2. Bidimensional

Esta plataforma fue diseñada para visualizar los datos adquiridos de probetas cuyo ancho sea mayor a un décimo de su longitud. La plataforma permite visualizar y contrastar las curvas teóricas y experimentales de las deformaciones, calcular las propiedades del material de aporte y editar gráficas para elaboración de reportes. La Figure 3.15 muestra el diseño de la plataforma gráfica:

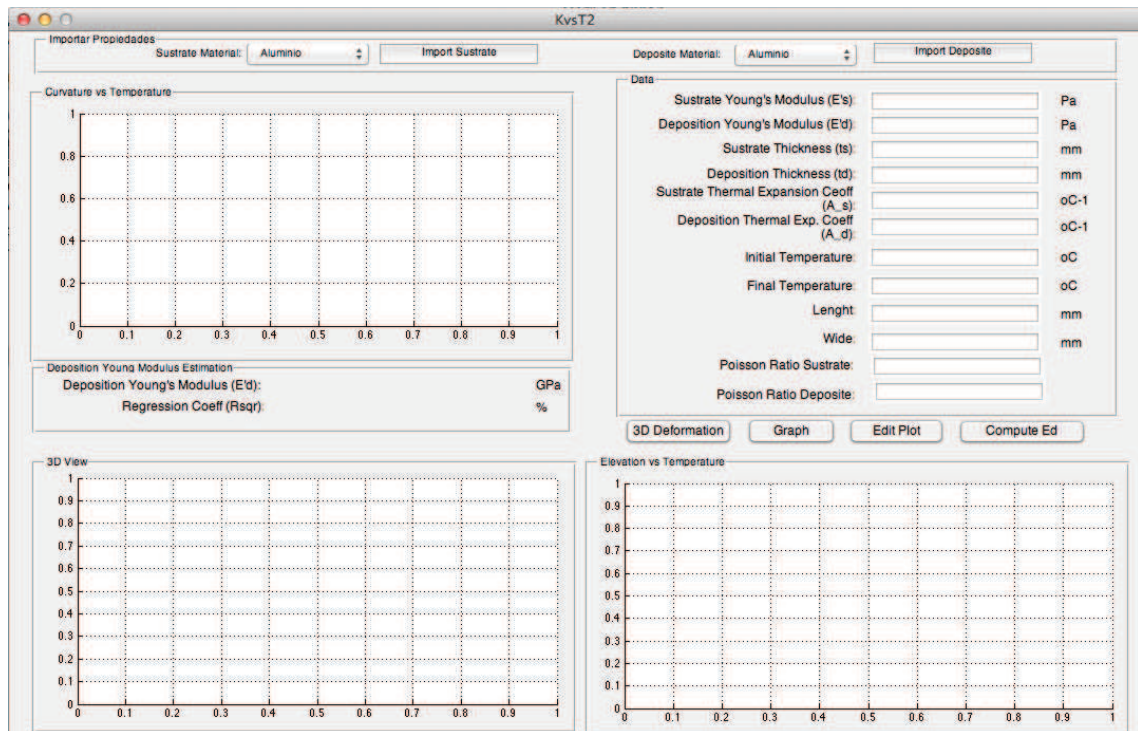


Figura 3.15: GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Análisis de Datos-Escaneo superficial.

En general, el funcionamiento de la plataforma gráfica es amigable con el usuario y basta una explicación no muy detallada para entender su funcionamiento. La mayoría de elementos son similares a las del software de escaneo unidimensional explicado anteriormente por lo que a continuación se explicarán únicamente los elementos que no han sido cubiertos en la sección anterior:

1. **Step input:** Permite ingresar la distancia entre barridos del escáner sobre la pieza. Este valor debe coincidir con el valor ingresado en SCORBASE para tener una reconstrucción adecuada.
2. **3D Deformation.-** Al presionar este botón se abre un cuadro de diálogo que permite seleccionar el set de datos a analizar. Posteriormente, realiza plots tridimensionales de las piezas escaneadas como se muestran en la Figura 3.16:

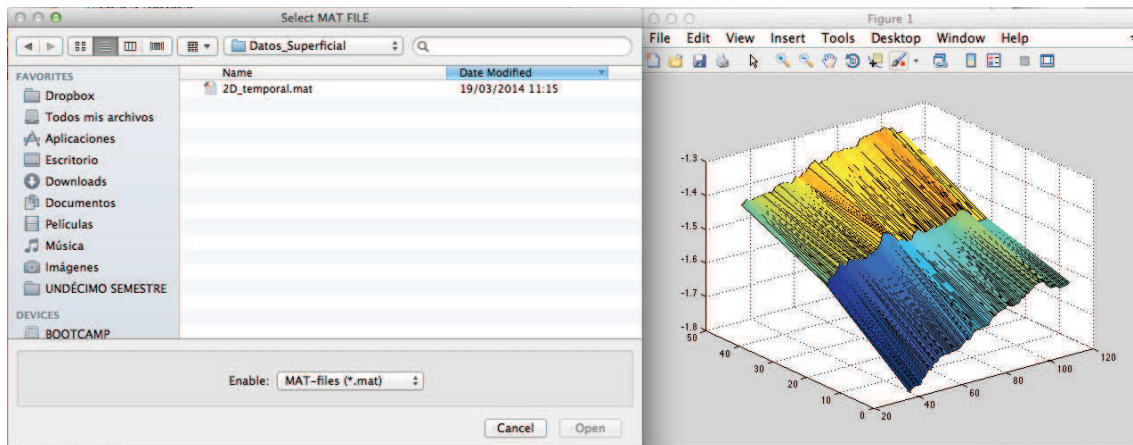


Figura 3.16: Graficación tridimensional de las probetas.

3. **Edit Plot:** Este botón crea tres plots externos sobre los cuales se copian los tres ejes (Curvatura vs. Temperatura, Radio de Curvatura vs. Temperatura y Deflexión vs. Temperatura). Estas nuevas figuras se pueden editar a discreción del usuario: cambiar colores, leyendas, fuentes, escalas, límites e inclusive guardar en diversos formatos.
4. **Substrate Poisson input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de Poisson del sustrato. Este valor es adimensional.
5. **Deposit Poisson input:** Permite ingresar el valor del coeficiente de Poisson del sustrato. Este valor es adimensional. Este valor es usado para la estimación del módulo de Young del depósito.
6. **Graph Button:** Este botón grafica sobre los tres ejes (Curvatura vs. Temperatura, Deformación tridimensional y Deflexión vs. Tempertura) la curvas teóricas en base a los datos del bimetal ingresados como se muestra en la Figura 3.17:

