



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

**APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA
LA CARACTERIZACIÓN DEL ERROR EN TRAYECTORIAS
CIRCULARES POR WEDM**

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: EDUARDO

APELLIDOS: BAJO ORTIZ

FDO.:

FECHA:

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: BORJA

APELLIDOS: IZQUIERDO ARAMBURU

DEPARTAMENTO:

FDO.: INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO 2. RESUMEN

2.1. OBJETO.....	1
2.2. ANTECEDENTES.....	1
2.3. METODOLOGÍA.....	3
2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	4
2.5. LINEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA.....	5

DOCUMENTO 3. MEMORIA

3.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	3
3.2.1. TÉRMINOS BÁSICOS ELECTROEROSIÓN.....	3
3.2.1.1. Terminología general.....	3
3.2.1.2. Terminología eléctrica.....	6
3.2.2. TERMINOLOGÍA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.....	7
3.2.3. TERMINOLOGÍA DE REDES NEURONALES.....	8
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3.3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO.....	10
3.3.2. OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN.....	12
3.4. ANTECEDENTES.....	13
3.4.1. INTRODUCCIÓN.....	13
3.4.2. PÉRDIDA DE PRECISIÓN EN CORTE MEDIANTE WEDM.....	14
3.4.4. ESTADO DEL ARTE.....	17
3.4.4.1. ESTADO DEL ARTE EN ELECTROEROSIÓN POR HILO.....	17
3.4.4.2. ESTADO DEL ARTE EN RNA.....	24
3.5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	29

3.5.1. INTRODUCCIÓN.....	29
3.5.2. ENFOQUE PRÁCTICO.....	30
3.5.2.1. Microscopio Óptico.....	30
3.5.2.2. Proyector de Perfiles.....	33
3.5.2.3. Microscopio con tecnología confocal.....	36
3.5.3. ENFOQUE DE MODELO PREDICTIVO.....	39
3.6. SOLUCIÓN ADOPTADA.....	43
3.6.1. MARCO TEÓRICO.....	43
3.6.1.1. LA ELECTROEROSIÓN.....	43
3.6.1.2. LA ELECTROEROSIÓN COMO PROCESO DE MECANIZADO.....	48
3.6.1.3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	76
3.6.2. MARCO METODOLÓGICO.....	95
3.6.2.1. INTRODUCCIÓN.....	95
3.6.2.2. PUESTA A PUNTO Y PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN DE LA MÁQUINA DE WEDM.....	98
3.6.2.3. DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS Y PROCEDIMIENTO CAD/CAM.....	103
3.6.2.4. CORTE DE LAS PROBETAS.....	113
3.6.2.5. MEDICIÓN DE LAS PROBETAS.....	113
3.6.2.6. ACONDICIONAMIENTO DE RESULTADOS.....	147
3.6.2.7. ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.....	157
3.7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	163
3.7.1. INTRODUCCIÓN.....	163
3.7.2. DEFECTO DE FORMA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES.....	164
3.7.3. VALIDACIÓN DE LA RNA.....	172
3.7.3.1. H40 R3 (Espesor 40 mm y radio 3 mm).....	173
3.7.3.2. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm).....	176

3.7.3.3. H100 R15 (Espesor 100 mm y radio 15 mm).....	177
3.7.4. GENERALIZACIÓN DE LA RNA.....	180
3.7.4.1. H50 R4 (Espesor 50 mm y radio 4 mm).....	181
3.7.4.2. H80 R10 (Espesor 80 mm y radio 10 mm).....	183
3.7.5. CONCLUSIONES.....	185
3.8. VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS.....	186
3.8.1. VALORACIONES GENERALES.....	186
3.8.2. LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA.....	187

DOCUMENTO 4. BIBLIOGRAFÍA

4.1. BIBLIOGRAFÍA.....	1
------------------------	---

DOCUMENTO 5. ANEXOS:

DOCUMENTO 5.1. PLANOS

5.1.1. PLANOS DE PROBETAS.....	1
--------------------------------	---

DOCUMENTO 5.2. RESULTADOS

5.2.1. RESULTADOS DE MEDICIONES.....	2
5.2.1.1. IMÁGENES DE PROBETAS CON DESVIACIONES MÁXIMAS....	2
5.2.1.2. PUNTOS QUE FORMAN PARTE DE LA RNA.....	69
5.2.2. RESULTADOS DE LA RNA.....	87
5.2.2.1. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE LA RNA.....	87
5.2.2.2. RESULTADOS DE GENERALIZACIÓN DE LA RNA.....	114

DOCUMENTO 5.3. PRESUPUESTO

5.3.1. INTRODUCCIÓN.....2
5.3.2. HORAS INTERNAS.....3
5.3.3. INVERSIONES.....4
5.3.4. GASTOS.....5
5.3.5. LICENCIAS Y SOFTWARE.....6
5.3.6. PRESUPUESTO.....7

DOCUMENTO 5.4. PROGRAMAS CNC

5.4.1. PROGRAMAS CNC DE LAS PROBETAS.....1

DOCUMENTO 5.5. MACRO IMPORTAR TXT

5.5.1. MACRO IMPORTAR TXT.....1

2.1. OBJETO

El objeto del presente trabajo, titulado “*Aplicación de redes neuronales artificiales para la caracterización del error en trayectorias circulares por WEDM*”, es el estudio y posterior optimización del error en trayectorias circulares mecanizadas mediante electroerosión por hilo. Se pretende **desarrollar un modelo predictivo de dicho error a través de la implementación de una Red Neuronal Artificial (RNA)**, que deberá ser alimentada con **resultados** empíricos resultantes de una **batería de ensayos**. El **modelo desarrollado permitirá conocer a priori los errores** que se producirán al cortar formas circulares en distintos espesores y con distintos radios **sin necesidad de recurrir a costosas baterías de ensayos**.

2.2. ANTECEDENTES

Este proyecto se realiza en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (ETSIB) concretamente se ha llevado a cabo en el taller mecánico, que se encuadra en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, perteneciente al grupo de Fabricación de Alto Rendimiento. El taller mecánico dispone, además, de una sala de metrología donde poder analizar los resultados de cada ensayo realizado.

El proyecto forma parte de una Tesis Doctoral de una duración aproximada de 3 a 4 años en el ámbito de la Electroerosión y es parte de un trabajo de investigación para la empresa “ONA ELECTROEROSIÓN S.A.”.

El Trabajo se enmarca dentro de la electroerosión por hilo (WEDM), que se trata de un proceso no convencional de mecanizado, basado en la generación de descargas eléctricas controladas en presencia de un líquido denominado fluido dieléctrico entre dos elementos conductores, uno de los cuales constituye el útil de arranque y es denominado electrodo (hilo) y el otro es el material a conformar (pieza), ambos necesariamente conductores de la electricidad. Cada una de las descargas produce el arranque de una cierta cantidad de material tanto de la pieza como del electrodo.

El mecanismo de arranque de material es fundamentalmente una combinación de fenómenos térmico y mecánico. La temperatura alcanzada en el punto de aplicación de la descarga provoca la fusión y vaporización del material de la pieza, el cual es arrastrado en forma de carbonilla fuera de la zona de erosión por el dieléctrico circulante.

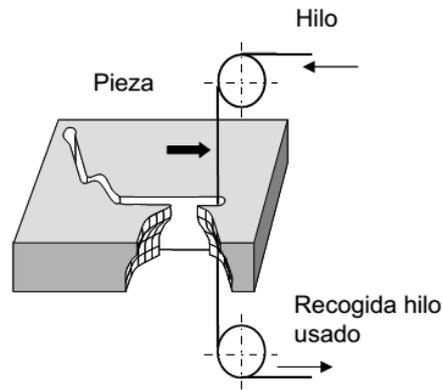


Figura 1. Esquema del proceso de corte por electroerosión por hilo.

Las aplicaciones del proceso de electroerosión por hilo se centran en el campo de la fabricación de utillajes en aceros tratados térmicamente. La singularidad del mismo es que proporciona la posibilidad de mecanizar materiales después de su tratamiento térmico. Así, troqueles de corte y doblado (conjuntos punzón-matriz), insertos para moldes, etc., son componentes clásicos fabricados por esta tecnología. Sin embargo en los últimos años otros sectores están mostrando interés por el proceso, especialmente la industria aeronáutica y los fabricantes de útiles en materiales extra-duros, como puede ser el diamante policristalino.

La tendencia actual es considerar la electroerosión por hilo como un proceso de alta precisión. En este sentido y en cuanto al objeto del proyecto, que tiene como fin la optimización del corte de trayectorias circulares, se pretende conseguir reducir las tolerancias geométricas en dichas trayectorias.

En relación al objeto del presente estudio, la pérdida de precisión que da como resultado el defecto o error de forma en el proceso de corte se da, entre otros factores por la pérdida de verticalidad del hilo, es decir por la deformación que presenta éste durante el proceso de corte (Ver Fig. 2).

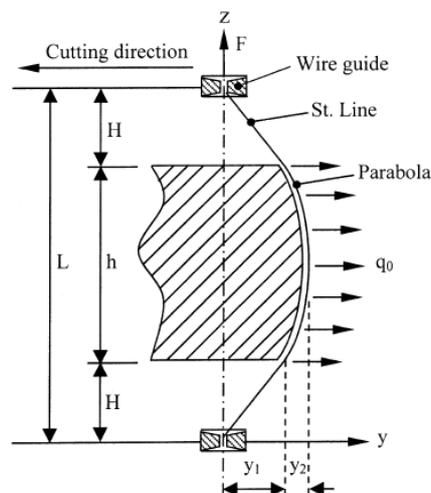


Figura 4. Flexión del hilo durante el corte.

Dicha deformación depende, para una cierta tensión de hilo, de aspectos tales como el tipo de corte (corte, primer repaso, segundo repaso, etc.), la trayectoria de las guías por donde discurre el hilo, es decir, corte recto o de esquinas, y sobre todo, el régimen de trabajo, que depende fundamentalmente de parámetros tales como la tensión de vacío, la potencia, la presión del dieléctrico, la duración del pulso y el tiempo entre descargas. Estos parámetros dan lugar a un sistema de fuerzas que provoca la flexión del hilo (componente estática) y su vibración (componente dinámica). Como consecuencia, se producen desviaciones de la posición real del hilo con respecto a la posición nominal de las guías, es decir la posición programada del centro del hilo en el programa de Control Numérico. El resultado son desviaciones en la geometría de la pieza programada, principalmente en su verticalidad, pero también en su perfil especialmente en aquellas zonas que suponen un cambio de dirección en el movimiento de las guías, es decir, en el caso que acontece el presente estudio, en trayectorias de corte circulares, se hacen patente estas desviaciones.

2.3. METODOLOGÍA

La caracterización del error o defecto de forma en trayectorias circulares en el proceso de fabricación de electroerosión por hilo, objetivo que se persigue en este estudio, supondría realizar numerosos ensayos cortando probetas en diferentes radios y espesores. En el caso de la creación de una tecnología específica para trayectorias, supondría realizar un número de ensayos aun mayor, debido a otra nueva variable además del espesor: radios.

Para remediar ese problema sea hecho uso de una *Red Neuronal Artificial (RNA)* que ha sido entrenada dotándola con entradas y salidas que han resultado de las mediciones de distintas probetas de diversos radios y espesores, para que, una vez entrenada la red, ésta sea capaz de extrapolar los resultados y predecir las medidas para cualquier espesor y radio, con el fin de caracterizar el defecto de forma y que ello pueda dar lugar a la creación de una nueva tecnología de corte para trayectoria circular.

Para ello se han realizado diferentes ensayos en bloques de acero F-114, de distintos espesores, endurecido mediante tratamientos térmicos y posteriormente rectificado. Dichos ensayos han consistido en cortar geometrías como la de la *Figura 3* con diferentes radios para posteriormente medir su contorno y, con ello, poder entrenar la RNA. Se han cortado probetas en tres espesores 40, 70 y 100 mm, y radios 1, 1.5, 3, 5, 9, 12, 15 y 20 mm, mediante la máquina de electroerosión por hilo ONA AX3, y se ha medido su contorno mediante la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) Zeiss, ambas presentes en el Taller Mecánico (ver *Figs. 4 y 5*).

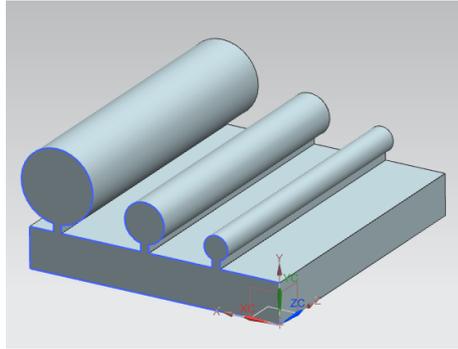


Figura 3. CAD de una de las probetas que han formado parte del estudio.



Figuras 4 y 5. Máquina de corte por hilo ONA AX3 y MMC de Zeiss, respectivamente.

Una vez se realizaron las mediciones de todas las probetas se procedió a entrenar la RNA. El entrenamiento de la red se llevó a cabo mediante archivos “txt” con las coordenadas de los puntos medidos en la MMC siendo éstos las salidas de la red, mientras que, como entradas a la misma, se presentaron el espesor y radio de una determinada probeta así como el plano (a qué determinado nivel de espesor) en el que se realizó la medición. Con ello se entrenó la red variando los pesos sinápticos de las capas de neuronas artificiales, hasta que la propia red fuese capaz de predecir qué ocurrirá en distintos espesores y radios. Finalmente, de cara a verificar la capacidad de generalización de la RNA, se cortaron dos probetas de radios y espesores distintos a los ensayados, se midieron de la misma forma que el resto de probetas, y se comprobó si la red funcionaba satisfactoriamente.

2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Después de ver los resultados de las mediciones y del entrenamiento, validación y generalización de la RNA, los cuales se presentan en los ANEXOS del presente estudio, se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- En lo que respecta a la caracterización del error o defecto de forma en trayectorias circulares cortadas mediante WEDM, se puede concluir que tras el corte y medición de las probetas que han formado parte de la batería de ensayos, las desviaciones son mayores conforme aumenta el espesor y disminuye el radio de la trayectoria. Además se puede decir que el error de forma es menor en la parte superior e inferior rectificadas de las probetas cortadas, que en la parte central de las mismas, puesto que el corte ha sido llevado a cabo con las boquillas apretadas.
- La red ha sido entrenada con éxito puesto que, para las probetas de validación, se ha conseguido que las salidas que da la RNA para cada probeta, se aproximen con el mínimo error posible a las salidas esperadas u objetivo.
- La RNA ha logrado adquirir la capacidad de generalización, prediciendo de manera satisfactoria el defecto de forma para las probetas cortadas para ello.
- Para finalizar, se puede aseverar que se ha alcanzado el objetivo del proyecto, es decir, se ha logrado caracterizar el error en trayectorias circulares en electroerosión por hilo, mediante el uso de una RNA, consiguiendo predecir el error de forma en cualquier trayectoria y espesor de probeta (R y H).

2.5. LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA

Una vez generados los resultados de la red neuronal y comprobar que el patrón observado en las pruebas se reproduce por el sistema, se puede programar dicho sistema de forma que prediga cuál debe ser la trayectoria de las guías que mueven el hilo para que la erosión sea correcta. Esto deberá hacerse en base a un error definido previamente, cuyo criterio deberá acordarse.

Todo el trabajo que en este estudio se recoge, junto con la ejecución de las líneas futuras aquí expuestas, puede dar lugar a una propuesta técnica que lleve a mejorar la precisión de la electroerosión en trayectorias complejas. Lo que ha comenzado siendo una herramienta predictiva del error mediante la aplicación de las redes neuronales, acabaría generando trayectorias idóneas de forma autónoma para conseguir las tolerancias exigidas, cada vez más ajustadas, por parte de los usuarios de esa técnica en un solo corte (desbaste).

3.1. ÍNDICE

3.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	3
3.2.1. TÉRMINOS BÁSICOS ELECTROEROSIÓN	3
3.2.1.1. Terminología general.....	3
3.2.1.2. Terminología eléctrica.....	6
3.2.2. TERMINOLOGÍA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	7
3.2.3. TERMINOLOGÍA DE REDES NEURONALES	8
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
3.3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO	10
3.3.2. OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN	12
3.4. ANTECEDENTES	13
3.4.1. INTRODUCCIÓN.....	13
3.4.2. INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)	13
3.4.3. PÉRDIDA DE PRECISIÓN EN CORTE MEDIANTE WEDM.....	14
3.4.4. ESTADO DEL ARTE	17
3.4.4.1. ESTADO DEL ARTE EN ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM). 17	
3.4.4.2. ESTADO DEL ARTE EN RNA	24
3.5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	29
3.5.1. INTRODUCCIÓN.....	29
3.5.2. ENFOQUE PRÁCTICO.....	30
3.5.2.1. Microscopio Óptico	30
3.5.2.2. Proyector de perfiles.....	33
3.5.2.3. Microscopio con tecnología confocal.....	36
3.5.3. ENFOQUE DE MODELO PREDICTIVO	39
3.6. SOLUCIÓN ADOPTADA	43
3.6.1. MARCO TEÓRICO.....	43
3.6.1.1. LA ELECTROEROSIÓN	43
3.6.1.2. LA ELECTROEROSIÓN COMO PROCESO DE MECANIZADO... 48	
3.6.1.3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNAs).....	76
3.6.2. MARCO METODOLÓGICO	95

3.6.2.1. INTRODUCCIÓN.....	95
3.6.2.2. PUESTA A PUNTO Y PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN DE LA MÁQUINA DE WEDM.....	98
3.6.2.3. DISEÑO DE A GEOMETRÍA DE PROBETAS Y PROCEDIMIENTO CAD/CAM	103
3.6.2.4. CORTE DE LAS PROBETAS.....	113
3.6.2.5. MEDICIÓN DE LAS PROBETAS.....	121
3.6.2.6. ACONDICIONAMIENTO DE RESULTADOS	147
3.6.2.7. ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.....	157
3.7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	163
3.7.1. INTRODUCCIÓN.....	163
3.7.2. DEFECTO DE FORMA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES.....	164
3.7.3. VALIDACIÓN DE LA RNA	172
3.7.3.1. H40 R3 (Espesor 40 mm y radio 3 mm).....	173
3.7.3.2. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm).....	176
3.7.3.3. H100 R15 (Espesor 100 mm y radio 15 mm).....	177
3.7.4. GENERALIZACIÓN DE LA RNA	180
3.7.4.1. H50 R4 (Espesor 50 mm y radio 4 mm).....	181
3.7.4.2. H80 R10 (Espesor 80 mm y radio 10 mm).....	183
3.7.5. CONCLUSIONES.....	185
3.8. VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS	186
3.8.1. VALORACIONES GENERALES.....	186
3.8.2. LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA.....	187

3.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

3.2.1. TÉRMINOS BÁSICOS ELECTROEROSIÓN

3.2.1.1. Terminología general

Arco: Sucesión de descargas eléctricas que se sitúan localizadamente en un punto. Tienen efecto destructor.

Aspiración: Succión del líquido dieléctrico a través de la pieza o electrodo.

Cortocircuito: Situación dada cuando existe contacto directo entre los dos electrodos (electrodo y pieza). No tiene efecto destructor pero sí negativo para el proceso.

Cráter: Cavidad realizada por cada uno de los impulsos sobre la superficie que se está mecanizando.

Desgaste: Se denomina desgaste volumétrico relativo (θ_v) a la relación entre el volumen de material arrancado del electrodo y el arrancado de la pieza. Se mide en tanto por 100.

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen arrancado en el electrodo}}{\text{Volumen arrancado en la pieza}} \times 100$$

Se puede medir también el desgaste frontal, que es la zona desgastada del electrodo (Fig. 1).

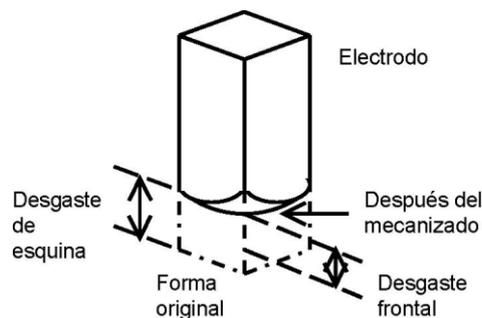


Figura 1. Desgaste de un electrodo.

Desionización: Retorno del líquido dieléctrico a la situación normal no conductora después de cada descarga eléctrica.

Dieléctrico (Líquido): Líquido no conductor de la electricidad que se utiliza en electroerosión; en él se sumergen la pieza y el electrodo durante el proceso de mecanizado.

Electrodo: Es la herramienta de trabajo que se utiliza en electroerosión.

Estabilidad de funcionamiento: Una máquina de electroerosión trabaja de forma estable cuando hay ausencia de cortocircuitos y de arcos.

Estado de superficie: El estado superficial en electroerosión no es direccional como en otros procesos, sino multidireccional. Dicho estado superficial se relaciona con la rugosidad media (R_a) por medio del número de rugosidad (N_r) VDI 3.402. Se cumple la relación:

$$N_r = 20 \cdot \log (10 \cdot R_a)$$

estando R_a expresado en μm .

Gap: Espacio entre electrodo y pieza en el cual se dan las descargas.

Se pueden distinguir:

- Gap frontal (Fig. 2): Cuando dicho espacio no es paralelo a la dirección del eje de penetración.
- Gap lateral (Fig. 2): Gap paralelo al eje de penetración. Es mayor el gap en este caso.

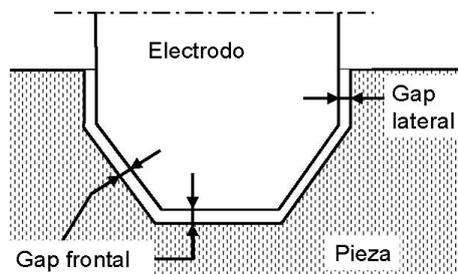


Figura 2. Gap lateral y frontal en electroerosión por penetración

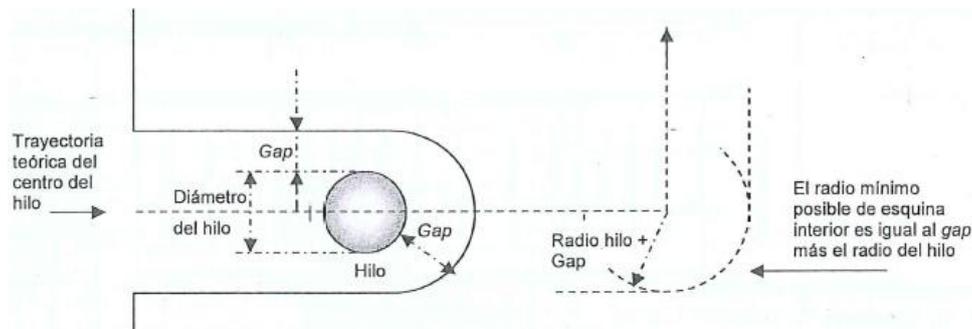


Figura 3. Gap en electroerosión por hilo.

Inyección del dieléctrico (Limpieza por): Introducción de dieléctrico en el gap por inyección a una presión dada.

Ionización: Período anterior al paso de la descarga eléctrica durante el cual el líquido dieléctrico se convierte en conductor en un punto dado. Para ello se ha de aplicar tensión eléctrica a ambos electrodos.

Limpieza: Arrastre del dieléctrico que se encuentra contaminado dentro del gap, sustituyéndolo por otro limpio.

Offset: Se trata de la demasía que se

Pieza: Pieza que se mecaniza con el electrodo.

Polaridad: Polo al cual se ha unido el electrodo.

Polución: Grado de suciedad del dieléctrico del gap. Este contiene restos del craking del dieléctrico y del material erosionado.

Presión del dieléctrico (Limpieza por): Véase Inyección

Presión del dieléctrico: Unidades.- Fuerza por unidad de superficie que actúa sobre las paredes por las circula el dieléctrico. Sus unidades son: kg/cm^2 y bar.

bar 1 : Decanewton $1/\text{cm}^2$: $1\text{daN } 1/\text{cm}^2$.

1 kg/cm^2 : 0,981 bar (≈ 1).

Rendimiento: Se define como la conjunción entre una buena velocidad de arranque de material y un desgaste lo más bajo posible. Para un buen rendimiento la primera condición es una buena estabilidad en el trabajo.

Rigidez dieléctrica: Se define "Rigidez dieléctrica de un dieléctrico" al campo eléctrico que es capaz de aguantar dicho dieléctrico sin ionizarse, es decir, sin volverse conductor. Se mide en kilovoltios/cm.

Rugosidad: Véase "Estado de superficie".

Viscosidad: La viscosidad de un fluido corresponde a la resistencia de rozamiento que ejerce el desplazamiento relativo de sus moléculas cuando se halla el fluido en movimiento.

3.2.1.2. Terminología eléctrica

Descarga: Paso de corriente a través de algún punto del gap, debida a un impulso de tensión.

- Descarga isoenergética.-Caso en el que se cumple que todas las descargas tienen la misma energía.
- Descarga isofrecuencial.-Caso en el que se cumple que la frecuencia de descargas es constante.

Frecuencia de impulso (f_p): Número de impulsos que se dan en un segundo.

Período (t_p): Tiempo que pasa desde el comienzo de un impulso hasta el comienzo del impulso siguiente (Fig. 4).

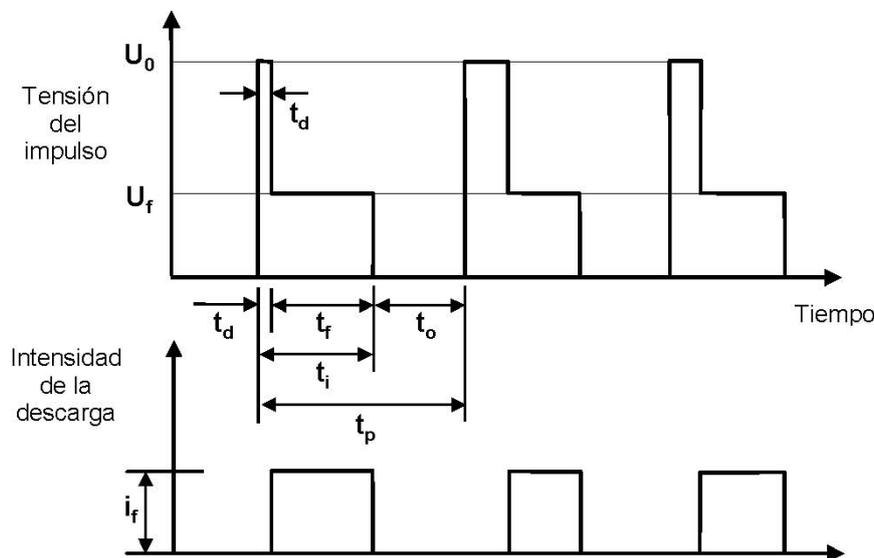


Figura 4. Terminología eléctrica (VDI 3402).

Tensión de descarga (U_f): Tensión entre electrodo y pieza después de cebada la descarga (Fig. 4)

Tensión en vacío (U_0): Tensión entre electrodo y pieza antes de cebada la descarga, o tensión entre electrodos si no hay descarga (Fig. 4)

Impulso de tensión: Tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo determinado.

Impulso de intensidad: Véase "Descarga".

Intensidad media de corriente (I_{fm}): Valor medio de la corriente que circula por el gap durante el mecanizado. Es el valor leído en el amperímetro (Fig. 4).

Intensidad de impulso (i_f): Intensidad que circula por el gap durante una descarga (Fig. 4).

Tiempo de descarga (t_f): Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente (Fig. 4).

Tiempo de impulso (t_i): Tiempo que dura el impulso de erosión entre ambos electrodos (Fig.4).

Tiempo de pausa (t_o): Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un impulso y el comienzo del siguiente (Fig. 4). Se verifica que:

$$t_p = t_i + t_o$$

Tiempo de retraso de descarga o de ionización (t_d): Tiempo que transcurre entre la aplicación del impulso de tensión y el comienzo de descarga. Suele ser muy pequeño, del orden de 0,5 a 2 μs (Fig. 4). Se cumple que:

$$t_i = t_d + t_f$$

NOTA: La nomenclatura aquí expuesta coincide con la de la Norma VDI 3402, titulada: “Mecanizado por electroerosión, Parte 1, Definiciones y terminología”. Junio 1980.

3.2.2. TERMINOLOGÍA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS

Alineación: La alineación se realiza sobre la pieza fijada previo paso a la medición, y consiste en definir el sistema de referencia idóneo de la pieza mediante sus características representativas.

Bestfit: Método mediante el cual el Software de medición por coordenadas es capaz de calcular (relacionando las coordenadas reales con las teóricas) las traslaciones y los giros necesarios para generar el sistema de referencia más acertado. El programa realiza iteraciones de cálculo hasta que la desviación estándar de los errores sea mínima.

Desviación: diferencia entre las coordenadas teóricas y reales de un punto palpado.

MMC (Maquina de medir por coordenadas): Se trata de un instrumento que de medida absoluta de precisión capaz de determinar la dimensión, forma, posición y “actitud” (perpendicularidad, planitud, etc.) de un objeto midiendo la posición de distintos puntos de su propia superficie.

Palpador: Se trata del elemento de la MMC, formado por un cabezal y una terminación esférica, que entra en contacto (palpa) con la superficie de la pieza con el fin de medir su desviación (ver Fig. 5).

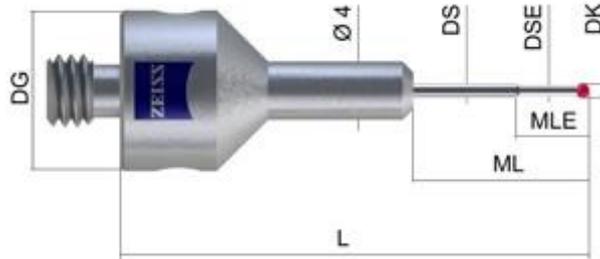


Figura 5. Palpador de Zeiss.

3.2.3. TERMINOLOGÍA DE REDES NEURONALES

Capa de neuronas: Se conoce como capa o nivel a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente y cuyas salidas se dirigen al mismo sentido.

Función de activación: Se trata de una regla que combina las entradas a la neurona artificial, con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de activación.

Neurona: es la unidad elemental de proceso en RNAs. Se trata de un elemento procesador que presenta varias entradas y las combina, normalmente con una suma básica. La suma de estas entradas es modificada por una función de transferencia y el valor de la salida de esta función se pasa directamente a la salida del elemento procesador.

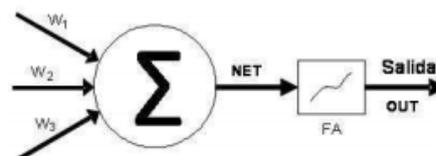


Figura 6. Esquema de una neurona artificial.

Peso sináptico (w_{ij}): es un valor numérico que pondera las señales que reciben las neuronas artificiales en sus entradas (ver Fig. 6).

RNA: Red Neuronal Artificial. Son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales.

Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida.

Redes feedforward: Son aquellas redes en las que la información se mueve en un único sentido, desde la entrada a la salida.

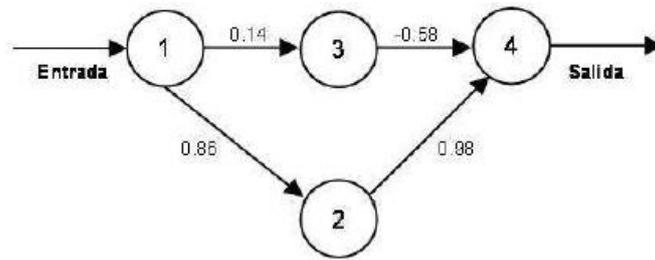


Figura 7. RNA alimentada hacia delante.

Redes feedforward/feedback: Se tratan de Redes Neuronales Artificiales en las que sus elementos pueden enviar estímulos a neuronas de capas anteriores, de su propia capa o a ellos mismos.

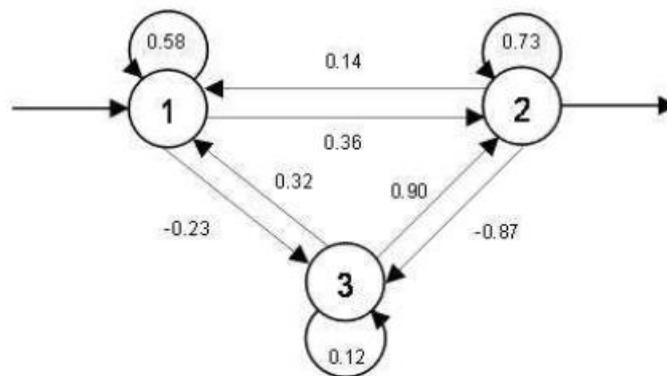


Figura 8. RNA con retroalimentación.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

3.3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO

La electroerosión es un método de arranque de material, que se enmarca dentro de los procesos de mecanizado no convencionales, en el que se erosiona el material por medio de descargas eléctricas controladas que se dan en un medio dieléctrico, entre un electrodo y una pieza, como se puede ver de manera esquemática en la *Figura 1*. El proyecto que aquí se describe se encuadra dentro de los procesos de electroerosión por hilo, WEDM, una de las dos variantes de la electroerosión (EDM). La otra variante es la electroerosión por penetración, SEDM.

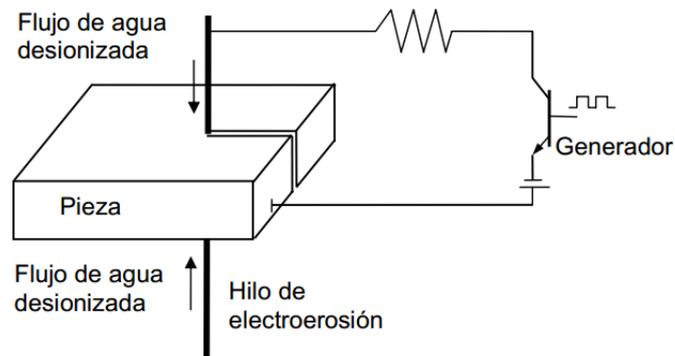


Figura 1. Esquema del proceso de WEDM.

En el proceso de electroerosión existen un gran número de variables, las cuales hay que fijar en función del espesor de la pieza a mecanizar, para optimizar el proceso de corte. Esto supone un gran número de ensayos a realizar, lo que lleva a duraciones de proyectos muy elevadas. En el caso de la creación de una tecnología específica para trayectorias circulares, supondría realizar un número de ensayos aun mayor, debido a otra nueva variable además del espesor: los radios de dichas trayectorias.

Con objeto de reducir esta batería de ensayos se ha estudiado la opción de erosionar un número pequeño de probetas que describan el defecto de erosión e introducir los resultados de estas medidas en una Red Neuronal Artificial (RNA).

Las RNA son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida.

En el apartado “3.6.1. MARCO TEÓRICO” del presente Trabajo, se explica de manera más detallada su funcionamiento. En la *Figura 2*, se puede ver un esquema de las RNA.

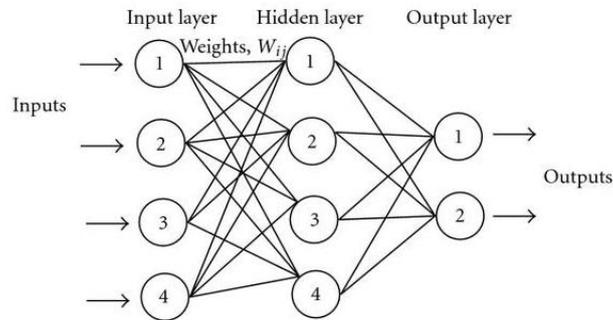


Figura 2. Esquema Básico de una RNA.

Por lo tanto, el objeto del presente trabajo es el estudio y posterior optimización del error en trayectorias circulares mecanizadas mediante electroerosión por hilo. Se pretende desarrollar un modelo predictivo de dicho error a través de la implementación de una Red Neuronal Artificial (RNA), que deberá ser alimentada con resultados empíricos resultantes de una batería de ensayos. El modelo desarrollado permitirá conocer a priori los errores que se producirán al cortar formas circulares en distintos espesores y con distintos radios sin necesidad de recurrir a costosas baterías de ensayos.

3.3.2. OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN

El objetivo final del proyecto es la creación de una nueva tecnología de corte en WEDM para trayectorias circulares, que solvete los problemas dimensionales que surgen a la hora de efectuar el primer corte en esta tecnología. Se persigue una eficiencia en el primer corte reduciendo tolerancias, con el fin de disminuir el número de repasos a realizar posteriormente e incluso no realizarlos.

La creación de una nueva tecnología de corte para trayectorias circulares en el proceso de fabricación de electroerosión por hilo, supondría realizar numerosos ensayos cortando probetas en diferentes radios y espesores. En el caso de la creación de una tecnología específica para trayectorias circulares, supondría realizar un número de ensayos aun mayor, debido a otra nueva variable además del espesor: los radios.

Para remediar ese problema (el elevado número de ensayos necesarios) se hará uso de una Red Neuronal Artificial (RNA) que será entrenada dotándola con entradas y salidas que resulten de las mediciones de distintas probetas de diversos radios y espesores, para que, una vez entrenada la red, ésta sea capaz de extrapolar los resultados y predecir las medidas para cualquier espesor y radio, con el fin de crear una nueva tecnología de corte para trayectoria circular.

Por tanto, el fin de este proyecto es caracterizar el defecto o error de forma que se da en el corte de trayectorias circulares en electroerosión por hilo con el objetivo de predecir la trayectoria que las guías de la máquina deben seguir en el corte de cualquier espesor y radio en estas geometrías, teniendo en cuenta ese defecto de erosión en el corte de un número reducido de probetas, contando para ello con la ayuda de una RNA que minimice el número de ensayos, con el consiguiente importante ahorro económico y humano, los cuales se harán patentes en el apartado “*Presupuesto*” de los ANEXOS.

Resumen de objetivos

- Definir una metodología para la caracterización del error en trayectorias circulares en WEDM.
- Caracterizar el error o defecto de forma en trayectorias circulares en WEDM en función del espesor y radio de la probeta.
- Generar una Red Neuronal Artificial (RNA) con el fin de predecir el error o defecto de forma para otras trayectorias circulares de espesores y radios distintos.
- Validar dicha RNA previo paso a la verificación de la capacidad de generalización de la misma, es decir, comprobar si funciona satisfactoriamente.

3.4. ANTECEDENTES

3.4.1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se realiza en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (ETSIB), siendo la ciudad en la que se ubica, la capital industrial del País Vasco. Concretamente, se ha llevado a cabo en el taller mecánico, que se encuadra en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, perteneciente al grupo de Fabricación de Alto Rendimiento. Este grupo está compuesto por varios profesores doctores y otros profesores en curso de realización de la Tesis Doctoral, personal investigador realizando su Tesis Doctoral y alumnos de segundo ciclo colaboradores; todos ellos cuentan a su vez, con el apoyo del resto de profesores de otras áreas del Departamento. El taller mecánico dispone, además, de una sala de metrología donde poder analizar los resultados de cada ensayo realizado.

El proyecto forma parte de una Tesis Doctoral de una duración aproximada de 3 a 4 años en el ámbito de la Electroerosión y es parte de un trabajo de investigación para la empresa “ONA ELECTROEROSIÓN S.A.”.

3.4.2. INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)

La electroerosión se trata de un proceso no convencional de mecanizado, basado en la generación de descargas eléctricas controladas en presencia de un líquido denominado fluido dieléctrico (en el proyecto se trata de agua desionizada) entre dos elementos conductores, uno de los cuales constituye el útil de arranque y es denominado electrodo (hilo) y el otro es el material a conformar (pieza), ambos necesariamente conductores de la electricidad. Cada una de las descargas produce el arranque de una cierta cantidad de material tanto de la pieza como del electrodo.

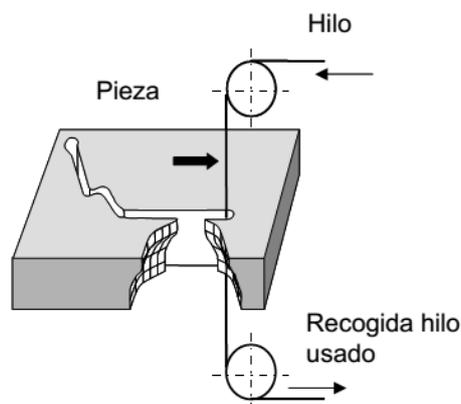


Figura 1. Esquema del proceso de corte por electroerosión por hilo.

El mecanismo de arranque de material es fundamentalmente una combinación de fenómenos térmico y mecánico. La temperatura alcanzada en el punto de aplicación de la descarga provoca la fusión y vaporización del material de la pieza, el cual es arrastrado en forma de carbonilla fuera de la zona de erosión por el dieléctrico circulante.

Las aplicaciones del proceso de electroerosión por hilo se centran en el campo de la fabricación de utillajes en aceros tratados térmicamente. La singularidad del proceso es que proporciona la posibilidad de mecanizar materiales después de su tratamiento térmico. Así, troqueles de corte y doblado (conjuntos punzón-matriz), insertos para moldes, etc., son componentes clásicos fabricados por esta tecnología. Sin embargo en los últimos años otros sectores están mostrando interés por el proceso, especialmente la industria aeronáutica y los fabricantes de útiles en materiales extra-duros, como puede ser el diamante policristalino.

La tendencia actual es considerar la electroerosión por hilo como un proceso de alta precisión. En este sentido y en cuanto al objeto del proyecto, que tiene como fin la optimización del corte de trayectorias circulares, se pretende conseguir reducir las tolerancias geométricas en dichas trayectorias. La eficiencia del proceso, que es lo que se persigue, viene determinada por la conjunción de una serie de factores, que vienen determinados por cada tecnología de corte (esta varía en función del espesor de la pieza a mecanizar), probablemente los más importantes son la tensión del hilo, el dieléctrico y los parámetros eléctricos.

3.4.3. PÉRDIDA DE PRECISIÓN EN CORTE MEDIANTE WEDM

Como ya se ha comentado, el proceso de corte por hilo se trata de un proceso de mecanizado de elevada precisión. Los requisitos impuestos por los usuarios de esta tecnología son cada vez más ajustados, lo que hace que los fabricantes dediquen especiales esfuerzos a cumplir intervalos de tolerancia cada vez más estrechos. El ejemplo extremo se encuentra en la microelectroerosión, con componentes caracterizados por precisiones de uno o varios órdenes de magnitud por debajo de las piezas tradicionales de la industria metalmeccánica.

En relación al objeto del presente estudio, la pérdida de precisión en el proceso de corte se da, entre otros factores por la pérdida de verticalidad del hilo, es decir por la deformación que presenta éste durante el proceso de corte (*Ver Figura 2*).