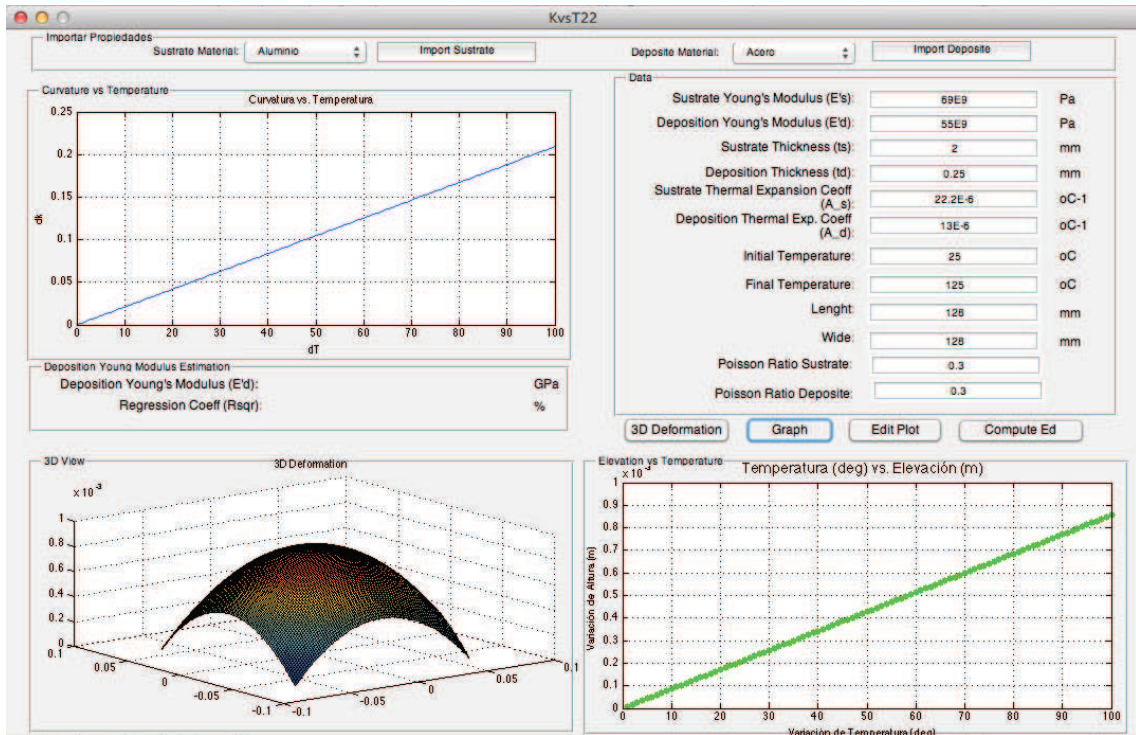


Figura 3.17: Graficación de las Curvas Teóricas.

7. **Compute Ed Button:** Este botón abre un cuadro de diálogo que permite al usuario ubicar el set de datos a analizar (Figura 3.13). Con estos datos, gráfica sobre los tres ejes (Curvatura vs. Temperatura, Deformación 3d y Deflexión vs. Temperatura) la curvas teóricas y experimentales en base a los datos del bimetall ingresados y a la vez realiza una estimación del módulo de Young del depósito o material del recubrimiento y lo muestra en el *Deposit Young's Modulus indicator* como se muestra en la Figura 3.18.

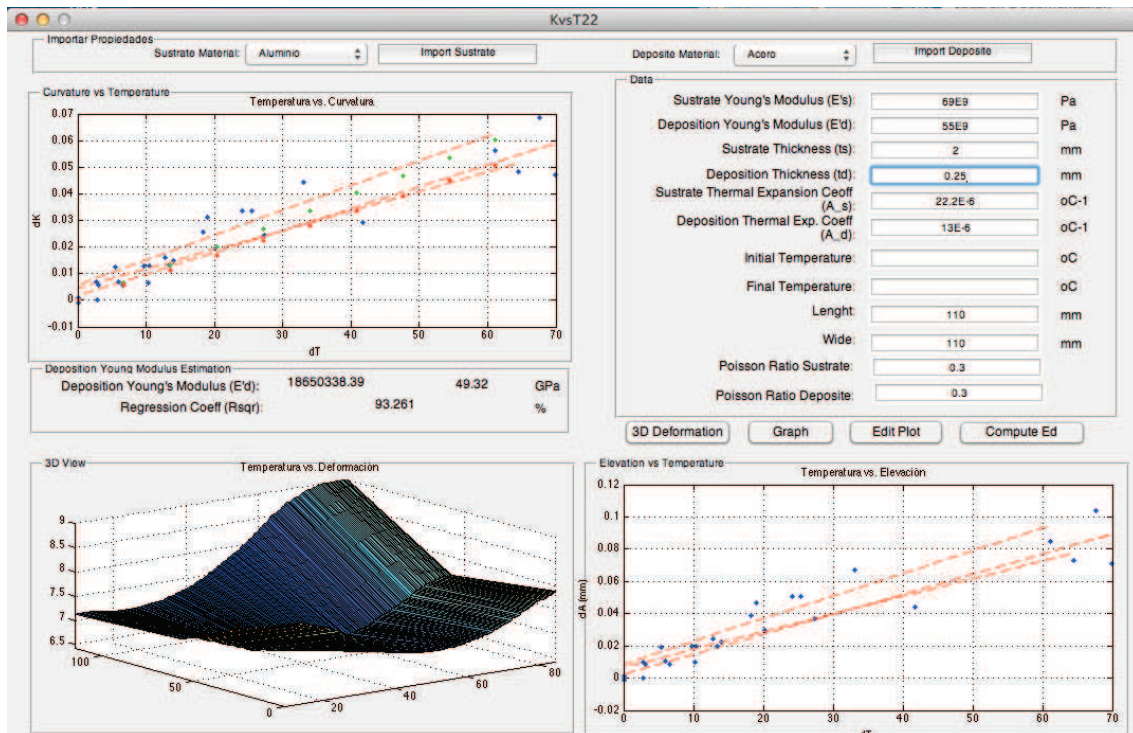


Figura 3.18: Graficación de las Curvas Teóricas y Experimentales. Extrapolación de los módulo de Young.

3.7. Procesos de Escaneo

Acorde con la diversidad de piezas que se buscaba analizar, se diseñaron diversas metodologías de escaneo apropiadas para cada situación. Las metodologías de escaneo se describen a continuación.

3.7.1. Proceso de Escaneo Unidimensional

El primero de los análisis fue hecho considerando que el ancho de la placa era mucho mayor que su longitud por un factor $\gg 10$. Esta simplificación permitía aplicar directamente el modelo teórico de Matecijek y Sampath. Bajo este modelo, el radio de curvatura es linealmente proporcional al gradiente de temperatura. El procedimiento que se siguió para demostrar el modelo fue el siguiente.

1. **Sujeción.-** Se sujetó la pieza a los soportes metálicos y se colocaron ad-

heridas a la misma varias termocuplas (dependiendo del tamaño); estas termocuplas proveerían el perfil de temperatura para cada tiempo de muestreo permitiendo así el análisis de la uniformidad de la temperatura en la placa y de la curva deformación vs. temperatura. La disposición de la pieza se muestra en la Figura 3.19:

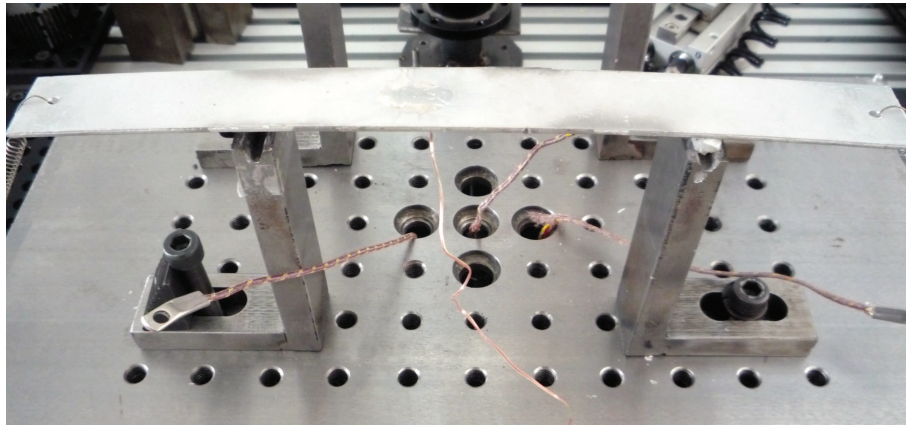


Figura 3.19: Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.