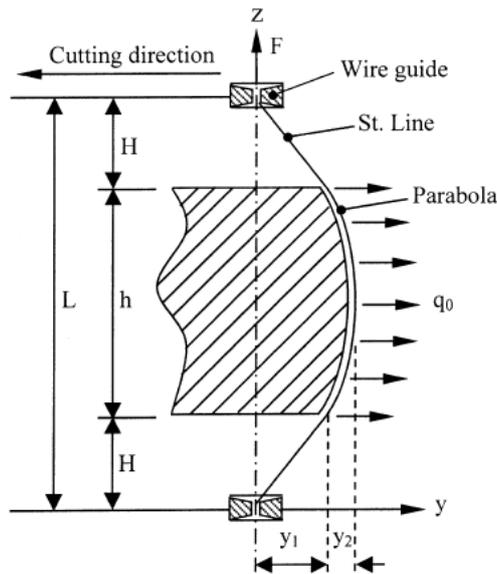


Figura 2. Flexión del hilo durante el corte.

Dicha deformación depende, para una cierta tensión de hilo, de aspectos tales como el tipo de corte (corte, primer repaso, segundo repaso, etc.), la trayectoria de las guías por donde discurre el hilo, es decir, corte recto o de esquinas, y sobre todo, el régimen de trabajo, que depende fundamentalmente de parámetros tales como la tensión de vacío, la potencia, la presión del dieléctrico, la duración del pulso y el tiempo entre descargas. En relación al régimen de trabajo, los principales fenómenos que causan las fuerzas responsables de la flexión del hilo son:

Fuerza electrostática: Aparece entre pieza e hilo cuando la potencia del generador disminuye, o bien cuando existe poca cantidad de dieléctrico en el canal de descarga. La aparición de esta fuerza lleva consigo un acercamiento del hilo hacia la pieza.

Fuerza electromagnética: Aparece únicamente durante el periodo correspondiente al tiempo de pulso. Tiende asimismo a acercar el hilo a la pieza, aunque su magnitud es menor que el de la fuerza electrostática

Fuerza electrodinámica: Su origen se encuentra en la elevada densidad de corriente en el gap y su magnitud depende de la frecuencia e intensidad de las descargas. Tiende a separar hilo y pieza y su magnitud es mayor que las anteriores.

Fuerza del dieléctrico: Se trata de la presión de inundación del gap durante el corte, que varía en función de la tecnología (espesor de pieza y separación de boquillas). Esta fuerza contribuye a que el hilo se separe de la pieza en la dirección contraria al avance, ya que es en esta dirección en la que fluye el dieléctrico una vez inundado el canal. En los repasos la presión es menor que en el primer corte y su dirección no es tan clara, ya que el dieléctrico fluye en ambos sentidos al existir ya el canal.

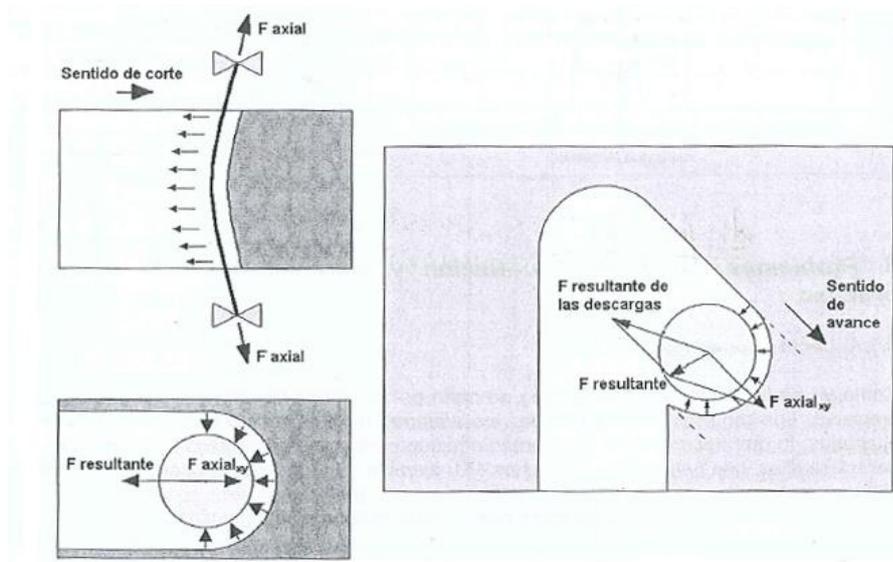


Figura 3. Resultante del sistema de fuerzas actuando sobre el hilo en el primer corte.

Fuerza axial de tracción: Contribuye a que el hilo se mantenga vertical, contrarrestando las anteriores. Al ser generada por una unidad mecánica de la máquina su valor puede ser fijado por el usuario, empleando los valores más altos en los repasos y en las zonas de cambio de dirección. El máximo valor que se puede imponer depende de la resistencia mecánica del hilo.

Este sistema de fuerzas actuando sobre el hilo provoca su flexión (componente estática) y vibración (componente dinámica). Como consecuencia, se producen desviaciones de la posición real del hilo con respecto a la posición nominal de las guías, es decir la posición programada del centro del hilo en el programa de Control Numérico. El resultado son desviaciones en la geometría de la pieza programada, principalmente en su verticalidad, pero también en su perfil especialmente en aquellas zonas que suponen un cambio de dirección en el movimiento de las guías, es decir, en el caso que acontece el presente estudio, en trayectorias de corte circulares, se hacen patente estas desviaciones.

Resumiendo, como ya se ha comentado previamente el objetivo principal que se persigue en el presente proyecto es caracterizar el error de forma que se da en el primer corte en trayectorias circulares, lo cual, evidentemente, está íntimamente relacionado con todo lo expuesto anteriormente.

3.4.4. ESTADO DEL ARTE

A continuación se efectuará un breve resumen de los estudios y trabajos más relevantes en lo que respecta a la Electroerosión por hilo (WEDM) y la aplicación de las Redes Neuronales Artificiales en esta.

En lo que respecta a la Electroerosión por hilo, se hará hincapié en aquellos estudios más representativos o que tengan mayor relación con la problemática y el objeto del presente estudio. En cuanto a las Redes Neuronales Artificiales se procederá de igual manera.

3.4.4.1. ESTADO DEL ARTE EN ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)

En cuanto a la caracterización y corrección del error en el corte de trayectorias circulares mediante WEDM, no hay demasiados estudios e investigaciones. Sin embargo sí hay numerosos artículos y estudios acerca de la corrección de trayectorias en esquinas y la optimización de la imprecisión geométrica debida a la deformación del hilo anteriormente mencionada. Seguidamente se resumirán aquellos que se han considerado más representativos.

Zhi Chen et al. [Chen, 2015], publicaron un estudio en el cual se propone un modelo de acoplamiento multi-físico tridimensional (modelo térmico, modelo de campo electromagnético y modelo estructural) para analizar y controlar la vibración del hilo en el proceso de corte de placas de pequeño espesor.

Primeramente se desarrolla el modelo térmico tridimensional para evaluar la distribución de temperatura en el hilo, considerando el calor por convección y el calor por conducción, asimismo se desarrollan soluciones numéricas del incremento de temperatura del hilo, bajo diferentes parámetros de proceso.

Seguidamente se clarifica en detalle el mecanismo de la fuerza electromagnética actuando sobre el hilo y se diseña un programa espacial mediante el método de elementos finitos (ver Fig. 4), con el fin de analizar el campo electromagnético considerando la inducción electromagnética. Entonces, combinando el modelo térmico con el modelo de campo electromagnético y el modelo estructural convencional, se establece un modelo de acoplamiento multi-físico para calcular la frecuencia y amplitud de la vibración del hilo bajo descargas múltiples aleatorias. Además los resultados simulados del modelo de acoplamiento multi-físico de la vibración del hilo muestran buena concordancia con datos experimentales, y se ilustran las reglas que influyen en los parámetros de proceso en la vibración del hilo, para buscar la mejor combinación de parámetros.

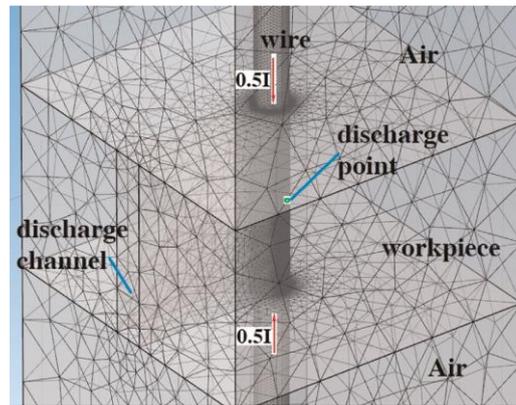


Figura 4. Configuración del análisis del campo electromagnético en WEDM. [Chen, 2015]

Finalmente se presentan tres métodos prácticos para contener la vibración del hilo, obteniéndose importantes efectos al suprimir la vibración del hilo, así como la mejora de la precisión geométrica (ver Fig.5).

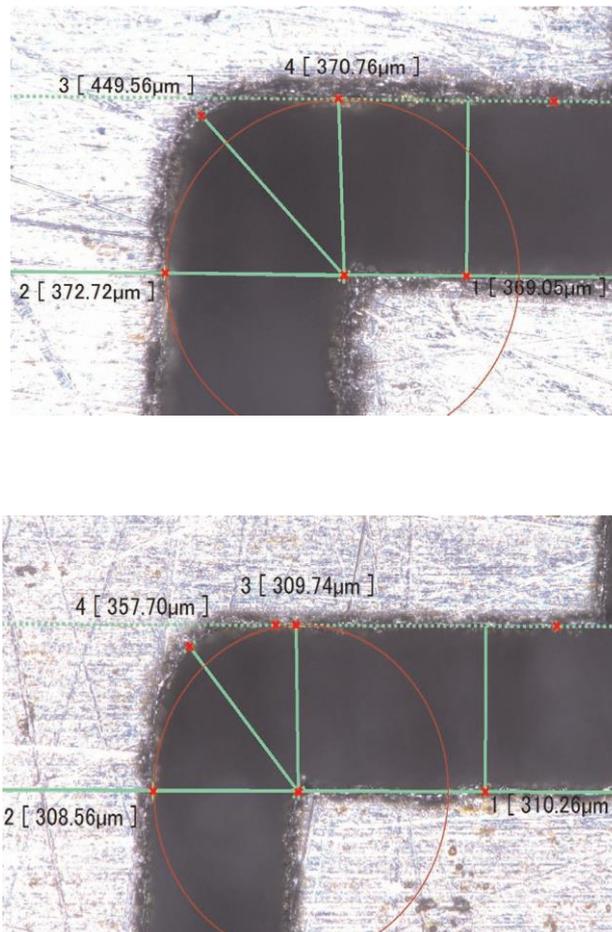


Figura 5. Mejora de la precisión en una esquina, gracias a la eliminación de la vibración del hilo. [Chen, 2015]

A.B. Puri et al. [Puri 2003] publican un estudio donde se resume un informe sobre el comportamiento vibratorio del hilo y presenta un acercamiento analítico a la solución de la ecuación de vibración del hilo considerando descargas de chispas múltiples, con el fin de investigar sobre los efectos característicos de la vibración del hilo en WEDM (ver Fig. 6).

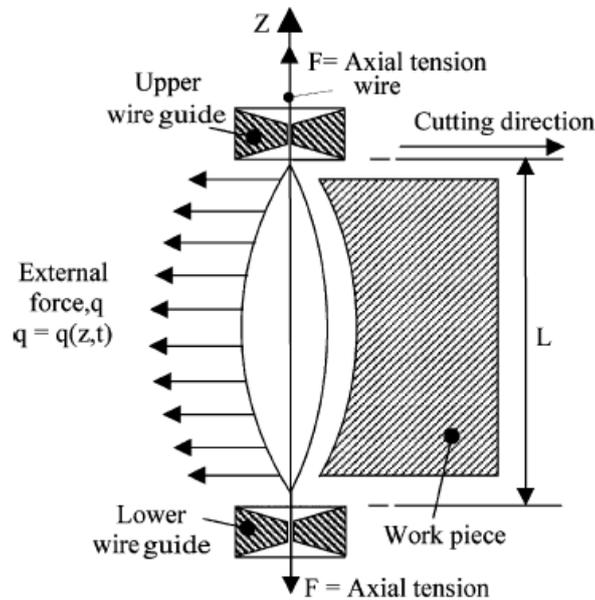


Figura 6. Diagrama esquemático de la vibración del hilo en WEDM, [Puri 2003].

El estudio incluye el resultado del modelo describiendo la influencia de las frecuencias de descarga de los pulsos bajo diversas tensiones de hilo en el máximo de amplitud de la vibración del hilo.

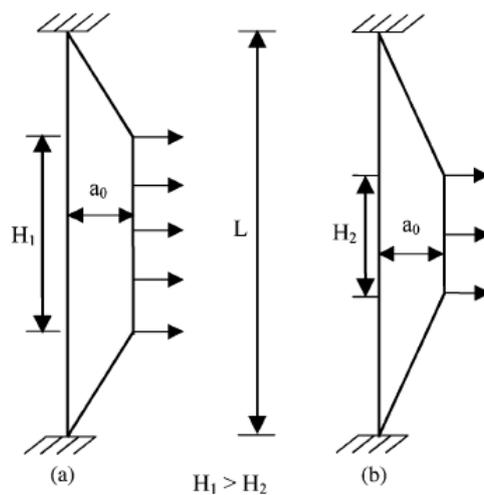


Figura 7. Variación de la amplitud en función del espesor de la pieza (H), [Puri 2003].

Además, en el documento, se ha estudiado la tendencia de variación de la amplitud máxima de vibración del hilo en función de la altura de la pieza y el espacio de hilo entre las guías de la máquina de Electroerosión por hilo (ver Fig. 7).

A.B. Puri et al. [Puri 2002], presentan un artículo en el que llevan a cabo un extenso estudio del fenómeno de retraso del hilo (flexión del mismo) en el proceso de mecanizado de Electroerosión por hilo (WEDM). También se establece la tendencia de variación de la imprecisión geométrica debida al retraso del hilo, con diversos parámetros de control de la máquina de WEDM.

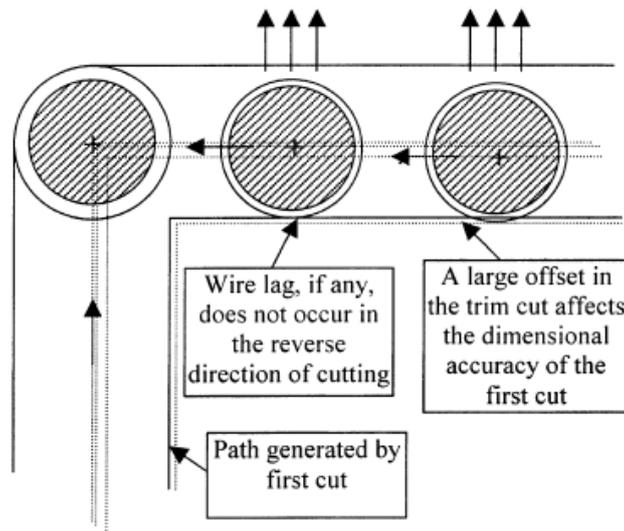


Figura 8. Efecto del retraso del hilo y el offset del hilo en el contorno generado en el corte. [Puri 2002].

En un extremadamente complicado proceso de mecanizado como es la Electroerosión por hilo, el cual está gobernado por más de diez factores de control, es muy difícil seleccionar la mejor combinación de parámetros para un caso particular que resulte de los requerimientos de los clientes. En el estudio de investigación se consideran simultáneamente todos los parámetros de control de la máquina para la operación de maquinado que incluye desbaste y acabado (primer corte y repaso).

El objetivo del estudio ha sido llevar a cabo una investigación experimental basada en el *Método Taguchi*, involucrando trece factores de control con tres niveles para un vector ortogonal. Se determinan los factores más influyentes para el criterio de maquinado dado, como: la velocidad media de corte, rugosidad superficial e imprecisión geométrica debido al retraso del hilo. Asimismo se han encontrado los ajustes óptimos de parámetros para diferentes situaciones de maquinado.

J.A. Sánchez et al. [Sánchez 2007] publican un artículo donde se presenta un estudio de la geometría de esquinas generada tras sucesivos cortes (desbaste y repasos). Se identifican los errores en diferentes zonas de la esquina (ver *Fig. 9*), y se relacionan con el material eliminado durante cada corte. La limitación de velocidad de corte permite un cierto control sobre la cantidad de material realmente eliminado por el hilo. Se discute asimismo, la influencia de diferentes aspectos, tales como el espesor de trabajo, el radio de esquina y el número de cortes de repaso.

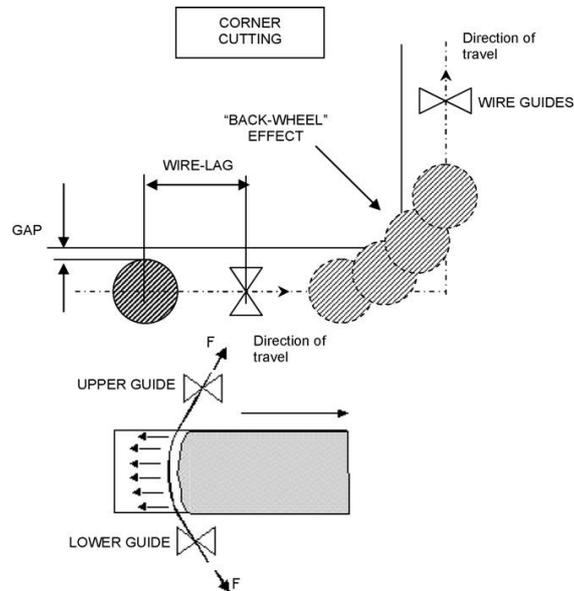


Figura 9. Influencia de la deformación del hilo en la precisión de esquinas: retraso del hilo y efecto "backweheel", [Sánchez 2007].

La principal conclusión es que el procedimiento de optimización de la precisión en esquinas debe considerar los errores generados por los cortes previos.

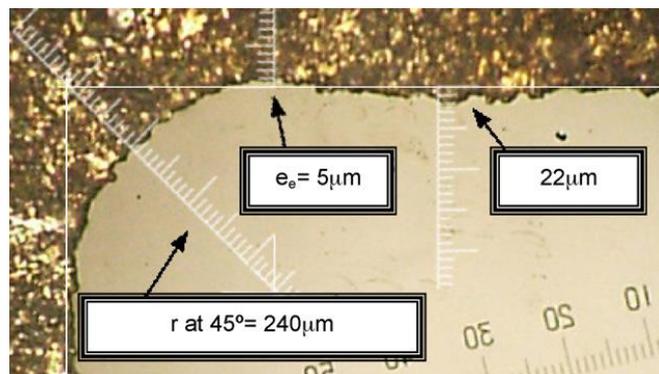


Figura 10. Acumulación de material después de la esquina, [Sánchez 2007].

W. Zhao *et al.* [Zhao 2013] presentan un documento en el cual se propone un innovador algoritmo de trayectoria de interpolación en WEDM, denominado “*Unit Generalized Arc Length Increment Method (UGALIM)*”.

En este método se toma la longitud generalizada del arco como un parámetro; las coordenadas X, Y, U y V son función de la longitud generalizada del arco. En cada periodo de interpolación, la longitud generalizada del arco aumenta con una unidad exacta básica de longitud (BLU), se acumulan las correspondientes componentes incrementales a lo largo de los ejes X, Y, U y V en sus propios acumuladores. Una vez que da un exceso en cualquiera de los acumuladores de primer orden de los ejes X, Y, U y V, el eje correspondiente se moverá una unidad BLU. La interpolación concluye cuando la longitud generalizada del arco interpolado alcance el valor predefinido. Se llevan a cabo una simulación numérica y una verificación de mecanizado. Con el método UGALIM se mecaniza una típica superficie reglada con un círculo en el plano superior y un cuadrado en el plano inferior (ver *Fig. 11*). el resultado demuestra la fiabilidad y ventajas de este nuevo método de interpolación.

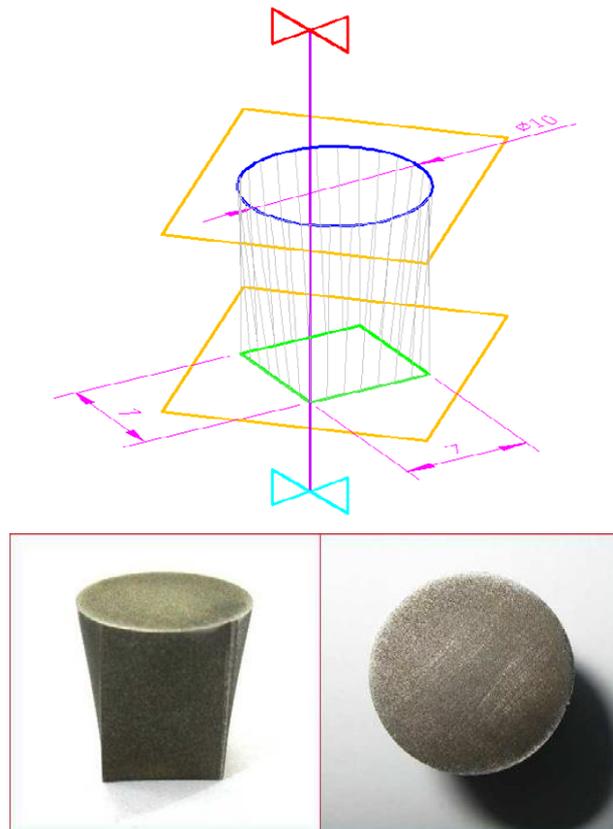


Figura 11. Superficie reglada mecanizada con el método UGALIM, [Zhao 2013].

K.H. Ho et al. [Ho 2004], revisan el vasto despliegue de trabajos de investigación llevados a cabo en el desarrollo y mejora de la Electroerosión por hilo (WEDM). En el mismo, se informa de la investigación en WEDM incluyendo la optimización de los parámetros de proceso, estimando la influencia de varios factores que afectan al mecanizado y la productividad.

El artículo también resalta la flexible monitorización y control del proceso, investigando la fiabilidad de diferentes estrategias de control a la hora de obtener las óptimas condiciones de mecanizado. Se ponen de manifiesto un amplio rango de aplicaciones industriales del proceso de Electroerosión por hilo (WEDM), junto con el desarrollo de los procesos de mecanizado híbrido.

Al final se discuten estos desarrollos y se resumen las posibles líneas de investigación en WEDM (ver Fig. 12).

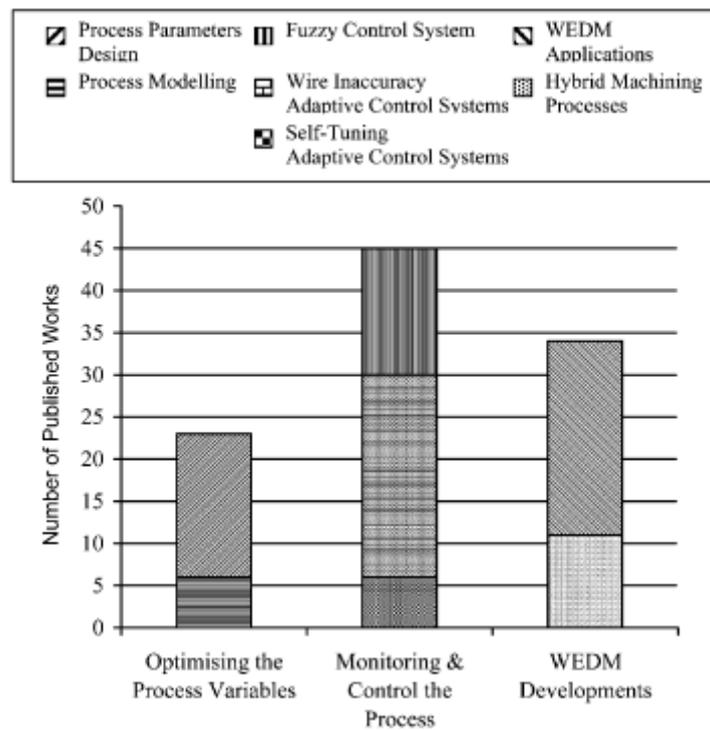


Figura 12. Distribución de las publicaciones de investigación en WEDM, [Ho 2004].

Y-S. Liao et al. [Liao 2004], presentan en su estudio, un nuevo sistema de estimación de la altura de la pieza de trabajo para máquinas de hilo iso-energéticas en WEDM. Basado en energía específica de descarga (*specific discharge energy, SDE*), se extrae un modelo matemático que relaciona altura de pieza, velocidad de corte y frecuencia de descarga mediante una constante proporcional. Esta constante llamada coeficiente de identificación del espesor (*thickness identification coefficient, TIC*), es buscada en función de la altura de la pieza. Por consiguiente, se propone un acercamiento

simplificado. Se toma el valor del TIC de una pieza de altura conocida, durante el proceso de WEDM. Se obtiene la altura de la pieza real, multiplicando el valor estimado por el factor de corrección de la altura de la pieza asociada.

Los resultados experimentales muestran que el sistema funciona satisfactoriamente. El error estimado de la altura de la pieza está dentro de 1 mm siendo el tiempo de respuesta de menos de 1 segundo generalmente. En la aplicación práctica del mecanizado de una pieza con variaciones dinámicas de espesor, se establece por adelantado un modelo relacionando el voltaje del servo y la altura de la pieza que conduce a una velocidad máxima de mecanizado. Se ajusta el velaje del servo de acuerdo a la altura estimada. Se concluye que el proceso se puede mantener muy estable a velocidad máxima de mecanizado sin que se rompa el hilo.

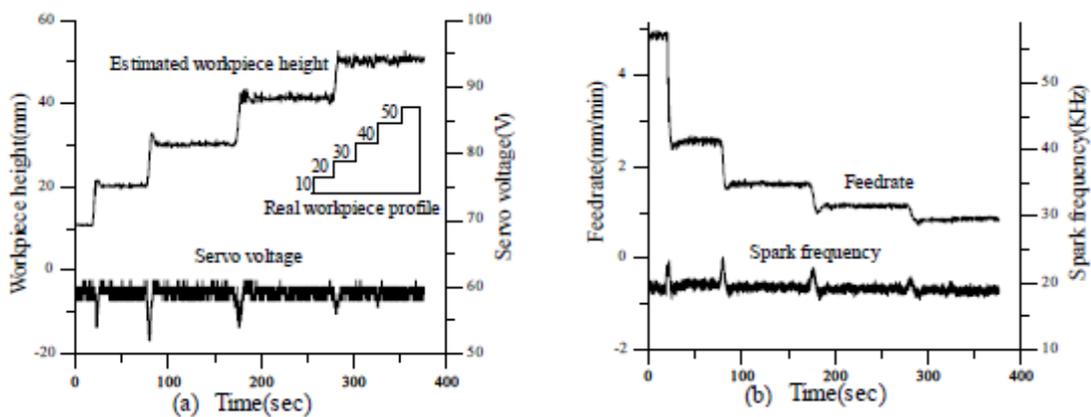


Figura 13. (a) Altura estimada de la pieza y su correspondiente valor de servo. (b) velocidad de corte y frecuencia de descarga cuando la altura de la pieza varía repentinamente de 10 a 50 mm, [Liao 2004].

3.4.4.2. ESTADO DEL ARTE EN RNA

Las Redes Neuronales Artificiales pueden resultar de gran utilidad en numerosos procesos de mecanizado con el fin de predecir diferentes resultados y reducir el número de ensayos (es decir, lo que se busca en el presente estudio), así como optimizando dichos procesos en general. A continuación se comentarán algunos estudios que hacen uso de Redes Neuronales Artificiales en diversos procesos de mecanizado, y más concretamente en EDM.

Azlan Mohd Zain et al. [Zain 2011] publican un estudio en el que se integran una Red Neuronal Artificial (RNA) y técnicas de Recocido Simulado, etiquetados como ANN-SA, con el fin de estimar los parámetros de proceso óptimos en el proceso no

convencional de mecanizado con chorro de agua abrasivo (*Abrasive Waterjet Machining, AWJM*) (ver Fig.14).

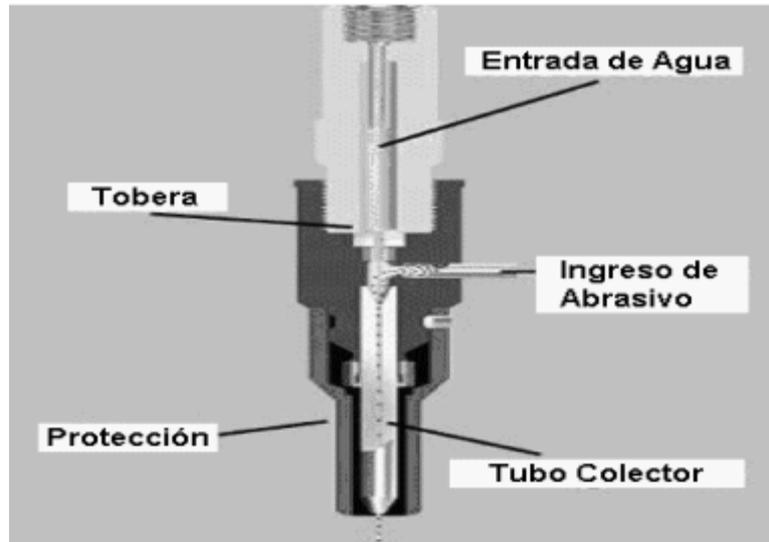


Figura 14. Partes de una tobera de un sistema AWJM, [Zain 2011].

Los parámetros que se consideran son la velocidad transversal, presión de la inyección, distancia de alejamiento, el tamaño de abrasivo y la tasa de flujo de abrasivo. Se asegura la calidad del corte del material mecanizado, observando la rugosidad media (R_a).

Se proponen los valores óptimos de los parámetros de proceso para obtener un mínimo valor de R_a . Es evidente que la ANN-SA integrada es capaz de dar menores valores de R_a con los parámetros de proceso óptimos recomendados, comparado con resultados experimentales y el modelado solo con la RNA (ANN).

El número de iteraciones para conseguir las soluciones óptimas decrece comparándolo con el modelo basado únicamente en la optimización de la SA.

J. Paulo Davim et al. [Davim 2007] desarrollan en su artículo, un modelo predictivo de la rugosidad superficial mediante una Red Neuronal Artificial (RNA), con el fin de investigar sobre los efectos de las condiciones de corte en el torneado de acero de mecanizado libre 9SMnPb28k (DIN). Se desarrolla el modelo de RNA de rugosidad superficial relacionando los parámetros R_a y R_t , con parámetros de corte como la velocidad de avance, velocidad de corte y profundidad de pasada. Se planifican los experimentos como un array ortogonal de L_{27} con tres niveles definidos por cada uno de

los factores con el fin de entrenar la RNA, contando para ello con el algoritmo de entrenamiento “*error back-propagation*” (EBPTA).

Se generan gráficas de superficie 3D (ver *Fig. 15*), para estudiar las interacciones de los efectos de las condiciones de corte en los parámetros de rugosidad superficial. El análisis revela que la velocidad de corte y la velocidad de avance tienen efectos significativos en la reducción de la rugosidad superficial, mientras que la profundidad de pasada tiene el menor efecto.

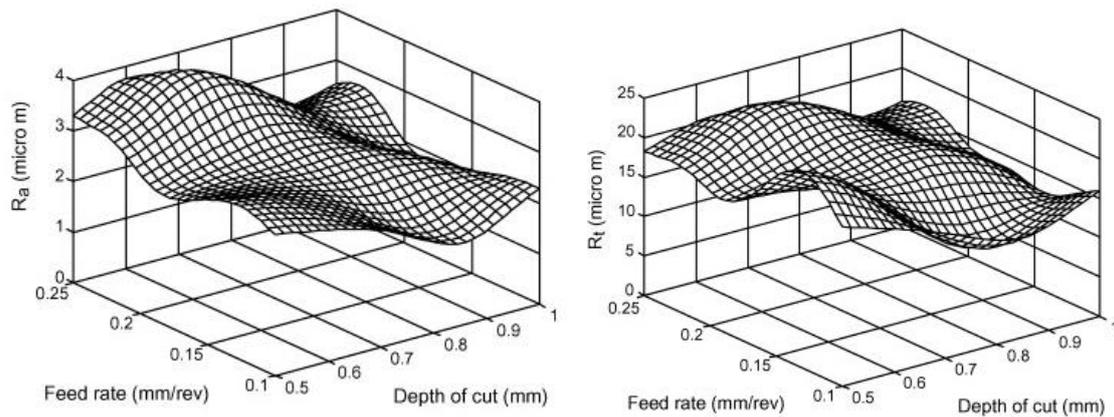


Figura 15. Efectos de interacción de la velocidad de avance y la profundidad de pasada en los parámetros de rugosidad superficial R_a y R_t , [Davim 2007]

Pragya Shandilya et al. [Shandilya 2013], publican un estudio en el cual describen, mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) y una RNA, el modelado matemático de la velocidad media de corte del composite de matriz metálico *SiCp/6061 Al*, durante el corte por WEDM.

Como parámetros de proceso de mecanizado se escogen el voltaje de servo (*SV*), tiempo de pulso (*TON*), tiempo de pausa (*TOFF*) y la velocidad de avance del hilo (*WF*). Se implementa una red neuronal del tipo back-propagation para establecer el modelo de proceso.

Se compara la actuación del modelo de RNA implementado, con modelos matemáticos de RSM de la velocidad media de corte. La comparación indica claramente que el modelo de RNA provee de mayor exactitud en la predicción, que los modelos RSM (ver *Fig. 16*).

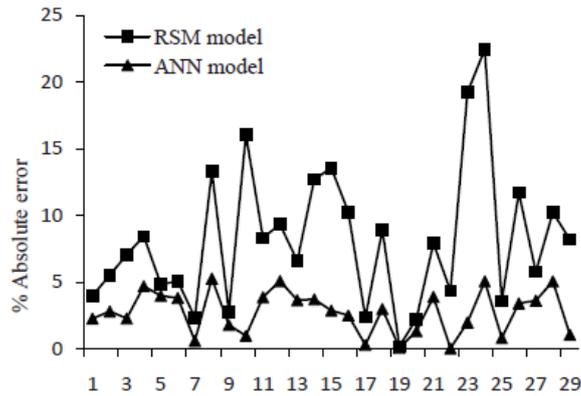


Figura 16. Comparación del error absoluto por ambos métodos, [Shandilya 2013].

Además los efectos combinados de los parámetros de entrada en la velocidad media de corte muestran que el voltaje del servo es un parámetro más significativo que el tiempo de pausa y la velocidad de avance del hilo.

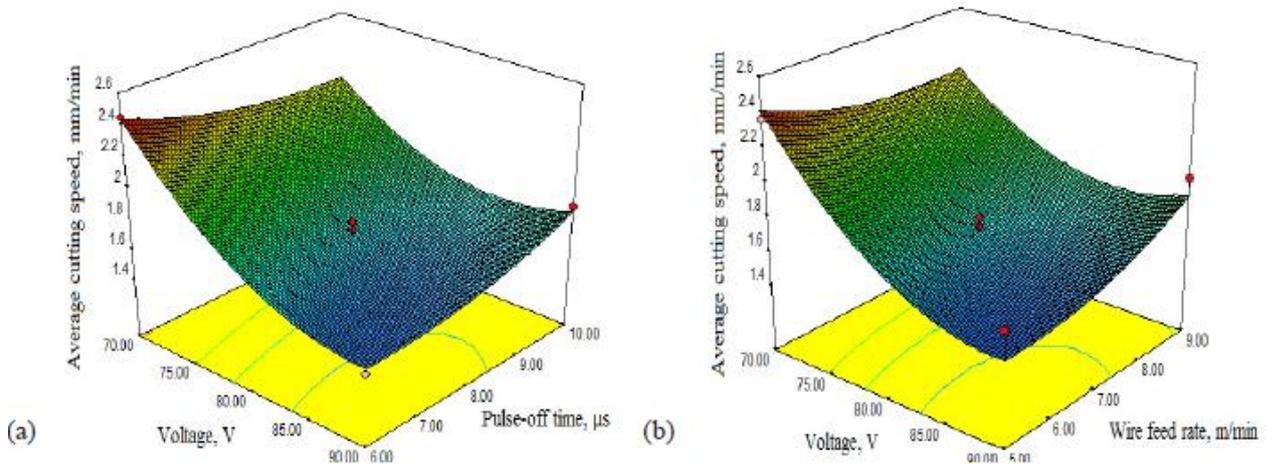


Figura 17. Respuesta superficial para la velocidad media de corte frente al voltaje y el tiempo de pausa (a), y velocidad de corte media frente al voltaje y la velocidad de avance del hilo (b), [Shandilya 2013].

Changtao Cai [Cai 2012], discute en su artículo la dificultad de construir un modelo matemático estricto en WEDM debido a la complicación del proceso de mecanizado y a la no linealidad de la relación entre los parámetros del proceso y los propósitos del mismo.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA), es adecuada para el modelado de sistemas complejos, puesto que tienen las características de auto-aprendizaje, auto-organización y memoria asociativa, así como elevada robustez. Por lo tanto, en este documento se hace uso de una RNA del tipo RBF (ver Fig.18), para modelar el proceso de mecanizado no convencional de Electroerosión por hilo (WEDM).

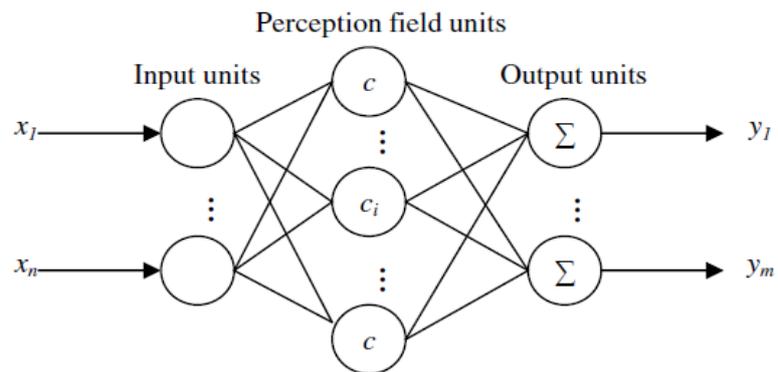


Figura 18. Estructura de una Red Neuronal Artificial del tipo RBF, [Cai; 2012].

3.5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

3.5.1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha explicado previamente, lo que se pretende a nivel global es optimizar el proceso de electroerosión por hilo (WEDM), siendo el objeto principal caracterizar el error con el fin de poder determinarlo, mediante un modelo predictivo con una RNA, para un espesor y radio cualesquiera.

Como se explicará y detallará de manera extendida en el apartado “3.6.2. Marco metodológico”, el procedimiento de medición de las probetas que se han ensayado (cortado), es mediante una Máquina de medir por coordenadas (MMC), (ver Fig. 1).



Figura 1. Máquina de medir por coordenadas de Zeiss.

Por lo tanto, se pueden plantear alternativas de estudio mediante dos enfoques o puntos de vista:

1. Enfoque práctico: las posibles opciones de medición de las probetas.
2. Enfoque de modelo predictivo: la caracterización del error en el proceso de corte de electroerosión por hilo, se puede realizar mediante otros métodos o con la ayuda de otras herramientas.

3.5.2. ENFOQUE PRÁCTICO

A continuación se explicarán las distintas alternativas que existen o que se podrían haber planteado a la hora de medir las probetas de ensayo.

3.5.2.1. Microscopio Óptico

Se trata de un microscopio óptico convencional que se encuentra en la sala de Metrología del Taller Mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao.

Este además presenta una cámara digital conectada al mismo con el fin de visualizar las muestras en un ordenador (ver Fig.2). El programa integrado permite almacenar imágenes digitales y secuencias de vídeo en un ordenador.

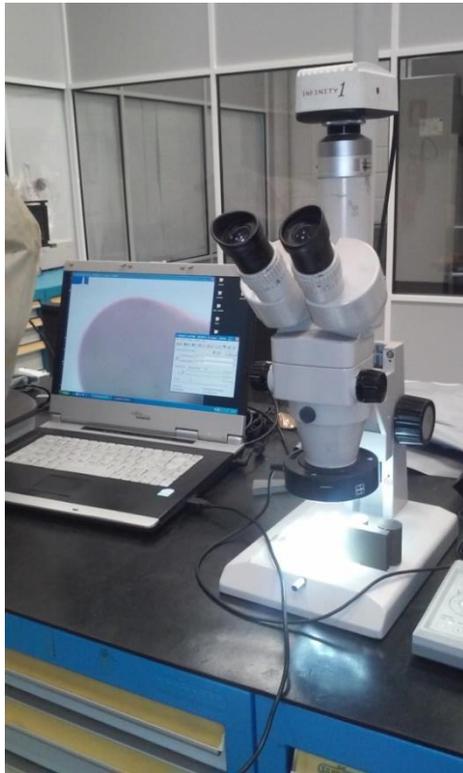


Figura 2. Microscopio óptico con cámara integrada.

Como se expondrá y justificará en el apartado “3.6.2. Marco metodológico”, se han cortado distintas probetas circulares, de distintos radios y en varios espesores, tal y como se resume en la Tabla 1:

Espesor (H) en mm	Radios (R) en mm
H40	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20
H70	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20
H100	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20

Tabla 1. Relación de espesores y radios de las probetas.

Debido a diversos problemas a la hora de medir las probetas de menor radio (1 y 1.5 mm), se descartaron a la hora de entrenar la RNA, (se explicará más adelante), con lo cual la probeta de menor radio es la de R3 mm. Para el estudio de alternativas se optó por hacer las diversas demostraciones de medida con la probeta de espesor H40 y radios 5, 9 y 12 (ver Fig.3), concretamente con el círculo de radio 5 mm.



Figura 3. Probeta de espesor 40 (H40) y radios 5, 9 y 12 mm.

Como se puede ver en la *Figura 4*, la probeta se dispone de tal manera que se vea el círculo en vista en planta, con el fin de tomar una fotografía adecuada.

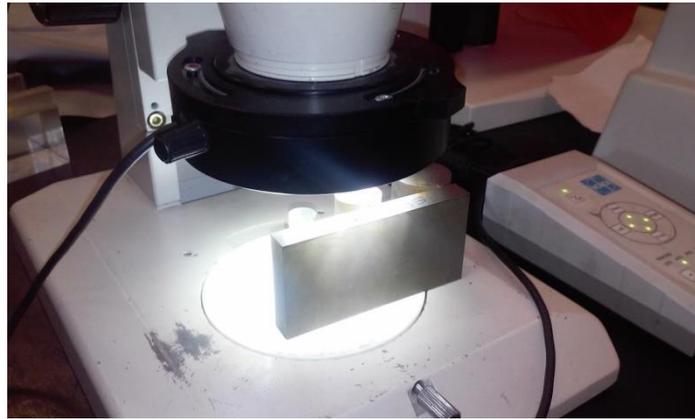
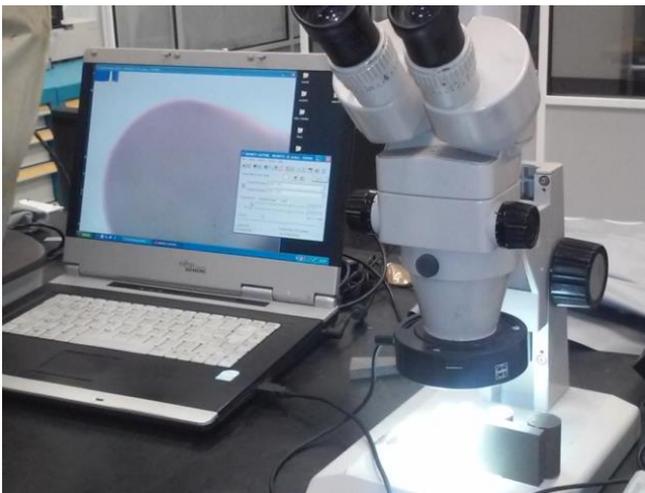


Figura 4. Disposición de la probeta en la base del microscopio óptico.