2. **Inicio de SCORBASE.-** A continuación se corre el programa de SCORBASE. El programa permitirá al usuario elegir el tipo de escaneo como se observa en la Figura 3.20; para el escaneo lineal se ingresa el número 1.

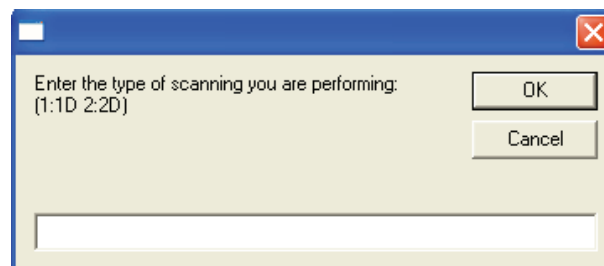


Figura 3.20: Selección del método de Escaneo.

a continuación, el usuario ingresará el largo de la porción de la pieza que se desea escanear como se muestra en la Figura 3.21:

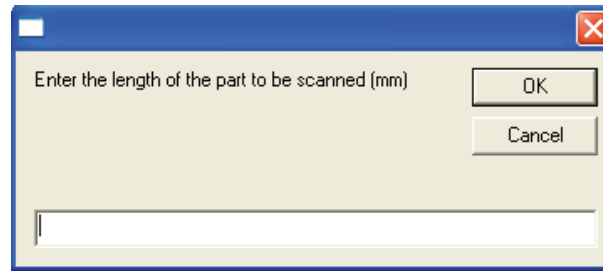


Figura 3.21: Ingresar el largo de la pieza.

3. **Calibración.-** Se corre el programa de adquisición de datos unidimensionales de MATLAB y con la ayuda del botón de calibración se ubica la posición inicial de escaneo. Esta posición se deberá almacenar como posición 1 en SCORBASE. La Figura 3.22 muestra el proceso de calibración.

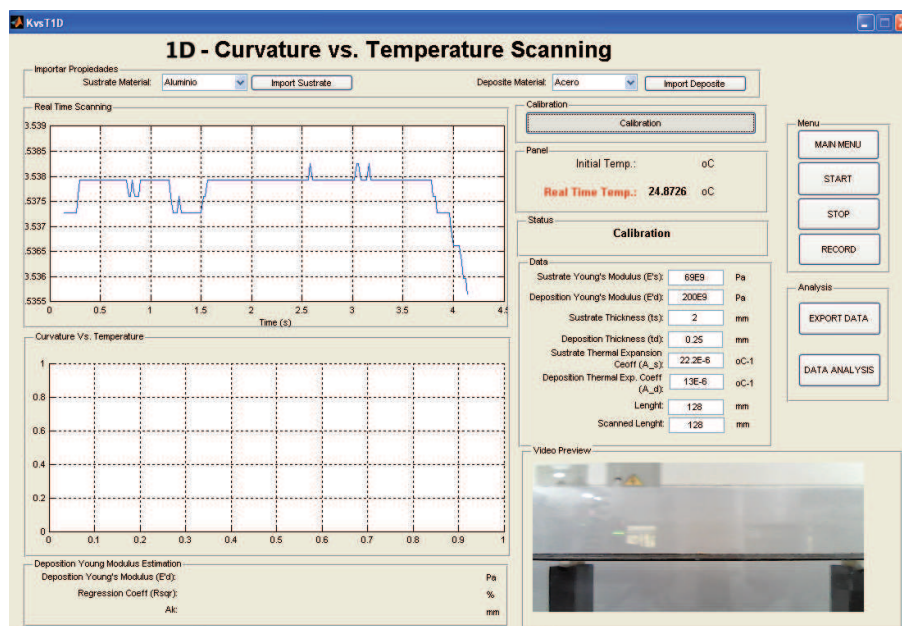


Figura 3.22: Calibración de la posición inicial.

4. **Inicio del Proceso.-** Se presiona el botón de inicio en el GUI de MATLAB. El botón se desplazará entre las posiciones predefinidas; en MATLAB se muestra en tiempo real los datos adquiridos como se muestra en la Figura 3.23:

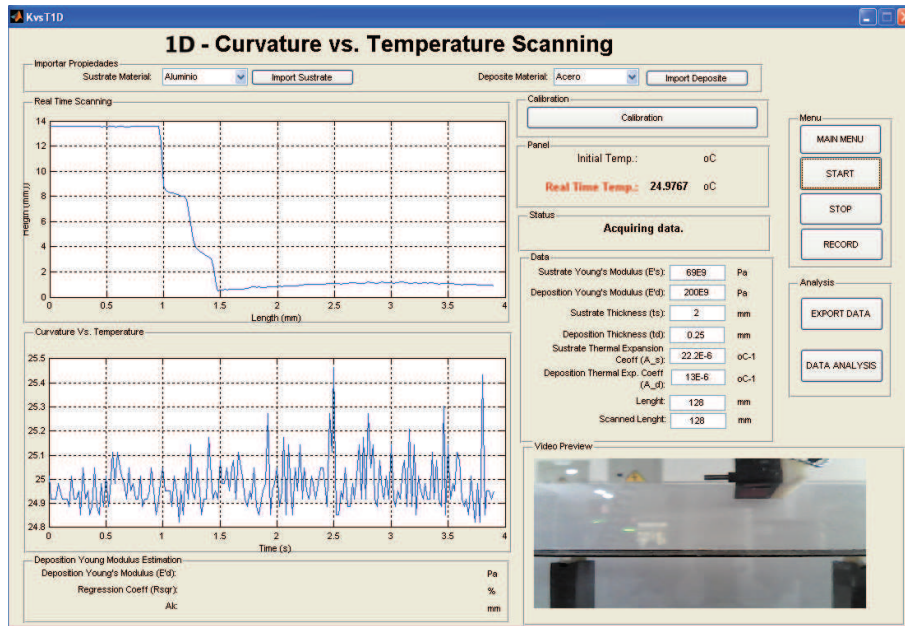


Figura 3.23: Adquisición de Datos.

El barrido sería lineal sobre el eje de simetría de la pieza, como se muestra en la Figura 3.24:

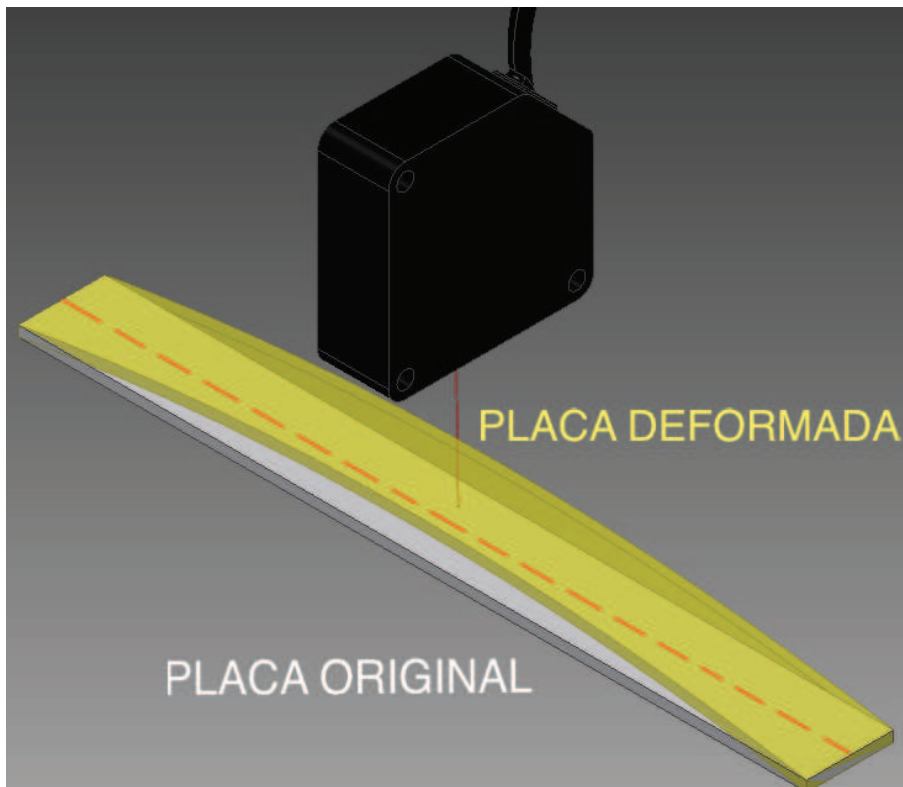


Figura 3.24: Modelo de Escaneo unidimensional sobre placa delgada.