Sin embargo y tal y como se presupuso, se descartó de manera rotunda este método puesto que tal y como queda reflejado en las Figuras 4 y 5, los radios de las probetas que se cortaron son demasiado grandes para medirlos de esta manera, y el microscopio no termina de enfocar de manera nítida el radio que se muestra en dicha imagen (radio 5 mm).



Figuras 4 y 5. Fotografía del círculo de radio 5 mm.

La resolución de los microscopios ópticos está restringida por un fenómeno llamado difracción que, dependiendo de la apertura numérica (A_N) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada (λ), establece un límite definido (d) a la resolución óptica. Suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N} \quad (1)$$

Normalmente, se supone una λ de 550 nm, correspondiente a la luz verde. Si el medio es el aire, la A_N práctica máxima es de 0,95, y en el caso de aceite de hasta 1,5.

Para el caso de 10 aumentos (10x), que es con el aumento que se debería medir para que se viesen los círculos en su totalidad, la resolución es de 0,2 mm, la cual se aleja de la resolución requerida para la medición de las probetas que forman parte del estudio.

Además mediante este método, solo se podrían medir los círculos superior e inferior de las probetas y no los cilindros en sí mismos, es decir, no se tendría en cuenta el espesor de la probeta, y como ya se ha explicado en el apartado “3.4. Antecedentes”, el hilo en WEDM, durante el corte, pierde verticalidad y sufre un ligero pando el cual afectará a la forma de los círculos, y si lo que pretende es caracterizar el error en los mismos, este procedimiento de medición no tiene sentido alguno, por lo que sería la peor opción sin duda en cuanto al enfoque práctico de las alternativas de medición.

3.5.2.2. Proyector de perfiles

Se trata de un proyector de perfiles modelo PJ-H30 de *Mitutoyo* (ver Fig.6) que se encuentra en la sala de Metrología del Taller Mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao.



Figura 6. Proyector de perfiles PJ-H30 de Mitutoyo.

El proyector de perfiles es un instrumento de medición auxiliar básico, cuya función es medir dimensiones y formas, por amplificación óptica. Se utiliza cuando debemos realizar mediciones o ver detalles de elementos pequeños, no pudiendo utilizar los

elementos de medición habituales. Este instrumento puede ampliar en 50, 100 o 200 veces el tamaño de la pieza. En concreto el modelo *PJ H30* de *Mitutoyo* presenta una resolución máxima de $3\mu\text{m}$, que aun siendo una resolución buena para otras aplicaciones, se descarta para este trabajo.

Para la medición con este instrumento se realizan medidas directas por proyección del perfil. Además de las cabezas micrométricas para tomar medidas longitudinales, se pueden obtener también medidas angulares mediante una pantalla giratoria.

Posee dos sistemas de iluminación:

1. Sistema de Proyección: en el cual el haz luminoso cae sobre la pieza, proyectando su contorno en la pantalla.
2. Sistema de Reflexión: en el cual el haz luminoso cae sobre una cara plana y pulida de la pieza, reflejando su imagen en la pantalla.

En un proyector de perfiles es más común utilizar el Sistema de Proyección, al ser de mayor precisión que el Sistema de Reflexión (éste es usado generalmente en los microscopios).

Su principal uso es identificar un punto o borde en la sombra y desde este punto calcular una longitud. Ampliando la imagen, el operador cometerá la menor cantidad de errores, cuando decida dónde empieza un punto o un borde.

De esta forma, se procedió a la medición del círculo de radio 5mm de la probeta de la *Figura 3*, situando la misma de forma análoga a la medición efectuada en el microscopio óptico (ver Fig.7a).

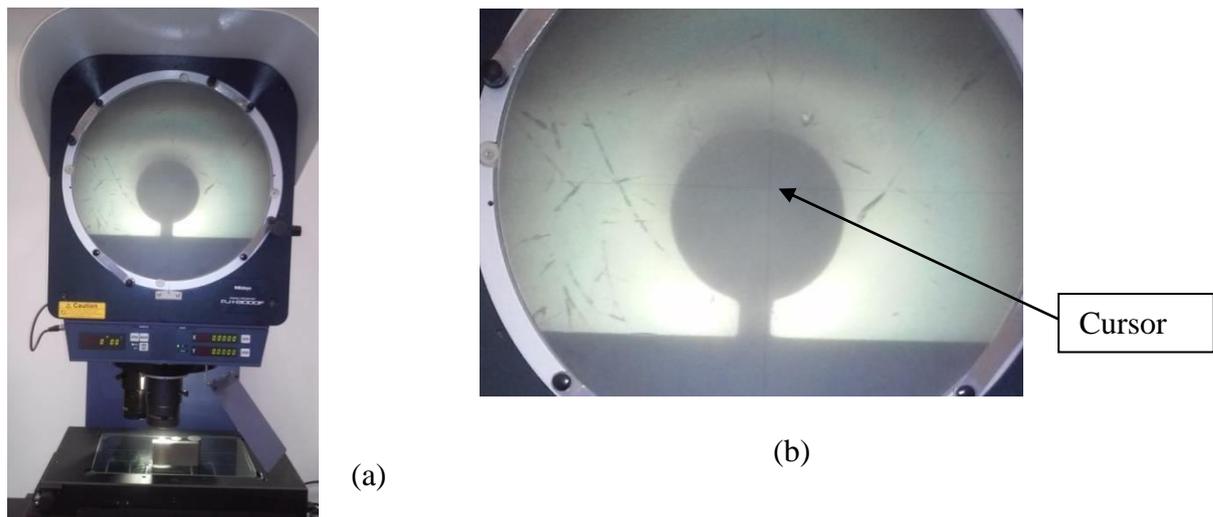


Figura 7. (a) Probeta colocada en proyector de perfiles y proyección del círculo de R5 mm. (b) Zoom en el que se aprecia el detalle del cursor.

Con la ayuda de las ruedas de desplazamiento X e Y de la mesa de apoyo, se desplaza la pieza y se dirige el cursor (ver Fig. 7b), hacia el borde exterior del círculo, con el fin de aproximarse con la mayor exactitud posible al borde mismo de tal manera que se tomen puntos de la circunferencia de la forma más precisa posible. Evidentemente con cuantos más aumentos se efectúe la medición, el error cometido al tomar el punto será menor.

Se van cargando los sucesivos puntos del borde de la circunferencia con la ayuda de un dispositivo electrónico como el que se ve en la *Figura 8*, mediante el cual se pueden tomar numerosos puntos de la misma, y que una vez se hayan cargado todos ellos, se calcula el radio de la circunferencia mediante el *método de la flecha*.



Figura 8. Dispositivo de toma de puntos del proyector de perfiles.

El *método de la flecha* es una técnica que permite medir el radio de una circunferencia con un proyector de perfiles. El método consiste en la obtención de los valores de la cuerda (c) y la flecha (f) de una circunferencia o sector circular. Estos valores se determinarán a partir de las coordenadas de los puntos A, B, y de la tangente T, indicados en la *Figura 9*.

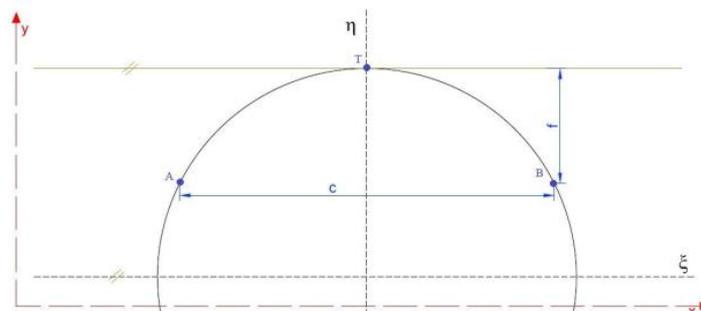


Figura 9. Método de la flecha.

Mediante este método y con las coordenadas de cada punto tomado con el proyector, se obtiene el radio real para cada punto. Y con ello ya se dispondría de gran parte de la información necesaria para entrenar la RNA (ver apartado “3.6.2. Marco metodológico”).

Sin embargo este procedimiento no es nada adecuado debido a varias razones:

- Como se ha explicado en el anterior apartado “3.5.2.1. Microscopio óptico”, lo que se pretende es caracterizar el error en todo el espesor de cada cilindro, ya que el hilo de la máquina de WEDM pierde verticalidad durante el proceso de corte, y ésta afecta a la forma final del cilindro, con lo cual el radio real de cada punto tomado no será el mismo en todo el espesor de la probeta, y con este método solo es posible tomar puntos de las caras superior e inferior de las probetas.
- Se trata de un procedimiento costoso a nivel humano, puesto que los puntos se han de tomar desplazando el cursor a lo largo de todo el borde de la circunferencia, lo cual requiere numerosas horas de trabajo teniendo en cuenta el número de probetas y radios en cada una.
- La imprecisión o error cometido a la hora de tomar cada punto, es considerablemente alta en los radios más grandes, ya que debido a sus características geométricas no es posible efectuar la medición con demasiados aumentos. Además, como ya se ha comentado, la resolución del proyector no es la más adecuada para este estudio.

Por consiguiente y debido fundamentalmente a estas tres razones, se descartó medir las probetas mediante un proyector de perfiles.

3.5.2.3. Microscopio con tecnología confocal.

La microscopía láser confocal es una técnica de observación microscópica que está logrando excelentes resultados en diversas ramas de la ciencia (medicina, biología, materiales, geología, etc.) Su éxito se debe a las indudables ventajas que ofrece frente a la microscopía óptica tradicional (imágenes de mayor nitidez y contraste, mayor resolución vertical y horizontal, etc.) y, sobre todo, a la posibilidad de obtener "secciones ópticas" de la muestra, lo que permite su estudio tridimensional.

El principio de la microscopía confocal se basa en eliminar la luz reflejada o fluorescente procedente de los planos fuera de foco (ver *Fig. 10*). Para ello se ilumina una pequeña zona de la muestra y se toma el haz luminoso que proviene del plano focal, eliminándose los haces procedentes de los planos inferiores y superiores.

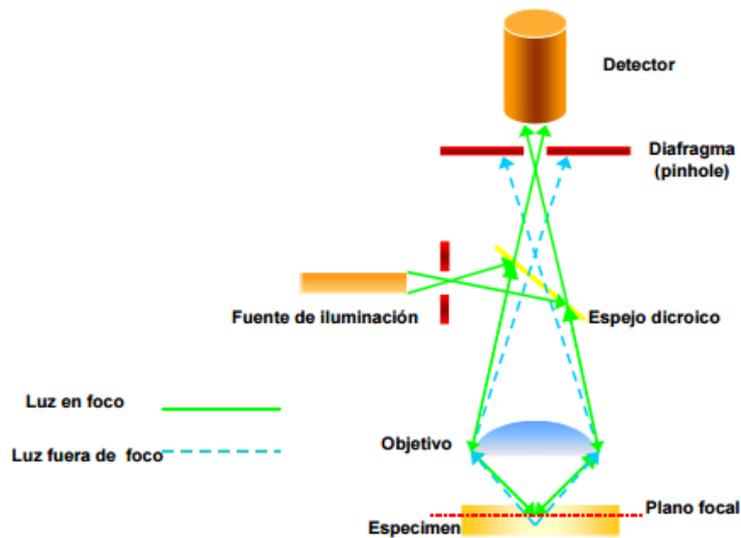


Figura 10. Esquema del principio de microscopía confocal.

Para el estudio de esta alternativa de medición se utilizó Un microscopio confocal *Leica DCM 3D*, como el que se muestra en la *Figura 11*.



Figura 11. Microscopio confocal Leica DCM 3D.

El sistema *DCM 3D* combina la tecnología confocal con la interferometría para realizar mediciones a alta velocidad con una excelente resolución de hasta $0,1 \mu\text{m}$, que se trata de una resolución excelente para este estudio.

Este microscopio presenta la posibilidad de realizar una fotografía 3D del contorno de los cilindros que forman la probeta, es decir de captar una imagen topográfica de la misma dentro de las limitaciones de aumento del objetivo elegido (*opción 1*), o tomar un conjunto de imágenes extendidas que logren reproducir de manera amplificada el perfil de uno de los círculos por ejemplo (*opción 2*). Dependiendo de una opción u otra de medición, se coloca la probeta de una manera u otra tal y como queda reflejado en las Figuras 12 (a) y (b):



(a)

(b)

Figura 12. (a) Disposición de probeta en caso de medición con opción 2. (b) Disposición de probeta en caso de opción 1.

La opción 1 de medida (*Fig12b*), quedó descartada debido a que los radios de círculos son demasiado grandes para una captura de topografía 3D. Sin embargo la opción 2 sí que es viable, pero quedó descartada puesto que operativamente es muy costosa ya que la imagen capturada por el microscopio (*ver Fig13*) se debe exportar como imagen rasterizada a un programa de CAD (por ejemplo *Unigraphics NX 9.0*), y en éste medir los puntos del contorno para averiguar el radio real.

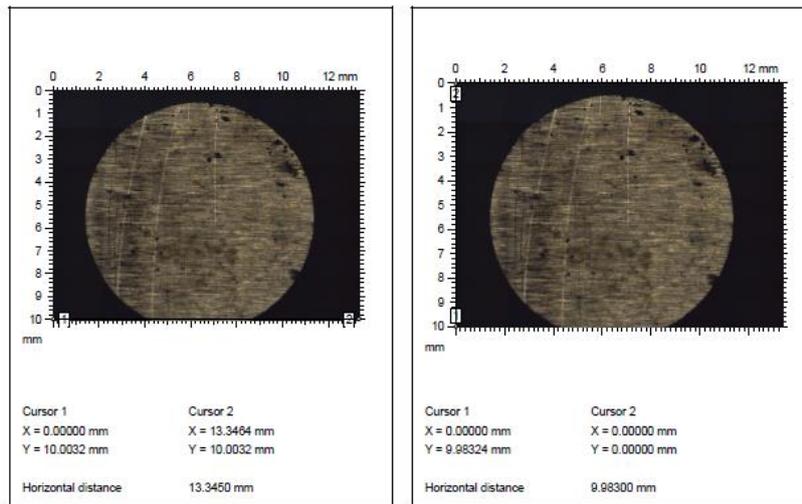


Figura 13. Imagen tratada mediante el software del microscopio confocal.

A continuación se presenta una tabla resumen con las tres alternativas de medición y varias variables tenidas en cuenta a la hora de valorar cada opción. Cada variable se ha valorado con un número del 1 al 3, siendo 3 la mejor opción y 1 la peor.

	Microscopio óptico	Proyector de perfiles	Microscopio Confocal
Resolución	1	2	3
Facilidad de medida	3	1	2
Error ojo humano	2	1	3
Tiempo de medición	3	2	2
Post-medición	1	3	2
Tratamiento de imágenes	1	3	2
NOTA GLOBAL	10	9	12

Tabla 2. Valoración de las alternativas de medición.

3.5.3. ENFOQUE DE MODELO PREDICTIVO

En este apartado se pretende realizar un estudio de las alternativas existentes en cuanto a la predicción del error en el proceso de corte de electroerosión por hilo (WEDM).

Un modelo predictivo podría definirse como una representación matemática de un aspecto de la realidad que permite predecir comportamientos futuros en función del

conocimiento presente. En este caso se ha optado por la implementación de una Red Neuronal Artificial (RNA) como modelo predictivo con el fin de caracterizar el error en trayectorias circulares en WEDM.

Caracterizar el error, en definitiva, se trata de ver qué forma o desviaciones respecto a las nominales presentan las probetas con geometría circular cortadas mediante electroerosión por hilo. Como se ha comentado, resultaría muy costoso, tanto a nivel humano como económico cortar los espesores y radios nominales requeridos habitualmente por los medios investigadores, como sería en este caso el grupo de I+D de la empresa ONA ELECTROEROSIÓN; es decir, para ver las desviaciones geométricas de una geometría determinada, como en este caso la circular, se deberían cortar probetas en espesores de 10 mm, 20, 30, 40... y así hasta 100 mm, y todos ellos en radios que fuesen desde 1mm, 2,3,4... hasta 20 mm (valores habituales de espesores y radios ensayados en la industria investigadora en electroerosión por hilo), en definitiva un número elevado de probetas ($\approx 10 \times 20 = 200$), con el consiguiente gasto de tiempo y material.

Por ello, como ya se ha explicado, es por lo que se ha optado por la implementación de una *Red Neuronal Artificial (RNA)* que minimice significativamente el número de ensayos. Al ser el objetivo final del Trabajo la caracterización del error, una RNA resulta la mejor opción, para no tener que realizar el número de ensayos que sería necesario en caso de no contar con dicha herramienta. Como ya se ha explicado, en líneas generales, la RNA se ha entrenado mediante los resultados de las mediciones del número reducido de probetas cortadas, con el fin de que esta misma prediga el error para cualquier combinación de espesor y radio no cortados. Se ha considerado por tanto que una RNA era la mejor opción para realizar este modelo predictivo debido a las características propias de las Redes Neuronales Artificiales:

- **Aprendizaje:** Las RNA tienen la habilidad de aprender mediante una etapa que se llama *etapa de aprendizaje*. Esta consiste en proporcionar a la RNA datos como entrada a su vez que se le indica cuál es la salida (respuesta) esperada.
- **Auto-organización:** Una RNA crea su propia representación de la información en su interior, quitándole esta tarea al usuario.
- **Tolerancia a fallos:** Debido a que una RNA almacena la información de forma redundante, ésta puede seguir respondiendo de manera aceptable aun si se daña parcialmente.
- **Flexibilidad:** Una RNA puede manejar cambios no importantes en la información de entrada, como señales con ruido u otros cambios en la entrada (por ejemplo si la información de entrada es la imagen de un objeto, la respuesta

correspondiente no sufre cambios si la imagen cambia un poco su brillo o el objeto cambia ligeramente).

- **Tiempo real:** La estructura de una RNA es paralela, por lo cual si esto es implementado con computadoras o en dispositivos electrónicos especiales, se pueden obtener respuestas en tiempo real.

Una posible alternativa a la solución adoptada, sería la utilización de modelos estadísticos predictivos como la regresión múltiple, el análisis discriminante o la regresión logística.

La **regresión lineal múltiple** trata de explicar el comportamiento de una determinada variable (en este caso podría ser el radio real de un determinado círculo de la probeta), en función de un conjunto de variables explicativas (en el caso de este trabajo podrían ser el espesor, radio real y plano de medición de cada probeta), mediante una relación de dependencia lineal.

El **análisis discriminante** es un modelo de predicción de una variable respuesta categórica (variable grupo) a partir de p variables explicativas generalmente continuas (variables clasificatorias).

La **regresión logística** es un tipo de análisis de regresión utilizado para predecir el resultado de una variable categórica (una variable que puede adoptar un número limitado de categorías) en función de las variables independientes o predictoras.

Existen diversos trabajos y estudios que comparan modelos estadísticos y redes neuronales como modelos predictivos, entre ellos cabe citar: “*Redes neurales vs modelos estadísticos: Simulaciones sobre tareas de predicción y clasificación*” escrito por Alfonso Pitarque, Juan Francisco Roy y Juan Carlos Ruiz (Universitat de València) en el que se comparan mediante simulación redes neuronales (del tipo perceptrón multicapa) con modelos estadísticos (regresión múltiple, análisis discriminante y regresión logística) en tareas de predicción y clasificación (binaria o no binaria), manipulando los patrones de correlación existentes entre los predictores (o variables de entrada) por un lado, y entre predictores con el criterio (variable de salida) por otro.

Los resultados muestran que en tareas de predicción redes neurales y modelos de regresión múltiple tienden a rendir por igual. Por contra en las tareas de clasificación en todo tipo de condiciones las redes neurales rinden mejor que los modelos estadísticos de análisis discriminante y regresión logística.

En el caso del presente Trabajo, que tiene como pretensión predecir el error en el corte de probetas con geometría circular, y teniendo en cuenta las conclusiones del estudio citado en el párrafo anterior, bien se podría haber hecho uso de uno de los modelos

predictivos estadísticos anteriormente citados, sin embargo se ha optado por la utilización de una RNA debido a su flexibilidad para adaptarse a diversos cambios en los parámetros de entrada y a la mayor facilidad de aprendizaje en cuanto al entrenamiento de la misma. Además tal y como se ha explicado en el apartado “3.4. *Antecedentes*”, no existen demasiados estudios de la optimización del proceso de WEDM mediante la aplicación de una RNA, luego se ha tenido en cuenta la componente innovadora.

3.6. SOLUCIÓN ADOPTADA

3.6.1. MARCO TEÓRICO

3.6.1.1. LA ELECTROEROSIÓN

Introducción

Si se hace pasar una corriente eléctrica continua a través de un material conductor de electricidad, un metal por ejemplo, el movimiento de los electrones libres, característico de la corriente eléctrica, no producirá ninguna modificación aparente en el estado del metal. Si se aumenta la intensidad de la corriente o si se disminuye la sección de la barra o del hilo por los que pasa dicha corriente, se observará un calentamiento del metal que podría alcanzar incluso temperaturas de fusión y hasta de evaporación.