La posición inicial y final de escaneo coincidía con las ubicación de las termocuplas ubicadas en el extremo, como se muestra en la Figura 3.25:

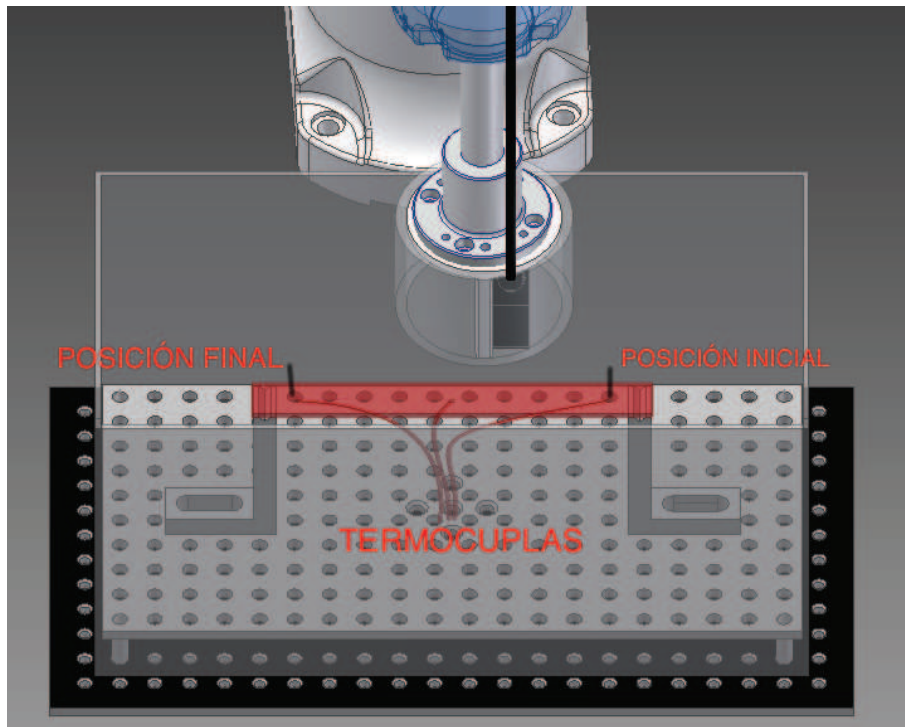


Figura 3.25: Posiciones iniciales y finales de escaneo. Ubicación de termocuplas.

5. **Post-Procesamiento.**- Una vez que se ha culminado con la toma de datos, se presenta en la pantalla los valores teóricos, experimentales y los valores de modulo de Young obtenidos a través de un proceso de regresión lineal. La Figura 3.26 muestra la pantalla en MATLAB:

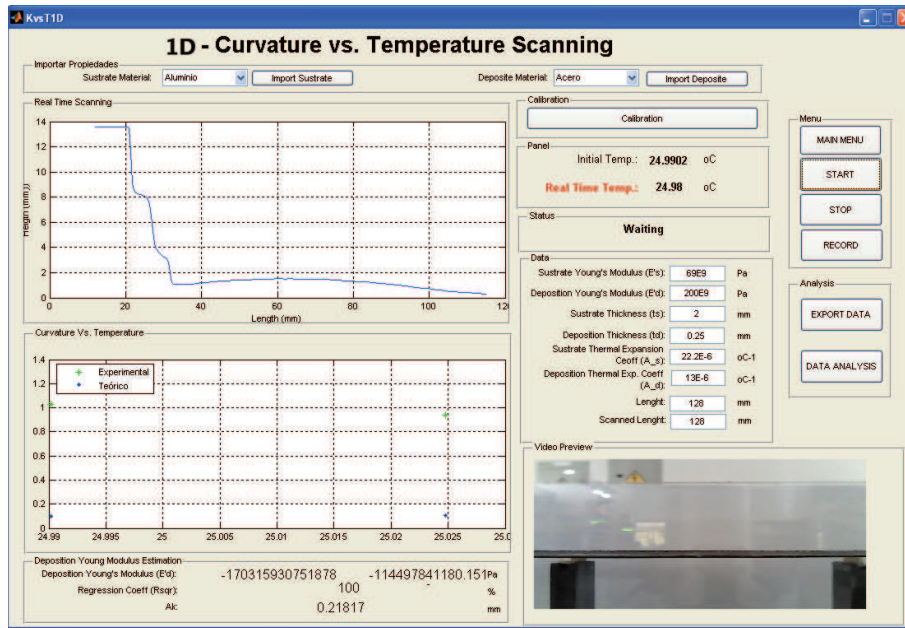


Figura 3.26: Procesamiento de Datos.

6. **Calentamiento de la Pieza.-** A continuación se calienta la pieza mediante el uso de una torcha manual. El software de adquisición permite filmar el proceso con el presionar el botón de *RECORD*. La Figura 3.27 muestra el proceso de calentamiento.



Figura 3.27: Calentamiento.

7. **Ciclo.-** Se repite la instrucción 4 tantas veces como sea necesario durante el

proceso de enfriamiento. Al final, se exportarán los datos para ser analizados en detalle.

Los resultados obtenidos se emparejaron con el modelo teórico con el objetivo de visualizar la desviación del modelo. En las secciones subsecuentes se muestran a detalle los resultados obtenidos para diferentes probetas.

3.7.2. Proceso de Escaneo Bidimensional

El segundo análisis fue hecho dejando de lado la asunción de una placa unidimensional; es decir, analizando placas cuyo ancho es mayor a la décima parte de su longitud. Bajo este modelo, el radio de curvatura conserva su comportamiento lineal en función del gradiente de temperatura. Con el objetivo de analizar a detalle el modelo teórico se estableció un procedimiento para el muestreo de la deformación bidimensional de las placas de análisis. El procedimiento que se siguió para demostrar el modelo fue el siguiente.