Una de las características esenciales de esta acción de la corriente eléctrica es que actúa sobre todo el volumen del metal y no permite ninguna concentración preferencial de sus efectos en un lugar determinado de la masa metálica.

Sin embargo, si se limita en el espacio y en el tiempo dicho fenómeno del calentamiento como consecuencia del paso de corriente eléctrica por un conductor, se puede producir el efecto de un impacto en el momento de su aplicación.

Hay una analogía que se impone por sí misma: aplicando una presión mecánica uniformemente repartida sobre un bloque de mármol por ejemplo, al aumentar dicha presión se acabaría por romper el bloque.

Ahora bien, por medio de un martillo y un cincel, se puede ir tallando el mármol y darle una forma, sin correr el riesgo de alterar su estructura interna o de afectar al resto del volumen. Además, variando la energía de los impactos se puede variar el volumen unitario arrancado, pudiéndose así obtener superficies talladas con rugosidades diferentes.

Transportando esta analogía al campo de la acción de la corriente eléctrica, es evidente que si se quiere utilizar dicha corriente como medio de mecanizado, esta deberá ser utilizada bajo forma de descargas muy breves y concentradas, para obtener una destrucción localizada del metal.

Pero se plantea el problema de cómo obtener estos impulsos de corriente, y cómo dirigirlos al punto preciso.

Si bien teóricamente esta analogía parece simple y lógica, la posibilidad de su realización práctica no se presenta de una forma tan obvia y exige una búsqueda de soluciones esenciales que permitan conseguirlo.

Historia de la electroerosión.

Desde que la electricidad comenzó a dar sus primeros pasos se observó el efecto destructivo producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos en el momento de su separación.

Este efecto incitó a numerosos científicos a profundizar en su investigación, con el fin de evitarlo, y ello, unido a una necesidad de la época de buscar un método nuevo de mecanizado diferente a los convencionales que utilizaban herramientas mecánicas, llevó a la idea de utilizar el citado efecto destructivo como método de reproducción de formas.

En 1943, en plena segunda guerra mundial, y dada la escasez de oro y cobre, los científicos soviéticos B.R. y N.I. LAZARENKO investigaban en la búsqueda de materiales que pudieran sustituirlos como contactos de potencia.

Los Lazarenko establecieron un plan de pruebas para comprobar la influencia de determinados parámetros en el desgaste de los contactos mediante descargas de condensadores.

Un joven científico de su equipo, B.N. Zolotykh, fue encargado de realizar tal tarea con los Lazarenko y fue quien publicó el 23 de Abril de 1943 el primer artículo sobre la electroerosión: "Sobre la inversión del efecto de la erosión eléctrica".

Si bien su mayor interés investigador era cómo minimizar el efecto de las descargas, se percataron de que bajo ciertas condiciones el desgaste se maximiza, lo que les llevó a pensar en utilizar esta técnica como una nueva tecnología para el arranque de material.

Para ello, pusieron a punto el primer circuito generador de descargas erosivas, también conocido como "circuito Lazarenko", y desde entonces se ha denominado con la palabra "ELECTROEROSIÓN" a esta nueva técnica de mecanización de los metales.

La característica más importante de la electroerosión es la posibilidad de erosionar cualquier tipo de material conductor, independientemente de su dureza, ya que los factores que influyen en los resultados no son los puramente mecánicos como dureza, tenacidad, etc. sino los térmicos como conductividad térmica, temperatura de fusión, etc.

Junto a esta característica, hay que citar la capacidad de reproducir la forma del electrodo-herramienta, que en adelante serán llamados tan sólo "electrodo", lo cual supone una gran ventaja para el caso de piezas de formas complicadas.

Desde entonces, la historia de la electroerosión ha estado jalonada por una serie de avances que, si bien, no suponían en sí mismos nada más que actualizaciones tecnológicas, por el contrario se han ido desvelando como avances fundamentales que han permitido que el campo de aplicaciones haya ido aumentando fuertemente.

De este modo, parece ser que no sería muy descabellado hablar de “revoluciones tecnológicas” o “grandes hitos tecnológicos” cuando se haga referencia a tales avances de la electroerosión.

Dentro de este contexto, habría que situar el primer gran hito en el origen mismo de la electroerosión, ya que supuso el poder mecanizar materiales duros como los aceros templados o los carburos de tungsteno.

Las primeras máquinas de electroerosión que aparecieron hacia los años 1948-1950, eran básicamente máquinas-herramienta convencionales, tales como taladros, etc. que habían sido transformadas parcialmente para las necesidades de la electroerosión, adaptándoles un generador, un tanque de trabajo, etc.



Figura 1. Primera máquina ONA d electroerosión (1956)

Pero fue a mediados de la década de los 50 cuando aparecieron en el mercado las primeras máquinas de electroerosión concebidas como tales, siendo alguna de sus aplicaciones iniciales la destrucción de brocas y machos rotos en piezas.

Los primeros generadores que existieron, denominados de relajación, producían un gran desgaste de los electrodos, del orden del 100% en volumen, pero esto no fue impedimento para que los sectores industriales se fijasen en la naciente tecnología.

Al igual que los avances de la electrónica tuvieron su influencia en otras áreas de la tecnología, el poder sustituir los generadores de relajación por los transistorizados, supuso para la electroerosión el segundo gran hito, cosa que ocurrió hacia inicios de los 60.

De hecho, la reducción de los índices de desgaste de los electrodos a niveles del 0.5% en volumen, consecuencia directa del uso de los generadores transistorizados, abrió las grandes puertas de la industria del molde, matricería, forja, etc.

El efecto en los índices de producción de máquinas de electroerosión fue inmediato, y la tecnología de la electroerosión se convirtió en un sistema de mecanizado fundamental frente a los hasta entonces existentes.

De este modo, desde entonces comenzó a extenderse el concepto de “métodos no convencionales” para referirse a la electroerosión frente a los “métodos convencionales” diferenciación que todavía hoy perdura.

Hasta esas épocas, la única electroerosión conocida era la penetración, y su aplicabilidad en el mercado era un hecho real y ampliamente aceptado.

Es entonces, hacia finales de los 60 y comienzos de los 70, cuando surge la idea de desarrollar la tecnología de las máquinas de electroerosión por hilo, hecho que debería ser considerado como el tercer gran hito de la electroerosión.

Si bien, este avance podría ser fijado en una fecha concreta, la evolución que ha afectado a las máquinas de electroerosión por hilo se ha prolongado a lo largo de dos décadas, y es hacia comienzos-mediados de la década de los 90, cuando se aprecia una identificación masiva entre los usuarios y la electroerosión por hilo, haciendo que los índices de producción de estas máquinas lleguen a igualar y hasta a superar a los de las máquinas de electroerosión por penetración.

Quizá uno de los factores de triunfo de la electroerosión por hilo frente a la penetración haya sido el que los usuarios la han aceptado de tal forma que, ya desde hace muchos años, conciben los moldes y utillajes pensando en que serán producidos por electroerosión por hilo, y los factores positivos de esta tecnología lo han hecho el resto.

Si bien la electroerosión por hilo se ha desarrollado gracias a la evolución de la electrónica y, más concretamente, a los controles numéricos, estos desarrollos tecnológicos también han tenido su influencia en la electroerosión por penetración. En

efecto, puede cifrarse en los inicios de la década de los 80 el comienzo del cuarto gran hito de la electroerosión que es el que liga a la tecnología de los CNC con la electroerosión por penetración.

Un factor importante para la electroerosión por penetración fue la aplicación de la función orbital, que consiste en desplazar a la pieza paralelamente a sí misma a lo largo de una circunferencia en cuyo centro se encuentra el electrodo, el cual o bien está quieto en su posición o bien está animado de un movimiento según el eje Z.

La gran ventaja de poder animar a la mesa de un movimiento orbital fue que con dicho movimiento se puede compensar la diferencia de medidas existentes entre los “gap” de desbaste y acabado, lo cual supone que con uno o dos electrodos es posible realizar la erosión completa, tanto en desbaste como en acabado.

Otra de las ventajas importantes en el método de trabajo al utilizar el dispositivo orbital, fue que el dimensionamiento de los electrodos ya no era tan crítico, ya que aún en desbaste se puede orbitar para llegar a una medida deseada.

El movimiento orbital supuso además un cambio fundamental en el proceso de la erosión en régimen de acabado, redujo en gran medida los tiempos de acabado y simplificó considerablemente la limpieza de la zona de trabajo.

Al igual que en la máquinas de hilo, la revolución tecnológica de los CNC en las de penetración supone más un nuevo modo de trabajar que un avance puntual, y la evolución, que este avance ha supuesto en las máquinas de electroerosión por penetración, fue tan importante que al cabo de poco más de una década (a comienzos de los 90) prácticamente la totalidad de las máquinas producidas por los fabricantes de primera línea ya eran de control numérico.

Pero es más, la importancia radica en que no sólo es que las máquinas estén equipadas con CNC, sino que éste ha pasado a ser parte imprescindible del proceso de mecanizado. Este cuarto gran hito de la electroerosión ha permitido aparecer en el mercado un nuevo concepto de máquina, el centro de erosionado, que representa a la máquina totalmente automatizada, y equipada de sistemas de intercambio de electrodos y piezas para permitir largos periodos de trabajo en modo inatendido.

Si bien la aparición de nuevos avances tecnológicos, tales como el mecanizado a alta velocidad, a finales de la década de los noventa ha supuesto una clara competencia a la electroerosión en algunos campos de aplicación muy concretos, de lo que se podría deducir una reducción en su aplicación, sin embargo, la influencia no es tan clara y el debate entre el grado de competencia todavía seguirá, posiblemente, abierto durante la primera década del siglo XXI.

Pero, por otra parte, la evolución tecnológica ha aportado nuevos materiales, tales como los diamantes policristalinos, las cerámicas, los composites de matriz metálica, etc.,

cuyo mecanizado por electroerosión puede abrir nuevos e interesantes campos de aplicación.

Por último, no conviene olvidar la evidentemente previsible progresiva implantación, desde finales de los 90, de las microtecnologías, en las cuales la electroerosión jugará un papel de gran importancia.

3.6.1.2. LA ELECTROEROSIÓN COMO PROCESO DE MECANIZADO

Definición

Se podría definir el proceso de electroerosión como el método de arranque de material por medio de descargas eléctricas controladas, que saltan, en un medio dieléctrico, entre un electrodo (herramienta de trabajo) y la pieza a mecanizar.

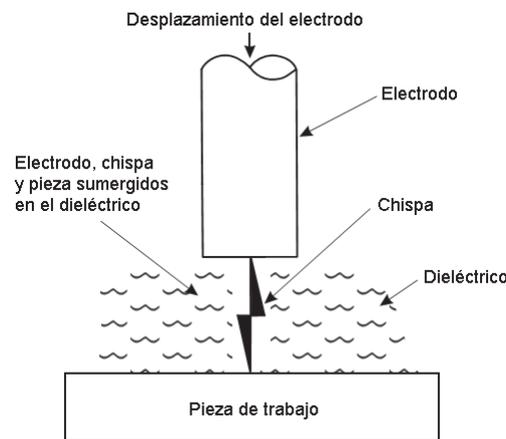


Figura 2. Representación esquemática del proceso.

La duración de la chispa es muy corta, pues suele variar desde 1 ó 2 microsegundos a 2 milisegundos, según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados.

Esto supone una concentración del efecto térmico en un volumen muy reducido de material, ya que la rapidez de la chispa no es favorable a la propagación del calor por conducción a través de todo el volumen de la pieza, dando como resultado la fusión e incluso evaporación de dicho volumen de material.

Al añadir a esto los efectos dinámicos de la propia descarga y del medio dieléctrico, se obtiene en la pieza un cráter de forma semiesférica, cuyo volumen depende de factores

tan diversos como la energía y la duración de la descarga, la naturaleza del dieléctrico y, las propiedades físicas, la polaridad y la naturaleza del material del electrodo y de la pieza.

Experiencias prácticas han demostrado, desde los orígenes, que los efectos de la chispa cuando el dieléctrico es líquido (aceites) son mayores que cuando las descargas se producen en un medio gaseoso.

Este resultado es completamente lógico pues la descarga en un gas tiende a ramificarse ampliamente (Fig. 3) mientras que el líquido comprime la descarga impidiendo que se ramifique, concentrándose así su efecto sobre la pieza.



Figura 3. Descarga ramificada en un medio gaseoso.

También ha sido la práctica la que ha demostrado la importancia de que el medio que se encuentra entre el electrodo y la pieza sea dieléctrico, para que la descarga se produzca en forma de avalancha, dando lugar a efectos más rentables.

Explicación física del proceso: fases de descarga.

A diferencia de los procesos convencionales de mecanizado en los que el mecanismo de arranque es de naturaleza fundamentalmente mecánica, implicando fenómenos de cizalladura o fenómenos abrasivos en la mayor parte de los casos, en el caso de la electroerosión el arranque es debido a la presencia de descargas eléctricas controladas. Como consecuencia se produce una combinación de fenómenos térmicos, mecánicos e incluso electroquímicos según algunos autores, que resulta en un arranque localizado de material.

Aunque no hay una teoría definitiva sobre el modo de arranque, los distintos autores sí están de acuerdo a la hora de identificar las etapas presentes en el desarrollo de la descarga, cada una de las cuales tiene una duración del orden de micro o milisegundos.

Las etapas que se describen a continuación se corresponden con la evolución del campo eléctrico en el gap, a su vez gobernado por la tensión, la intensidad y la resistencia eléctrica en el canal de descarga

Etapa 1 (Fig. 4 izda.): se establece una diferencia de potencial entre electrodo y pieza y se crea un campo eléctrico que alcanza su mayor intensidad en el punto de menor resistencia, que puede darse bien donde el gap toma el menor valor debido a la presencia de rugosidades locales tanto en el electrodo como en la pieza, o bien donde la resistividad del fluido es mínima debido a efectos locales tales como la presencia de partículas conductoras en suspensión. En ese punto comienza a establecerse el canal de descarga.

Etapa 2 (Fig. 4 centro): como consecuencia de la aplicación del campo eléctrico comienza la ionización en el canal de descarga de las moléculas del dieléctrico inicialmente neutras, lo cual trae como consecuencia la pérdida de resistencia del fluido en ese punto. Este fenómeno es progresivo, de manera que en el instante representado en la figura, aunque la resistencia en el canal ha disminuido, aún no es suficientemente alta como para que salte la chispa.

Etapa 3 (Fig. 4 drcha.): en esta etapa la resistencia eléctrica en el canal cae lo suficiente como para que comience la descarga. Se inicia el paso de corriente acompañado por una caída en la diferencia de potencial

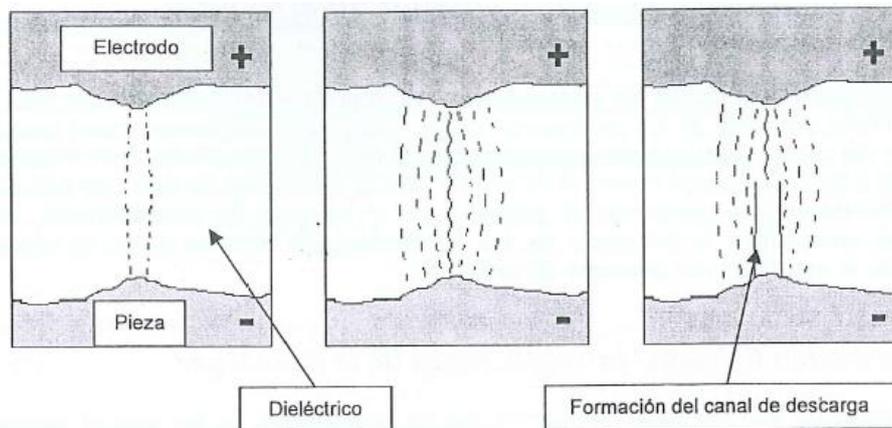


Figura 4. Ionización e inicio de la ruptura del dieléctrico.

Etapa 4 (Fig. 5 izda.): cae el voltaje, crece la intensidad y la energía térmica asociada a la chispa sublima o vaporiza todo lo que encuentra a su paso: material de la pieza, material del electrodo y fluido dieléctrico. Aunque no se pueden dar valores exactos, diversos autores sitúan la temperatura instantánea en el punto de aplicación de la chispa entre los 8000 y los 12000 K. Como consecuencia el canal de descarga queda envuelto en una burbuja de gases. Ha comenzado el arranque de material tanto en la pieza como en el electrodo aunque aún no ha alcanzado su máximo.

Etapa 5 (Fig. 5 centro): la tensión y la intensidad comienzan a estabilizarse mientras se produce un importante aumento de la temperatura y de la presión de burbuja de gases

que se ha creado, efectos que favorecen el paso directo a estado vapor de material sólido (sublimación) y el arranque mecánico de partículas sólidas tanto de la pieza como del electrodo. También ocurre la fusión localizada de material en aquellas zonas donde la temperatura no es lo suficientemente alta como para provocar la sublimación, aunque este fenómeno no asegura el arranque puesto que el material fundido puede resolidificarse sobre la pieza. Los fenómenos de arranque térmico y mecánico de material progresan hacia su máximo.

Etapa 6 (Fig. 5 drcha.): intensidad de corriente y diferencia de potencial se mantienen constantes durante la descarga. El arranque de material alcanza su máximo coincidiendo con la máxima expansión de la burbuja de gases. En el instante programado por el usuario de la máquina se desconecta el generador con lo que la tensión como la intensidad caen a cero.

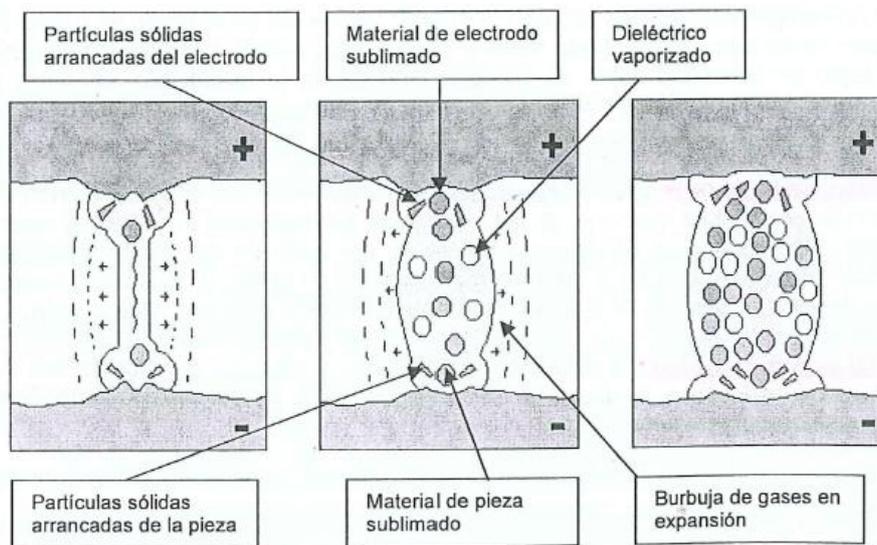


Figura 5. Comienzo de la descarga y expansión del canal.

Al desaparecer la chispa cesa la generación de calor. El metal evaporado solidifica rápidamente en el fluido dieléctrico de los alrededores que se encuentra relativamente frío. La descarga eléctrica ha tenido como consecuencia la formación de un cráter sobre la superficie de la pieza tal y como muestra la microfotografía de la Figura 6.

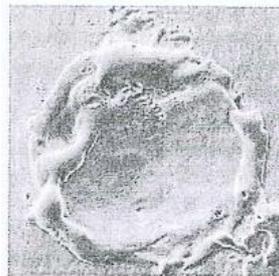


Figura 6. Fotografía SEM del cráter generado en un ensayo de descarga única.

Etapa 7 (Fig. 7 izda.): la caída de la temperatura provocada por el cese de la corriente eléctrica provoca el colapso de la burbuja de gases. En su lugar se crea un vacío que da paso al dieléctrico renovado de las proximidades.

Etapa 8 (Fig. 7 drcha.): el nuevo dieléctrico limpia la zona de residuos y sigue reduciendo su temperatura. El periodo entre el final de una chispa y el comienzo de la siguiente se conoce como tiempo de pausa y es programable por el usuario. Este periodo proporciona las condiciones necesarias para la siguiente descarga. En la definición de este tiempo se ha de alcanzar un compromiso, debiendo ser suficiente para conseguir una buena limpieza y para regenerar el dieléctrico, de lo contrario puede producirse arco voltaico. Esta situación provoca una descarga descontrolada y continua cuyo efecto más importante es dañar al electrodo y la pieza.

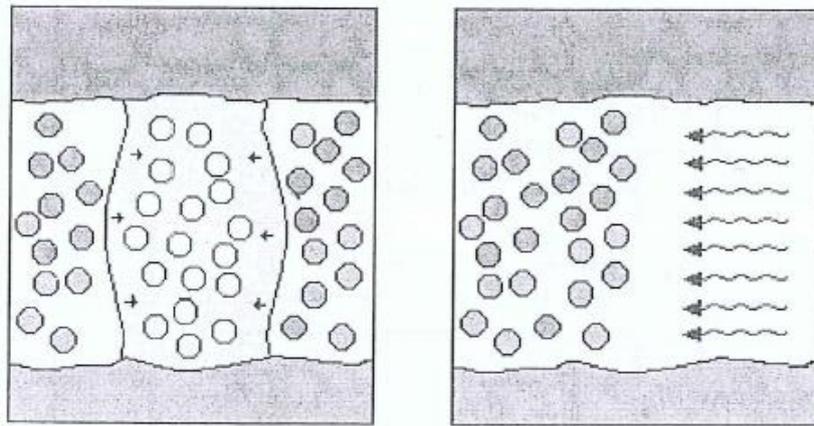


Figura 7. Colapso de la burbuja y arranque de material.