1. **Sujeción.-** Se sujetó la pieza a los soportes metálicos y se colocaron adheridas a la misma varias termocuplas (dependiendo del tamaño); estas termocuplas proveerían el perfil de temperatura para cada tiempo de muestreo permitiendo así el análisis de la uniformidad de la temperatura en la placa y de la curva deformación vs. temperatura. La disposición de la pieza se muestra en la Figura 3.28:

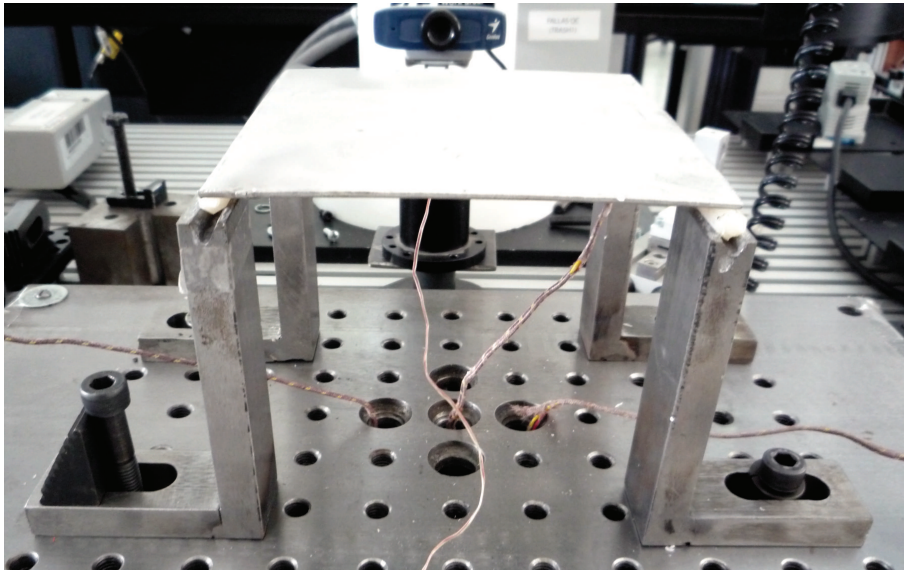


Figura 3.28: Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.

2. **Inicio de SCORBASE.-** A continuación se corre el programa de SCORBASE. El programa permitirá al usuario elegir el tipo de escaneo como se observa en la Figura 3.29; para el escaneo lineal se ingresa el número 2.

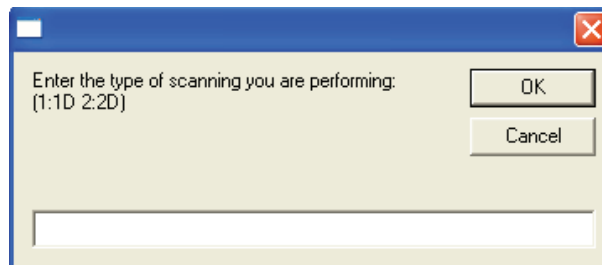


Figura 3.29: Selección del método de Escaneo.

a continuación, el usuario ingresará el largo de la porción de la pieza que se desea escanear, el ancho de la misma y el paso entre barridos transversales como se muestra en la Figura 3.30:

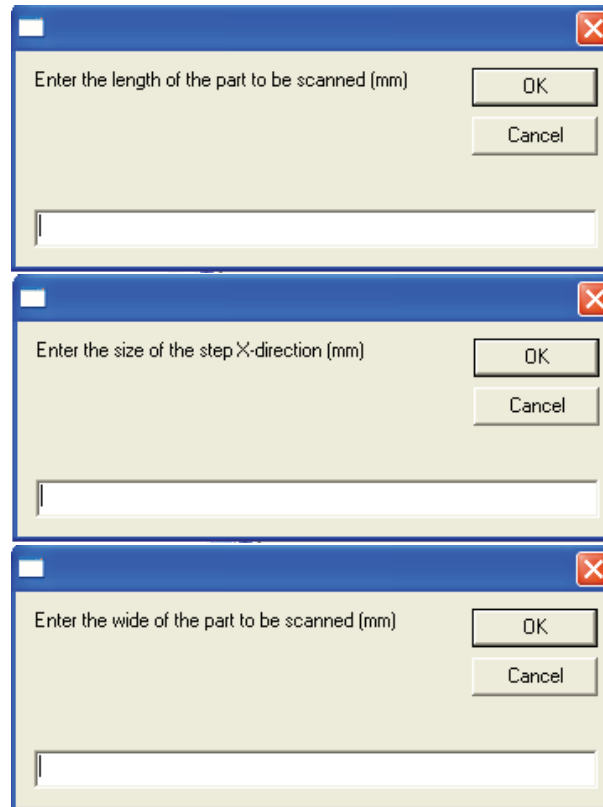


Figura 3.30: Ingresar propiedades de de la pieza.

3. **Calibración.-** Se corre el programa de adquisición de datos unidimensionales de MATLAB y con la ayuda del botón de calibración se ubica la posición inicial de escaneo. Esta posición se deberá almacenar como posición 1 en SCORBASE y corresponderá a la esquina superior derecha de la pieza. La Figura 3.22 muestra el proceso de calibración.
4. **Inicio del Proceso.-** Se presiona el botón de inicio en el GUI de MATLAB. El botón se desplazará entre las posiciones predefinidas; en MATLAB se muestra en tiempo real los datos adquiridos como se muestra en la Figura 3.23:

El barrido cubriría toda la superficie de la placa formando como se muestra en la Figura 3.31. El paso del sensor láser sobre las piezas en paralelo con el espaciamiento definido por *Step*. La posición inicial y final de escaneo coincidía con las ubicación de las termocuplas ubicadas en los extremo,

como se muestra en la Figura 3.25.

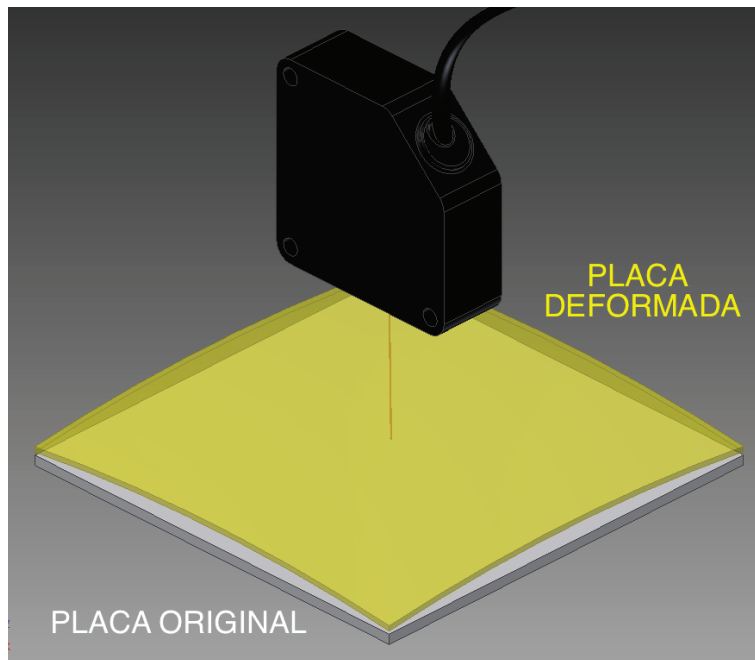


Figura 3.31: Modelo de Escaneo bidimensional sobre placa cuadrada delgada.

Se pueden hacer mediciones lineales sobre placas superficiales para analizar sección por sección cada parte de la pieza. En ese caso, se puede decir entre los patrones mostrados en la Figura 3.32. Este tipo de escaneo muestra ser más exacto en el cálculo del módulo de Young. Para analizar este tipo de escaneos, se desarrolló programas auxiliares que se encuentran en la parte de anexos:

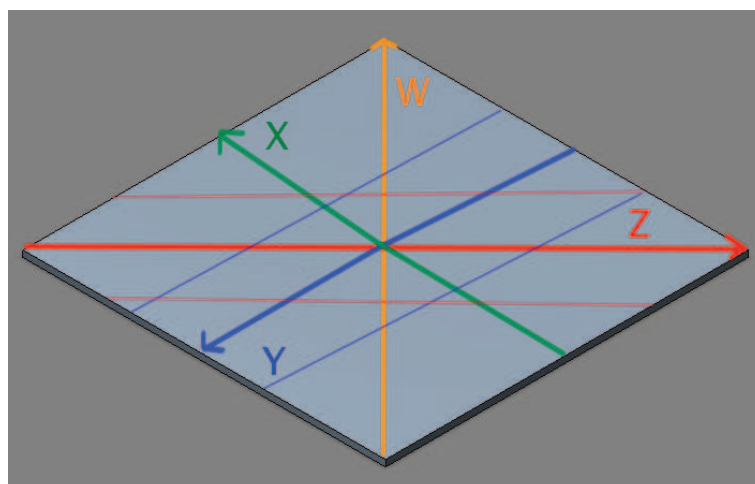


Figura 3.32: Patrón de Escaneo bidimensional sobre placa cuadrada delgada.