Este ciclo se repite miles e incluso cientos de miles de veces por segundo. El resultado es la erosión de la pieza a mecanizar en forma de pequeños cráteres distribuidos sobre su superficie. Como se aprecia, son los parámetros eléctricos los que definen la capacidad de arranque, la rugosidad, que es función del tamaño de los cráteres y el desgaste del electrodo.

Influencia de los parámetros de erosión sobre la eficiencia del proceso

El contenido energético de cada descarga, y su frecuencia, determinan la cantidad de material de pieza y de electrodo eliminados durante el proceso. Dado que dicha energía se controla mediante los parámetros de erosión, la correcta selección de los mismos

permite al usuario optimizar la capacidad de arranque de la operación, su acabado superficial o bien minimizar el desgaste del electrodo.

A primera vista la energía de cada chispa viene gobernada por la tensión y la intensidad, de manera que es de esperar que un aumento en cualquiera de ellos se traduzca en un tamaño del cráter generado por la descarga. Sin embargo, en la práctica no se tiene capacidad de variar la tensión de descarga, por lo que, manteniéndose constante s el resto de parámetros de operación, el aumento de intensidad se traduce en una mayor capacidad de arranque, un peor acabado superficial y un mayor desgaste, en términos absolutos, del electrodo.

Tan importante como los conceptos de capacidad de arranque, rugosidad o desgaste, es el concepto de *estabilidad del proceso*. Un proceso errático afecta directamente a la eficiencia, de manera que por mucho que se aumente la energía de la chispa puedes ser que no se mejore la capacidad de arranque si el proceso de erosión es inestable.

En el concepto de estabilidad intervienen muchos factores. Algunos de ellos son operacionales como, por ejemplo, el hacer llegar en buenas condiciones el dieléctrico a la zona de erosión, y otros son parámetros de erosión. Entre estos últimos cabe destacar el tiempo de impulso t_i , el tiempo de pausa t_0 , y la polaridad.

Como se ha comentado, todo el arranque se produce durante el tiempo de descarga t_f (tiempo de pulso menos tiempo de ionización). Por lo tanto, cuanto mayor sea el tiempo de descarga en relación al tiempo de pausa, durante el cual no hay erosión, mayor capacidad de arranque debe esperarse en la operación. La consecuencia lógica sería que si se desea aumentar la capacidad de arranque debe aumentarse el tiempo de descarga y reducirse al mínimo el tiempo de pausa. Sin embargo esta reducción tiene un límite marcado por la estabilidad del proceso. Si no se da tiempo suficiente a recuperar las condiciones del dieléctrico se producirán arcos voltaicos.

Por otra parte, el aumento de tiempo de descarga también está condicionado por otro fenómeno. La utilización de pulsos cortos hace que la concentración de energía sea demasiado grande. Dicho de otro modo, con menos energía también hubiera sido posible llevar a cabo la sublimación del material de pieza, lo que significa que parte de a energía se ha utilizado de forma poco eficiente. A su vez, pulsos de gran duración tienen como consecuencia que una parte importante de la energía se pierde por conducción a través del material de pieza. Por lo tanto debe obtenerse una duración de pulso óptima para cada nivel de energía del mismo.

La capacidad de arranque depende en gran medida del material del electrodo utilizado, de la naturaleza del dieléctrico y de la forma en que se aporta dicho dieléctrico o modo de limpieza.

La polaridad, es decir, qué lado del gap es positivo y cuál es negativo influye de manera crítica en el proceso. En el caso de la electroerosión por penetración ésta es programable por el usuario e influye en la capacidad de arranque, el desgaste del electrodo y la

estabilidad de la operación. En el caso de las máquinas de hilo la renovación continua del mismo minimiza los efectos negativos del desgaste, por eso se hace primar la velocidad de corte y eso explica que la polaridad sea negativa y no programable.

Se puede discutir la influencia del tiempo de pausa en el desgaste. Evidentemente, al bajar el tiempo de pausa se podrían dar más chispas y debería esperarse un mayor desgaste. Sin embargo esta argumentación no parece válida, puesto que como se ha dicho antes el criterio que marca la elección del tiempo de pausa es el de lograr la máxima capacidad de arranque manteniendo la estabilidad de la operación.

Sistema de control de avance del electrodo.

Aparte de los fundamentos puramente físicos uno de los aspectos que mayor diferencia conceptual supone entre los procesos de mecanizado convencionales y la electroerosión es el sistema de control del avance del electrodo. En las máquina- herramienta de arranque de viruta el avance es una función programable por el usuario que se aplica sobre la herramienta mediante un accionamiento, con un sistema de control que incluye un lazo de posición y un lazo de velocidad.

Sin embargo en la electroerosión el avance del electrodo no es programable. A cambio aparece una variable programable denominada *servo* que regula la sensibilidad del servosistema del avance del electrodo.

El servo es el encargado de mantener constante el *gap* entre electrodo y pieza. Un *gap* constante asegura una erosión estable, con chispas sensiblemente constantes a lo largo del mecanizado y por tanto con una rugosidad y una capacidad de arranque uniformes durante la operación. Como se ha mencionado anteriormente esta sería una situación ideal que no se corresponde con la realidad, ya que la variabilidad de las descargas es muy acusada. En este punto interviene el sistema de control del servo manteniendo, en lo posible, constante la distancia entre electrodo y pieza, si no de manera instantánea, sí a lo largo de cierto intervalo de tiempo.

Se han ensayado diferentes medios para el control del *gap*, pero hoy por hoy el más extendido es el control de la diferencia de potencial entre electrodo y pieza. Dicho control se realiza como sigue: el valor de la tensión media a lo largo de un cierto periodo de tiempo se compara con un cierto valor de referencia programable por el usuario y que hemos denominado *servo*. Si la tensión media supera dicho valor significa que el electrodo está más lejos de la pieza que lo esperado. En este caso el comparador electrónico envía una señal al accionamiento de avance del electrodo para que se acerque a la pieza, de manera que recupere el *gap* deseado. Si el proceso fuera perfectamente estable, a medida que se va erosionando el material de la pieza, esta actuación permitiría el avance continuo del electrodo.

En ocasiones se producen situaciones de demasiada cercanía entre electrodo y pieza e incluso situaciones de cortocircuito. El gap en estos casos es menor de lo esperado, y la tensión media medida cae por debajo del valor de referencia programado. En esta situación el comparador envía una señal al accionamiento del electrodo para que se aleje de la pieza, recuperando la dimensión del gap esperada. Lógicamente estos retrocesos afectan a la capacidad de arranque. Su aparición es inevitable pero en una erosión estable no deben ser frecuentes. Retrocesos continuos del electrodo durante el mecanizado son muestra de un proceso que está discurriendo con problemas.

Por supuesto la actuación del servo está ligada a otros factores además de la estabilidad del proceso. valores del servo bajos están relacionados con mayores capacidades de arranque a riesgo de que el proceso sea más inestable por ser la limpieza del canal más complicada. El servo también está relacionado con la tensión de ionización ya que es ella la que gobierna la intensidad de campo para un cierto tamaño de gap.

Por otra parte, la capacidad de reacción de una máquina de electroerosión ante variaciones del gap depende de múltiples factores, entre los que cabe citar el hardware de la máquina y la velocidad de reacción de los accionamientos.

Tipos de electroerosión

Electroerosión por penetración (Sinking Electrical Discharge Machining, SEDM)

Esta forma de electroerosión es la más universal. Se basa en el avance continuo, y servocontrolado de un electrodo-herramienta que penetra en el electrodo-pieza en presencia de un líquido dieléctrico.

Según la forma del electrodo y según la profundidad que se dé a las formas erosionadas en la pieza, se podrán obtener tanto formas pasantes como formas ciegas de geometrías complicadas.

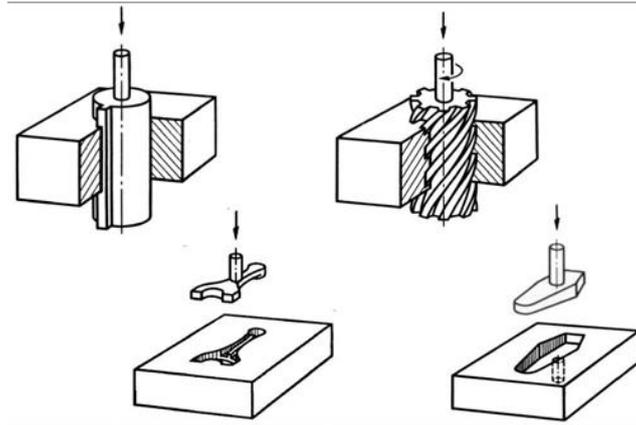


Figura 8. distintas formas de electrodo y cavidades tras la erosión

En el momento de su aparición, la tecnología de SEDM revolucionó el mundo de la fabricación de utillajes. Hasta ese momento no era posible generar geometrías complejas dentro de tolerancias sobre piezas de elevada dureza, principalmente aceros de herramientas con tratamiento térmico, por lo que la práctica de fabricación consistía en mecanizar antes de dicho tratamiento. Una vez tratada, y debido a las dilataciones inducidas por dicho tratamiento, el ajuste para conseguir las tolerancias finales se convertía en una tarea artesanal que consumía muchas horas de mano de obra., lo que disparaba los costes y plazos de entrega.



Figura 8. Máquina de electroerosión por penetración ONA NX3.

La electroerosión permitió por primera vez mecanizar geometrías complejas sobre piezas tratadas térmicamente, independientemente de la dureza alcanzada en dicho

tratamiento. Piezas de dureza por encima de 60 HRC pueden ser mecanizadas por SEDM puesto que las características mecánicas de la pieza no influyen en el proceso.

Aunque no se eliminó del todo, la fase de ajuste se redujo considerablemente, lo que mejoró sensiblemente los tiempos y costes finales de fabricación.

Se han mencionado en anteriores apartados los principales sectores que utilizan esta tecnología. Cada uno de ellos representa diferentes requisitos de pieza en cuanto a acabado superficial y tolerancias dimensionales. Una correcta selección del material del electrodo, del fluido dieléctrico y de los parámetros de operación permite al proceso de SEDM cumplir dichos requisitos. La siguiente tabla muestra algunas aplicaciones típicas de esta tecnología junto con los requisitos de pieza. Hay que reseñar que normalmente se requiere pulido manual tras la electroerosión.

Sector	Tipo de acero	Dureza	Rugosidad	Tolerancias
Forja	F-1252	42-60 HRC	5-10 μm	0.2 mm
Inyección de plásticos	F-5318	42-50 HRC	1 μm	0.01 mm
Inyección de aluminio	F-5318	50-55 HRC	1-2 μm	0.05 mm

Tabla 1. Requisitos de distintos tipos de utillajes.

A la vista de lo expuesto, resulta claro que la fabricación del electrodo es un punto crítico en el proceso de erosión por penetración. Las dimensiones finales de la pieza corresponden a las del los electrodos incrementados en la dimensión del gap (Ver Figura 9).

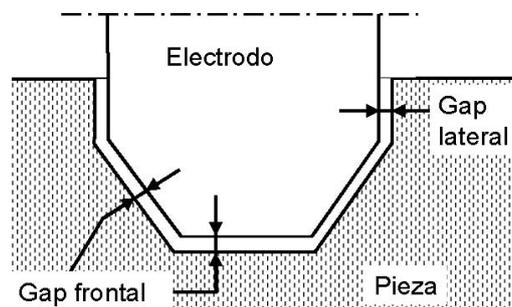


Figura 9. Electrodo de SEDM con gap lateral y frontal.

Esto significa también que los errores dimensionales en el electrodo se transmiten a la pieza. En lo que se refiere al acabado superficial, también depende del pulido del

electrodo y de su calidad. Desde el punto de vista económico la fabricación del electrodo tiene un peso importante puesto que implica la generación de los programas CAM, la selección adecuada de herramientas y condiciones de corte y el uso de centros de mecanizado adecuados, especialmente cuando el material de electrodo es el problemático grafito.

Existen en el mercado diferentes alternativas de materiales del electrodo. Baste mencionar aquí las dos opciones más habituales: el grafito, en sus diferentes calidades, y el cobre electrolítico. Los criterios de selección de material del electrodo son la capacidad de arranque que se espera en el proceso de erosión, el acabado superficial final de la pieza, la facilidad de mecanizado del material del electrodo, y de forma secundaria, su coste. El dieléctrico juega también un papel primordial.

Como en toda operación de arranque de material, los conceptos de operación de desbaste y de acabado tienen plena vigencia en el caso de la electroerosión por penetración. las condiciones de arranque masivo de material en cuanto a parámetros eléctricos, tipo de electrodo e incluso tipo de dieléctrico difieren de las condiciones destinadas a obtener tolerancias precisas y un acabado superficial fino. A estas ideas debe añadirse un tercer criterio de gran importancia en la operación. El desgaste del electrodo.

A modo orientativo y aunque las cifras dependen de multitud de factores además de los ya mencionados, resulta realista hablar de capacidades de arranque máximas en el entorno de 1500-2000 mm³/min, mecanizando acero templado. Si el objetivo es el mínimo acabado superficial, de forma realista se pueden obtener rugosidades en torno a 0.4 µm Ra en acero, aunque mediante estrategias especiales que implican movimiento orbital del electrodo y muy largos tiempos de trabajo pueden obtenerse acabados muy inferiores, del orden del pulido (0.1 µm Ra) en áreas pequeñas y determinados aceros.

Electroerosión por hilo (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM)

Aunque su aparición industrial ha sido mucho más reciente, el corte por electroerosión por hilo ha alcanzado gran popularidad en poco tiempo, siendo hoy una tecnología plenamente consolidada y con un mercado en expansión.

A pesar de que el fundamento físico del proceso es el mismo que en el caso de la erosión por penetración, es decir, el arranque de material mediante la aplicación de descargas controladas entre electrodo y pieza, su configuración y sus campos de aplicación están completamente separados. En este caso el electrodo es un hilo de material conductor, que genera una geometría pasante en la pieza en función de la trayectoria recorrida. No existe un útil de forma como en el caso de la electroerosión por penetración, por lo que los costes de mecanizado del electrodo desaparecen y el desgaste del mismo pasa a un segundo plano, aunque en ciertos casos, como el corte de grandes espesores, debe ser tenido en cuenta.

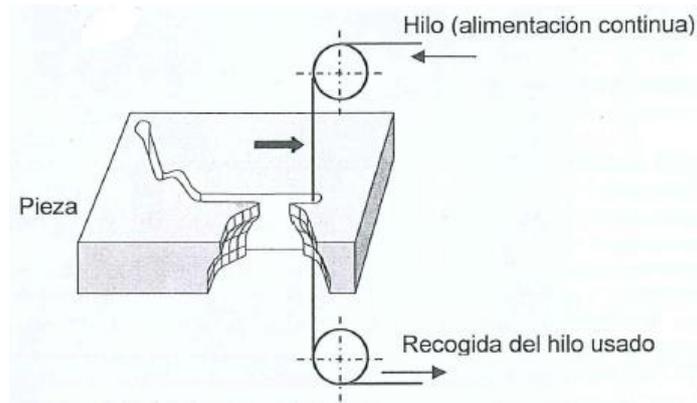


Figura 10. Esquema del proceso de corte por electroerosión por hilo.

La Figura 10 muestra esquemáticamente el proceso, como se aprecia, existe un movimiento relativo entre electrodo y pieza. Este movimiento es el responsable de la geometría que se genera. Dependiendo de la configuración de la máquina (fundamentalmente del tipo de pieza que se puede acomodar), el movimiento puede ser de mesa (pieza) o del hilo. Es evidente que el proceso no permite la realización de cavidades ciegas. En la Figura 11 se aprecia la existencia del gap entre hilo y pieza, cuya influencia sobre las dimensiones finales debe ser tenida en cuenta.

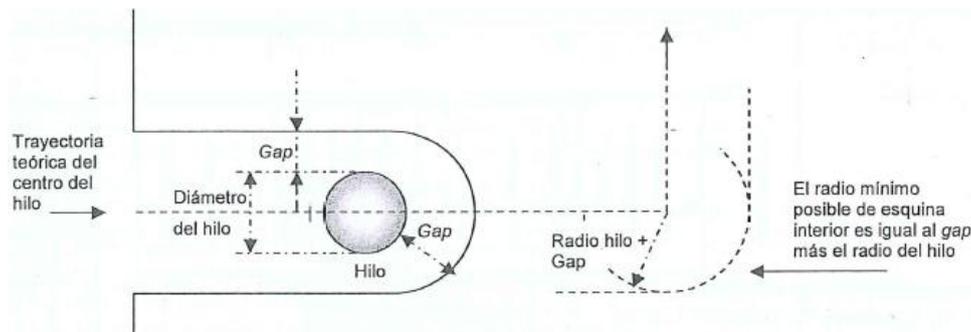


Figura 11. Trayectoria teórica del centro del hilo y dimensión final de la pieza.

Esta configuración permite explicar por qué motivo esta tecnología es más reciente que la tecnología de SEDM. En efecto, resulta evidente que es el control del movimiento relativo entre hilo y pieza el que permite al usuario generar la geometría deseada. Antes de la aparición del Control Numérico, se fabricaron en la Unión Soviética máquinas de hilo con control manual. Sin embargo se puede considerar la *Agie DEM 15* (ver figura 11), fabricada en 1969, como la primera máquina de WEDM tal y como se entiende en la actualidad, es decir, comandada por control numérico.



Figura 11. Máquina de WEDM Agie DEM 15.

Aún hubo que esperar casi dos décadas (finales de los 80, principios de los 90) para que la electroerosión por hilo pudiera consolidarse como una tecnología plenamente consolidada y aceptada por los usuarios.

Las aplicaciones del proceso se centran en el campo de la fabricación de utillajes en aceros tratados. De nuevo, el proceso proporciona la posibilidad de mecanizar materiales después de su tratamiento térmico. Así, troqueles de corte y doblado (conjuntos punzón- matriz), insertos para moldes, etc. son componentes clásicos fabricados por esta tecnología. Sin embargo en los últimos años otros sectores están mostrando interés por el proceso, especialmente la industria aeronáutica y los fabricantes de materiales extra-duros, como puede ser el diamante policristalino.

La tendencia actual es considerar el corte con hilo como un proceso de alta precisión. En este sentido los fabricantes están haciendo continuos esfuerzos por reducir las tolerancias y los acabados superficiales finales. En esta misma línea se encuentra también el desarrollo de máquinas y tecnologías de micro-electroerosión por hilo.

La eficiencia del proceso viene determinada por la conjunción de una serie de factores entre los cuales probablemente los más importantes son el tipo de hilo, el dieléctrico y los parámetros eléctricos. Otros aspectos también de importancia son la selección de sistemas de fijación para la pieza o la automatización del proceso.

Debe tenerse en cuenta que la WEDM permite únicamente producir geometrías pasantes. Así mismo, es posible realizar el corte en vertical o en cónico por medio de un descentramiento, controlado por el CNC, de la guía superior con respecto a la guía inferior. De este modo se pueden realizar formas con cortes cónicos que pueden ser de gran complejidad (Fig. 12).

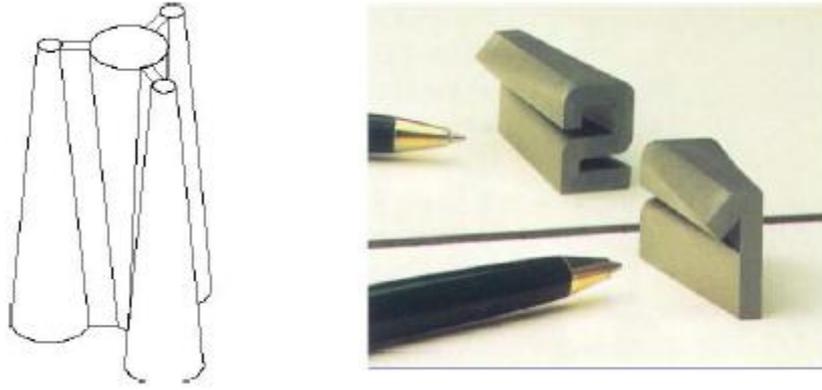


Figura 12. Ejemplos de corte cónico por WEDM.

Las ventajas de la electroerosión por hilo se pueden resumir en: rapidez, ya que no es necesario mecanizar el electrodo, y la no influencia del desgaste del hilo sobre la precisión de las piezas, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo.

Rectificado por electroerosión

En esta forma de electroerosión se da un movimiento de rotación del electrodo, con lo que el comportamiento se asemeja a una operación de rectificado convencional, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directo entre electrodo y pieza (Fig. 13). El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.

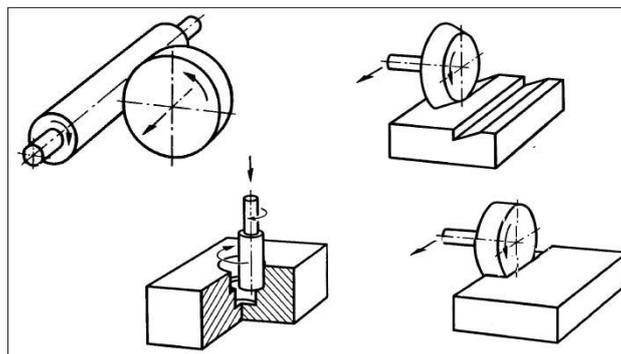


Figura 13. Rectificado por electroerosión.