Las direcciones principales corresponden a los ejes X , Y y Z mientras que las direcciones secundarias en color azul y rojo tienen, permitirán obtener la curvatura a partir del método de los tres puntos. Esto permitirá auscultar con más detalle la validez del método.

5. **Post-Procesamiento.-** Una vez que se ha culminado con la toma de datos, se presenta en la pantalla los valores teóricos, experimentales y los valores de módulo de Young obtenidos a través de un proceso de regresión lineal. Además, si la *check box 3d Plot* está activa, se mostrara un plot con la geometría de la pieza escaneada. La Figura 3.33 muestra la pantalla en MATLAB:

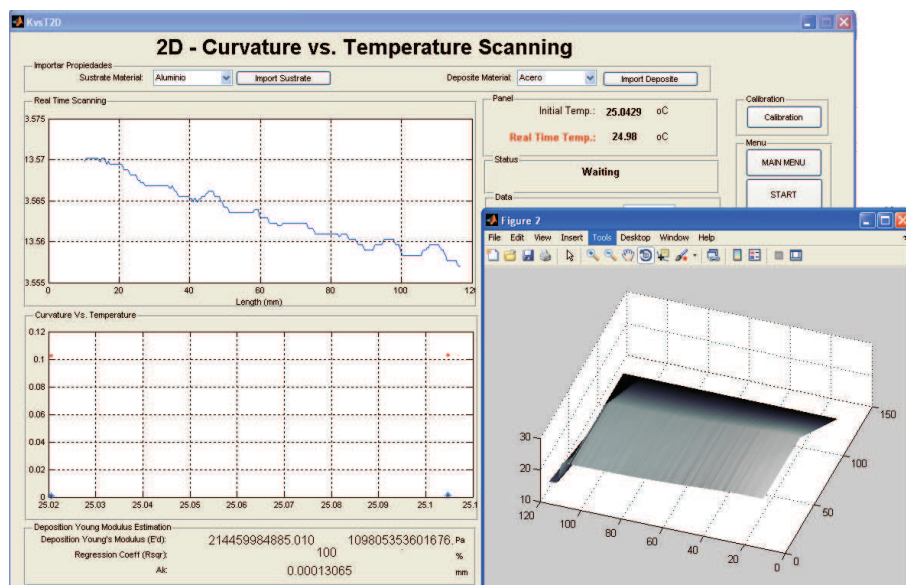


Figura 3.33: Procesamiento de Datos.

6. **Calentamiento de la Pieza.-** A continuación se calienta la pieza mediante el uso de una torcha manual. El software de adquisición permite filmar el proceso con el presionar el botón de *RECORD*. La Figura 3.34 muestra el proceso de calentamiento.

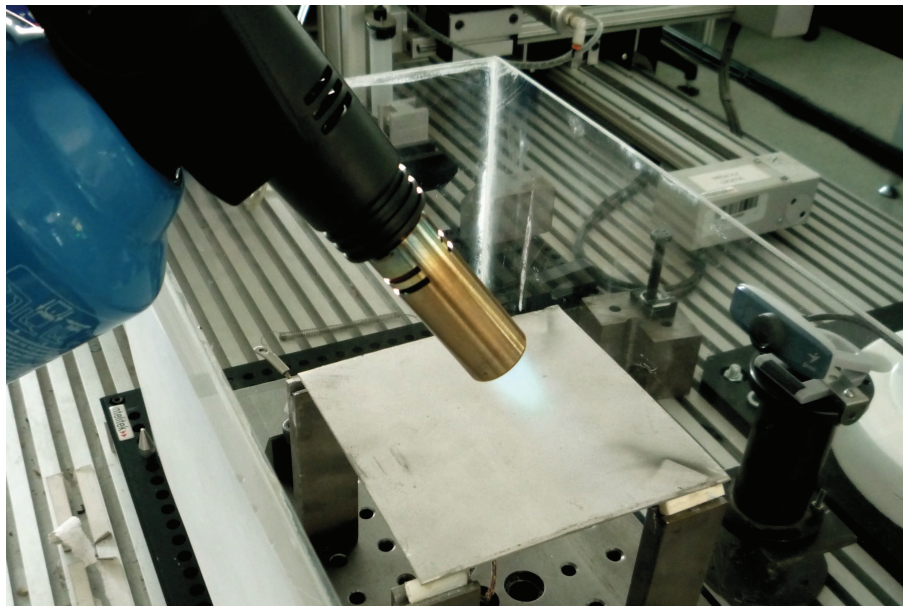


Figura 3.34: Calentamiento.

7. **Ciclo.-** Se repite la instrucción 4 tantas veces como sea necesario durante el proceso de enfriamiento. Al final, se exportarán los datos para ser analizados a profundidad.

Los resultados obtenidos se emparejaron con el modelo teórico con el objetivo de visualizar la desviación del modelo. En las secciones subsecuentes se muestran a detalle los resultados obtenidos para diferentes probetas. En las secciones subsecuentes se muestran a detalle los resultados obtenidos para diferentes probetas.

3.7.3. Proceso de Escaneo Tridimensional

El tercer análisis fue hecho enfocado en placas cuyo ancho es mayor a la décima parte de su longitud y cuya geometría no se limita a un plano. El procedimiento que se siguió para el análisis de deformaciones fue idéntico al Bidimensional. La única diferencia radica en la sujeción de la pieza que se muestra en la Figura 3.35

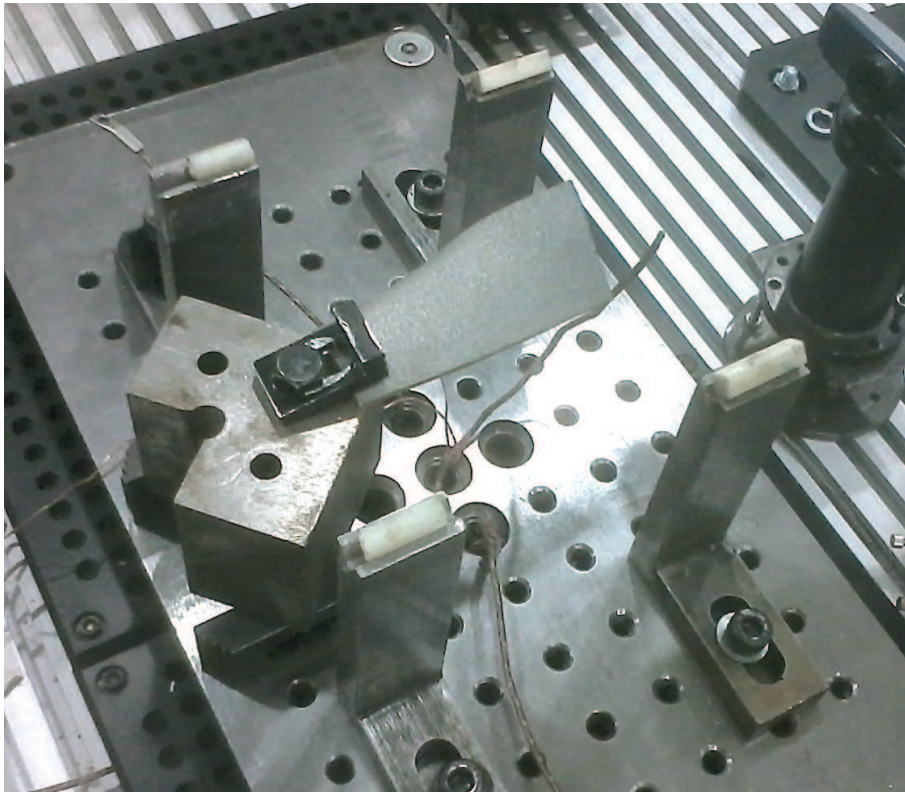


Figura 3.35: Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.

El barrido cubriría toda la superficie de la placa formando una malla (grid) sobre la misma como se muestra en la Figura 3.36:

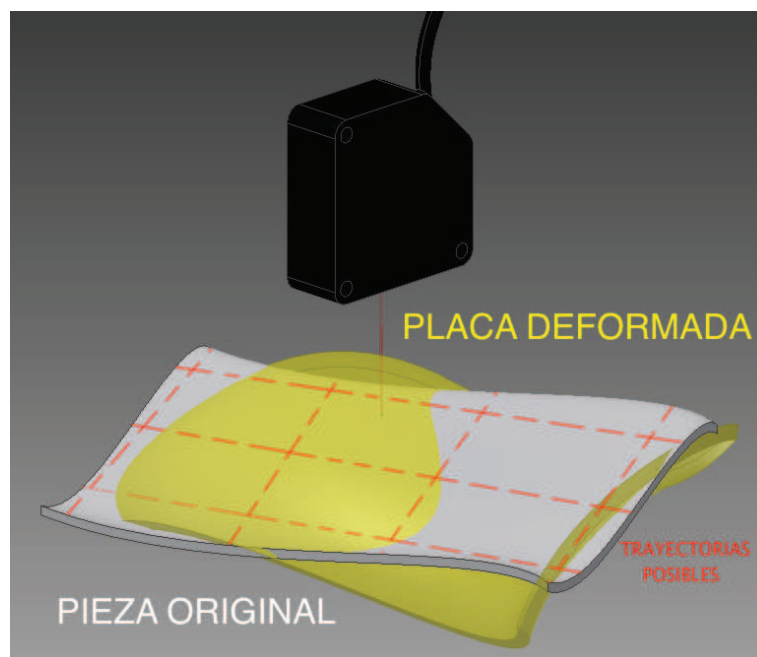


Figura 3.36: Modelo de Escaneo Tridimensional sobre álabes de Turbocargador.

La posición inicial y final de escaneo coincidía con las ubicación de las termocuplas ubicadas en los extremo, como se muestra en la Figura 3.25. Los resultados obtenidos se emparejaron con el modelo teórico con el objetivo de visualizar la desviación del modelo. En las secciones subsecuentes se muestran a detalle los resultados obtenidos para diferentes probetas.

3.8. Análisis de Homogeneidad de Temperaturas

Con el objetivo de garantizar uniformidad en la pieza durante el enfriamiento, se dispuso varias termocuplas distribuidas uniformemente sobre las piezas. Se registro el valor de temperatura medido cada cinco segundos en cada termocupla y se realizó un análisis estadístico para determinar la media, varianza y desviación estándar de la diferencia de temperaturas. Posteriormente, se realizó la prueba de hipótesis siguiente:

$$H_0 : \mu = 0$$

$$H_0 : \mu \neq 0$$

El análisis para cada tipo de escaneo detalla a continuación.

3.8.1. Análisis de Homogeneidad Térmica Unidimensional

Las Figuras 3.37 y 3.38 muestran la distribución de temperaturas en el tiempo, el histograma y el análisis estadístico:

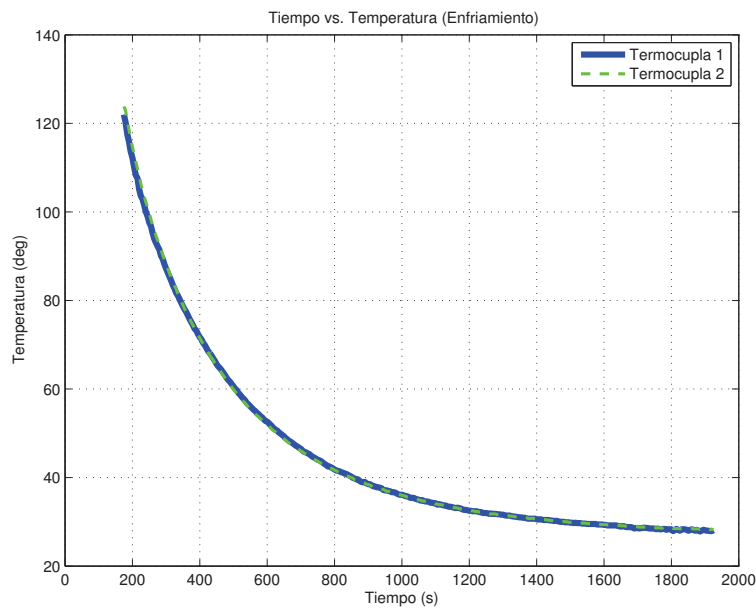


Figura 3.37: Temperatura tomada por las termocuplas A y B

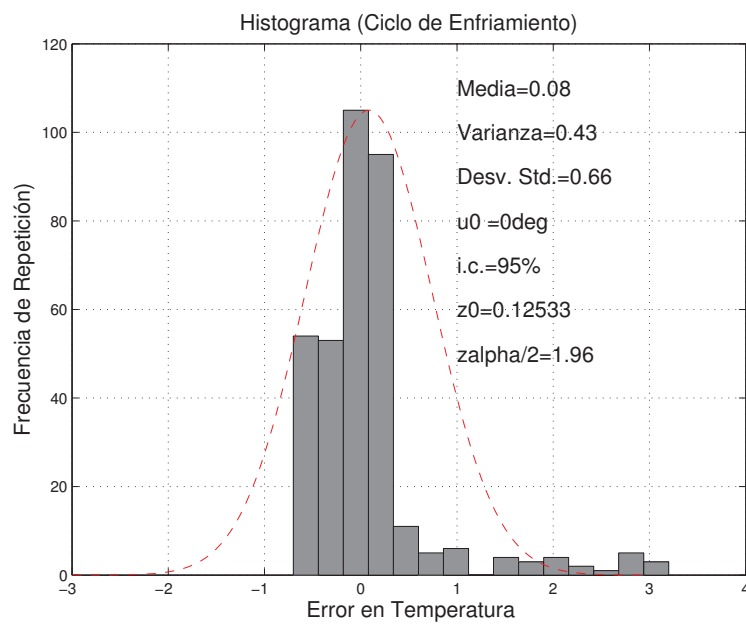


Figura 3.38: Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.

Como se puede ver en la Figura 3.40, se tomó un Intervalo de confianza del 95 % y se obtuvo un valor de $z_{\alpha/2} = 1,96$ mientras que el valor de $z_0 = 0,125$. Por lo tanto, se puede concluir que no se rechaza la hipótesis, es decir, no existe evidencia suficiente para determinar que la temperatura medida por las termocuplas no sea

la misma al α (valor de significancia estadística) del 5 %.

3.8.2. Análisis de Homogeneidad Térmica Bidimensional

Las Figuras 3.39 y 3.40 muestran la distribución de temperaturas en el tiempo, el histograma y el análisis estadístico:

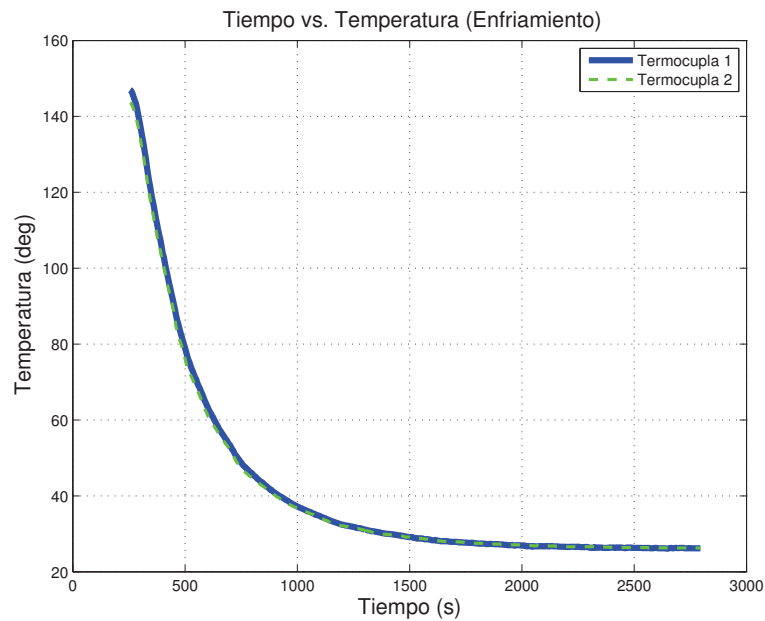


Figura 3.39: Temperatura tomada por las termocuplas A y B

Como se puede ver en la Figura 3.40, se tomó un Intervalo de confianza del 95 % y se obtuvo un valor de $z_{\alpha/2} = 0,835$ mientras que el valor de $z_0 = 0,547$. Por lo tanto, se puede concluir que no se rechaza la hipótesis, es decir, no existe evidencia suficiente para determinar que la temperatura medida por las termocuplas no sea la misma al α (valor de significancia estadística) del 5 %.

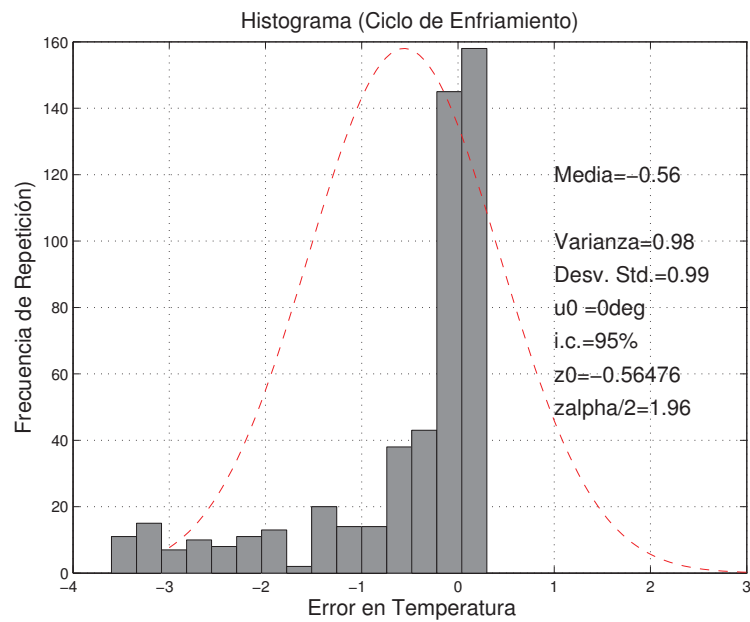


Figura 3.40: Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.

3.8.3. Análisis de Homogeneidad Térmica Tridimensional

Las Figuras 3.41 y 3.42 muestran la distribución de temperaturas en el tiempo, el histograma y el análisis estadístico:

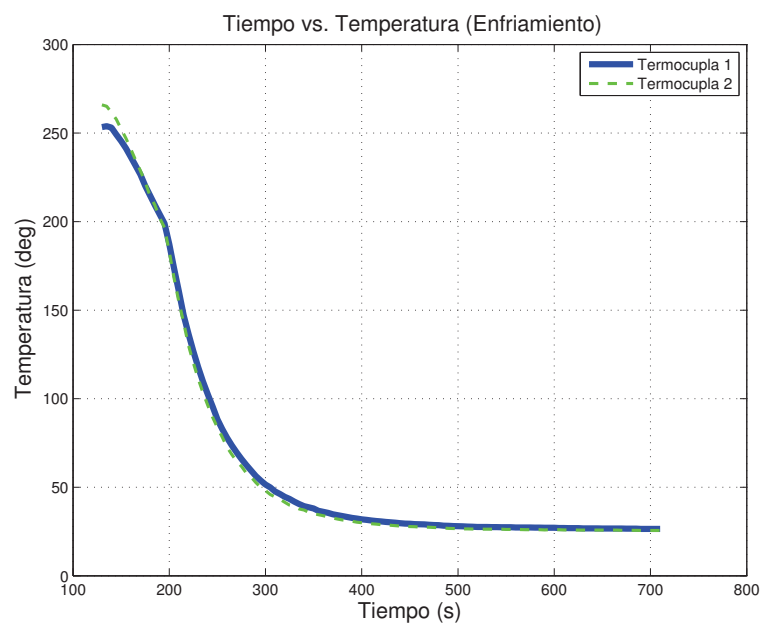


Figura 3.41: Temperatura tomada por las termocuplas A y B

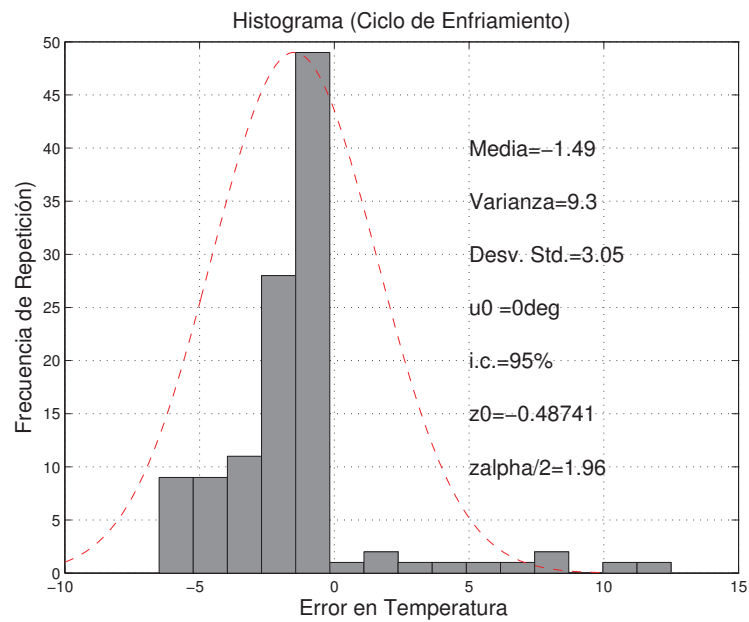


Figura 3.42: Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.

Como se puede ver en la Figura 3.40, es tomó un Intervalo de confianza del 95 % y se obtuvo un valor de $z_{\alpha/2} = 1,96$ mientras que el valor de $z_0 = 0,487$. Por lo tanto, se puede concluir que no se rechaza la hipótesis, es decir, no existe evidencia suficiente para determinar que la temperatura medida por las termocuplas no sea la misma al α (valor de significancia estadística) del 5 %.