Materiales de pieza más habituales

De manera general, puede decirse que cualquier material con una resistividad eléctrica por debajo de $100 \Omega \cdot \text{cm}$ es susceptible de ser mecanizado por electroerosión. Se trata de un umbral de resistividad lo suficientemente alto como para que todos los materiales metálicos y algunos no metálicos puedan ser procesados por esta técnica. Sin embargo, la utilización económica del proceso solo está justificada cuando la maquinabilidad del material sea baja. Es por eso que el uso de esta tecnología se centra fundamentalmente en los siguientes grupos de materiales: aceros de herramientas, aleaciones aeronáuticas y materiales extra-duros.

Aceros de herramientas

Por ser habitualmente utilizados en nuestro entorno puede hacerse mención a algunos aceros concretos que son mecanizados por electroerosión:

UNE F-5211 / AISI D2 / ISO 160CrMoV12 (denominación comercial *Sverker 21*, de Uddeholm). Se trata de un acero de herramientas de trabajo en frío, con alto contenido de carbono y cromo, aleado con molibdeno y vanadio, caracterizado por una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, alta dureza superficial después del temple, buenas propiedades de temple profundo, excelente estabilidad en el temple y buena resistencia al revenido. Este acero se recomienda para fabricar herramientas que deban tener una resistencia muy alta al desgaste, combinada con una tenacidad moderada. Además se utiliza para cortar materiales gruesos y duros, y en herramientas de dar forma expuestas a esfuerzos de flexión y cargas de impacto. Sus aplicaciones más comunes son cizallas, herramientas de embutición profunda herramientas de corte de alto rendimiento, herramientas para extrusión, moldes de plástico, instrumentos de medida, etc.

UNE F-5318 / AISI H13 / ISO 40CrMoV5 (denominación comercial *Orvar Supreme*, de Uddeholm). Se trata de un acero de alta tenacidad y resistencia en caliente, buena conductividad térmica y es insensible a la formación de grietas por calor. Este acero puede ser nitrurado y también es apto para temple al vacío. Presenta un 0,39% de carbono y 5,1% de cromo, aleado con molibdeno y vanadio. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran casquillos de fundición inyectada, cuchillas para cortar en caliente, fabricación de cuerpos huecos y cámara hueca, herramientas de extrusión en caliente, herramientas para fundición inyectada, insertos de estampa, etc.

UNE F-528 bonificado / ISO 55NiCrMoV7. Es un acero clásico de trabajo en caliente, con 0,56% de carbono, con contenido en cromo y níquel y aleado con molibdeno y vanadio. Sus aplicaciones más comunes incluyen estampas y matrices de forja de todo tipo, matrices de conformado, punzones de extrusión, portamatrices, anillos y placas de sujeción, cuchillas de corte en caliente y moldes para la inyección de plástico.



Figura 14. Mecanizado de acero Sverker 21 mediante electroerosión.

Superaleaciones

Las aleaciones de níquel, cromo y otros compuestos duros se utilizan de manera amplia en la industria aeronáutica debido a su alta tensión última y su dureza a alta temperatura. Probablemente entre estas aleaciones una de las más populares sea el Inconel 718 que se presenta con diferentes tratamientos térmicos. Este tipo de materiales se utiliza principalmente en la producción de componentes para aviación que deben trabajar a temperaturas por encima de 500°C, por ejemplo alabes y hélices de compresores, discos, ejes, carcasas y anillos, etc.

Sin embargo la combinación de propiedades tales como una baja conductividad térmica, alta resistencia a la deformación plástica, tendencia al endurecimiento mecánico y una alta afinidad química con los materiales de herramienta provocan que el mecanizado de Inconel 718 sea extremadamente difícil, ya que las propiedades anteriormente citadas resultan en temperaturas de corte elevadas, tensiones en las piezas y una delgada capa adherida en el interfaz herramienta-pieza durante el proceso de mecanizado. En concreto, las aleaciones base níquel poseen una baja conductividad térmica y una gran tendencia a la abrasión y a soldarse principalmente sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte. A esto hay que añadir que estas aleaciones tienden a un importante endurecimiento mecánico durante la deformación plástica del corte debido a su matriz austenítica. Estas dificultades obligan al usuario a utilizar parámetros de corte excesivamente conservadores, con los elevados tiempos de mecanizado y costes asociados que esto implica.

Por todo ello, la electroerosión resulta una alternativa de interés para la industria aeronáutica. Probablemente, las mayores reticencias se encuentran en los estrictos controles de integridad superficial que deben superar los componentes aeronáuticos con objeto de asegurar su resistencia a la fatiga termo-mecánica. Debe tenerse en cuenta que la naturaleza térmica de la electroerosión puede afectar a dicha integridad. Sin embargo, tanto fabricantes de máquinas como usuarios de la tecnología se están esforzando

por desarrollar tecnologías tanto de hilo como de penetración que minimicen dichos daños.

Las capacidades de arranque dependen de la composición química de la aleación concreta de que se trate. En el caso del Inconel, debido a su elevado contenido en hierro las velocidades son cercanas a las de un acero común tanto en hilo como en penetración.



Figura 15. Aleación Inconel 718 mecanizada mediante electroerosión por hilo.

Materiales extraduros

En este grupo se engloban materiales avanzados de extrema dureza como pueden ser ciertas cerámicas y materiales compactos como el diamante policristalino (PCD). En general, la conductividad eléctrica de estos materiales es bastante reducida en comparación con la de los materiales metálicos y es por ello que en muchos casos no pueden ser mecanizados por electroerosión. Este es el caso de una cerámica como la alúmina (Al₂O₃), muy utilizada.

Sin embargo en otros casos la resistividad eléctrica está por debajo del umbral de los 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ antes mencionado. Es el caso del carburo de silicio (SiC) y del carburo de boro (B₄C) entre otros. Debe tenerse en cuenta que bien por su extrema dureza y fragilidad, o bien por su carácter altamente abrasivo, estos materiales no pueden ser mecanizados por métodos convencionales por lo que debe recurrirse a técnicas no convencionales. En este contexto la electroerosión se convierte en una alternativa viable frente a otras técnicas de mecanizado.

Limitaciones del proceso

En primer lugar ya se ha dicho que la aplicación de la electroerosión está limitada al materiales con resistividad eléctrica por debajo de $100 \Omega \cdot \text{cm}$. Por supuesto, esta afirmación descarta materiales plásticos, madera, la mayor parte de las cerámicas, etc. Claro está que la industria de los utillajes utiliza mayoritariamente hoy por hoy los aceros tratados, que son por tanto el principal objeto del proceso.

Se debe entender que la electroerosión no compite en tasa de arranque con procesos convencionales de mecanizado. Como la mayor parte de procesos no convencionales, la electroerosión se caracteriza por tener bajas tasas de arranque y un elevado consumo energético, por lo que la competencia del proceso radica en su no dependencia de las propiedades mecánicas del material de pieza y el su elevada precisión.

A nivel humano, otro de los aspectos destacables es que a pesar de su grado de implantación, son muchos los usuarios que se limitan a programar los parámetros recomendados por el fabricante para una aplicación determinada, con lo que el margen de maniobra de que disponen sobre el mecanizado es muy inferior al que tienen sobre métodos mejor entendidos como el fresado o el torneado.

Hilos para electroerosión en WEDM

La adecuada selección de un hilo para electroerosión es un punto clave en la en la optimización del proceso. Para cada tipo de hilo que hay en el mercado, el usuario debe conocer tanto las propiedades que afectan al rendimiento del proceso de corte como los condicionantes económicos. La conjunción de estos factores debe dar como resultado un corte estable, preciso, a la máxima velocidad posible y ajustado en coste.

Propiedades de los hilos de electroerosión

Las propiedades que debe cumplir un hilo de electroerosión se pueden clasificar en tres grandes grupos: propiedades eléctricas, mecánicas y termo-físicas.

En lo que respecta a los requisitos eléctricos del hilo deben tenerse en cuenta las elevadas intensidades de corriente que se alcanzan en la actualidad, alcanzando incluso los 700 A de pico en los casos más extremo. Evidentemente, los requisitos de un hilo que deba soportar estas condiciones de desbaste muy agresivo no tienen nada que ver con las de uno de una operación de superacabado con pulsos de muy baja intensidad y bajos tiempos de pausa.

La conductividad eléctrica del hilo es, en este sentido, un parámetro fundamental. El material más adecuado sería el cobre, con una resistividad eléctrica de $1,69 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, cinco veces la del latón *CuZn37*. De hecho los primeros hilos en utilizarse fueron de cobre, sin embargo sus limitadas propiedades mecánicas y termo-físicas hicieron que pronto se desechara el material, desarrollándose alternativas como los hilos de latón o los hilos recubiertos.

Las propiedades mecánicas resultan críticas en el comportamiento del hilo. La máquina somete al hilo a tracción con objeto de mantener su rectitud y así reducir las pérdidas de precisión asociadas a la flexión del mismo. Una excesiva tracción aumenta las probabilidades de rotura, por lo que la resistencia del hilo se considera una propiedad fundamental. Por supuesto el tratamiento térmico y el endurecimiento por deformación a que está sometido el hilo durante el proceso de fabricación determinan su resistencia a la tracción.

El comportamiento termo-físico del hilo, concretado en sus temperaturas de fusión y de vaporización, concreta la explicación. Estas propiedades dependen de su composición y en su caso, de su recubrimiento. Un bajo punto de fusión permite que las partículas desprendidas del hilo faciliten la ionización del gap, promoviendo la descarga.

Por otra parte, es preciso que el material de la superficie del hilo se vaporice con facilidad, lo que permite que la mayor parte del calor se transmita a la pieza. De esta manera se minimiza la cantidad de calor transmitido hacia el hilo, que provocaría tracciones de origen térmico y como consecuencia, aumentaría el riesgo de rotura. Una mayor facilidad para la vaporización ayuda además a la formación de la burbuja en el gap durante la descarga.

Tipos de hilos para electroerosión.

- *Hilo de latón:*

Se introdujo en el mercado en 1977 y la primera consecuencia de su aparición fue el espectacular incremento de la velocidad de corte. La causa principal de esta mejora se encuentra en la presencia de zinc en la composición del latón, en cuya resolidificación tras la chispa se producen pequeñas partículas de óxido de zinc que favorecen el encendido de la siguiente descarga.

- *Hilo de molibdeno:*

Este hilo es una opción de alto coste para el corte de piezas con radios de acuerdo interiores muy pequeños. Su resistencia a la tracción está por encima de los 1900 N/mm^2 , haciendo posible utilizar hilos de muy reducido diámetro sin aumentar las probabilidades de rotura durante el corte.

Su uso no se ha extendido debido a su alto coste y sus elevadas temperaturas de fusión y de vaporización demasiado elevadas no favorecen su comportamiento durante el corte.

- *Hilos recubiertos:*

Ante la imposibilidad de aumentar el contenido de zinc en la composición del latón, a finales de la década de los 70 se desarrollaron los primeros hilos recubiertos. En un primer momento se utilizaron los hilos de cobre recubiertos de zinc, aunque su baja resistencia a la tracción y sus variaciones dimensionales hicieron que pronto aparecieran otras alternativas. El recubrimiento de zinc da origen a una delgada capa de óxido de zinc durante el proceso de fabricación. Estas variantes proporcionan mejor comportamiento del hilo durante la descarga, aunque presentan importantes problemas en los sistemas de enhebrado automático.

Los primeros recubrimientos de zinc no superaban los 3.5 μm de espesor. El comportamiento ante la descarga era adecuado en los primeros generadores, caracterizados por bajas intensidades de corriente. Sin embargo la evolución hacia generadores más potentes que consiguen mayores velocidades de corte dio como resultado desgastes excesivos del recubrimiento y como consecuencia, un aumento de la probabilidad de rotura del hilo. En la *Figura 16* se aprecia el desgaste de un hilo de este tipo.

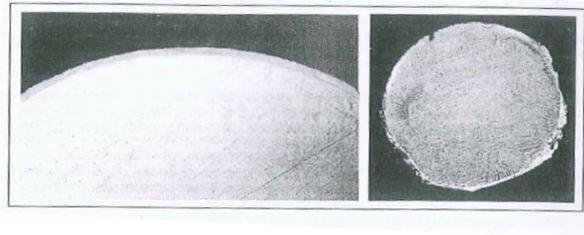


Figura 16. Hilo de latón recubierto de zinc. Desgaste tras erosión.

Aunque la solución lógica a este problema sería aumentar el espesor de la capa de zinc, en la práctica resulta muy complicado fabricar hilos de este tipo. La alternativa podría pasar por aumentar el contenido en zinc del latón del material base, pero la aparición de fases frágiles lo hace inviable.

La solución adoptada pasa por el desarrollo de un hilo de núcleo de cobre o de latón con variantes CuZn20 o CuZn30, recubierto por una capa de latón 50% Cu y 50% Zn. El proceso de fabricación implica tratamientos térmicos y un trefilado final que comprime el recubrimiento sobre el núcleo. El resultado es un hilo que

se trefila con facilidad y que proporciona mejoras espectaculares en el corte, representando el estado más avanzado de la tecnología actual de fabricación de hilos para electroerosión.

El líquido dieléctrico

Misiones del líquido dieléctrico

Si las descargas eléctricas se diesen en un gas o en aire el efecto erosivo sería muy pequeño, ya que la descarga se ramificaría, perdiéndose todo su efecto.

La misión del líquido dieléctrico, que se introduce a presión en el gap, es concentrar la descarga en un punto. Con ello se logra una capacidad de erosión muy superior a la que se daría si entre ambos electrodos hubiese un gas o aire.

Otra misión del dieléctrico, y tal vez la principal, es la actuar como dieléctrico, es decir, como aislante entre los dos electrodos. La principal característica eléctrica de un aislante es su rigidez dieléctrica. Al ir aumentándola tensión entre el electrodo y pieza, llega un momento en que el líquido se ioniza ligeramente permitiendo el paso de una pequeña corriente eléctrica. Esto a su vez hace aumentar la ionización, con lo que la resistencia eléctrica del líquido eléctrico baja bruscamente. Entonces se da descarga en forma de avalancha, que caracteriza a las descargas erosivas.

Una vez terminado el impulso, el líquido debe de desionizarse, y la siguiente descarga podrá darse en el punto en que el campo eléctrico entre electrodo y pieza sea capaz de volver a ionizarlo y de formar el canal a través del cual se dará la siguiente descarga, ocurriendo así un reparto al azar de las descargas sobre la superficie a erosionar.

Además el líquido cumple otras dos misiones importantes, que son:

El arrastre de las partículas ya erosionadas de la zona de trabajo, mediante un procedimiento de limpieza adecuado para evitar problemas de estabilidad en el proceso.

Refrigerar el electrodo y la pieza, ya que debido al efecto térmico de las descargas, tienen tendencia a calentarse durante el mecanizado.

Características que debe de reunir un líquido dieléctrico para ser empleado en electroerosión.

a) Tener la suficiente rigidez dieléctrica para soportar los campos eléctricos que crean las tensiones que se aplican a ambos electrodos (oscilan entre 60 y 300 voltios), que están separados en un gap que oscila entre 10 y 2500 micras, no permitiendo el paso de la corriente si no es forma de descarga.

- b) Deben tener baja viscosidad y baja tensión superficial, o sea que moje bien, a fin de penetrar con facilidad hasta el último rincón del gap y reconstruir allí las condiciones normales de aislamiento. Además debe de poder pasar por espacios menores a 5 micras para poder efectuar el arrastre de los residuos de la erosión.
- c) Deben de ser químicamente neutros, nunca ácidos, con el fin de no atacar al electrodo y pieza, ni a las partes de la máquina con las que se ha de poner en contacto.
- d) Dada la gran superficie de contacto entre el líquido y el aire, su volatilidad debe de ser baja, para evitar pérdidas.
- e) El punto de inflamación debe de ser lo suficientemente alto para evitar el peligro de incendio, siempre y cuando se hayan observado las normales medidas de seguridad.
- f) No debe de desprender vapores nocivos con olor especialmente desagradable, ni tampoco debe de producir irritaciones en la piel, ni tener ningún otro riesgo.
- g) Debe tener las características térmicas adecuadas para poder enfriar las superficies erosionadas y evitar posibles variaciones dimensionales que originan las altas temperaturas locales que se dan en ambos electrodos.
- h) Deben de presentar una mínima formación de lodos (residuos de cracking) en las peores condiciones de mecanizado.
- i) Deben de conservar sus propiedades en todas las condiciones de mecanizado, es decir, que sean mínimamente sensibles a las variaciones de temperatura, a los restos de la erosión y los productos de descomposición resultantes de la acción de las descargas.
- j) Su precio no debe de ser excesivo y la obtención en el mercado debe de ser fácil.

Entre las características enumeradas, hay algunas que ejercen una acción muy importante sobre el rendimiento en el mecanizado. De ellas la más importante, tal vez, es la desionización del dieléctrico. Este debe de desionizarse lo más rápidamente posible y volver a su estado inicial para que se puedan dar más descargas. Si la desionización es rápida la velocidad de arranque de material aumenta mucho, mientras el desgaste relativo se reduce considerablemente.

Otras propiedades importantes son la conductividad, la viscosidad y la capacidad refrigerante, ya que condicionan aspectos concretos de la operación (velocidad de corte), y del componente erosionado (rugosidad, integridad superficial y tolerancias dimensionales).

Tipos de dieléctricos utilizados

Los líquidos que mejor cumplen con las características antes mencionadas son los hidrocarburos, aunque existen ciertas diferencias entre los aceites y el petróleo.

Aceites

Los aceites que mejor se comportan en este proceso son los minerales, ya que su temperatura de inflamación es alta, oscilando entre 120 y 150° C, lo cual supone una gran seguridad contra incendios.

La viscosidad del aceite es elevada, variando entre 6 y 29 cts., lo cual, junto a la característica antes mencionada (punto de inflamación alto), los hace aconsejables para trabajos de desbaste. En este tipo de trabajos el gap es grande y por ello no suele haber problemas en la circulación del dieléctrico por el gap. Sin embargo no es válido para trabajos de acabado donde el gap es muy pequeño, y debido a su alta viscosidad, el aceite no puede circular por él.

Agua

El agua se utiliza como dieléctrico sólo en algunas ocasiones, como micromecanizados y en general para máquinas de corte por hilo. Debe de estar totalmente desmineralizada. La utilización de aceite como dieléctrico para corte por hilo está limitada a aplicaciones muy especiales de corte de metal duro y operaciones de alta precisión. En operaciones convencionales, en las que prima la velocidad de corte, la opción más adecuada sigue siendo el corte en agua. En la tabla 2 se recoge una comparativa de propiedades entre diferentes dieléctricos.

Dieléctrico	Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Viscosidad (cSt)	Capacidad refrigerante ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
Agua	10^4	1	2800
Agua desionizada	10^6	1	2800
Aceite	10^{15}	1.6 - 6	570

Tabla 2. Propiedades de los dieléctricos.

Factores que afectan al mecanizado

Además de todo lo ya citado, hay otros factores que afectan al mecanizado, como son:

- Temperatura del dieléctrico
- Grado de limpieza
- Presión de limpieza

Temperatura del dieléctrico

En los aceites, al aumentar su temperatura, aumenta también el rendimiento del mecanizado (ver Fig. 17), hasta un cierto punto, a partir del cual vuelve a disminuir. Ello se atribuye a que al aumentar la temperatura baja la viscosidad del aceite (se hace más líquido), y por ello la limpieza es mejor.

A partir de ese punto vuelve a disminuir el rendimiento debido a que se crea un excesivo desprendimiento de gases, lo cual contrarresta el efecto anterior dando lugar a inestabilidades, que disminuyen el rendimiento.

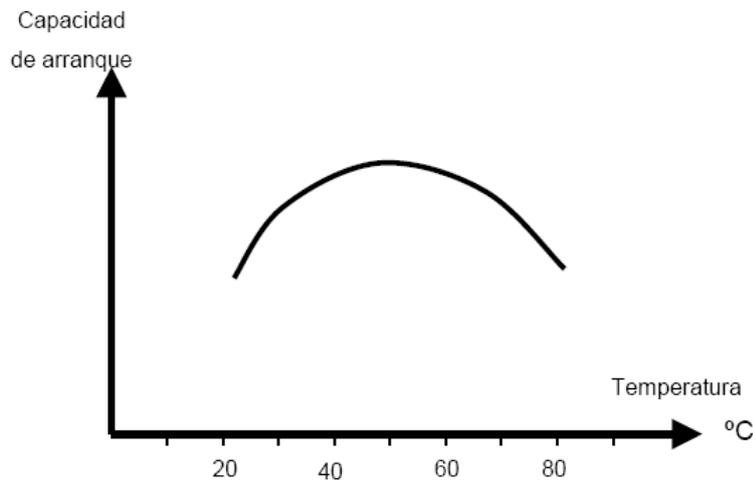


Figura 17. Influencia de la temperatura del dieléctrico en el rendimiento del mecanizado.

Grado de limpieza

El grado de suciedad del dieléctrico influye menos en el caso de descargas con intensidades altas, pues en este caso el gap es mayor y la limpieza más fácil.

Presión de limpieza

La limpieza es una de las operaciones más importantes del proceso de electroerosión. Lógicamente la presión a que se inyecta el fluido influye en el rendimiento del proceso.

En la Fig. 18 se aprecia la influencia de la presión del fluido sobre el arranque y el desgaste relativo del electrodo.

En ella se ve como si la presión es excesivamente baja el arranque de material disminuye y el desgaste aumenta. Ello es debido a que se acumula con muy baja presión mucha suciedad en el dieléctrico y se dan cortocircuitos. En el caso de que la presión

sea excesivamente alta también se da una pérdida de rendimiento. Es debido a que en un dieléctrico excesivamente limpio el gap disminuye y también se dan cortocircuitos.

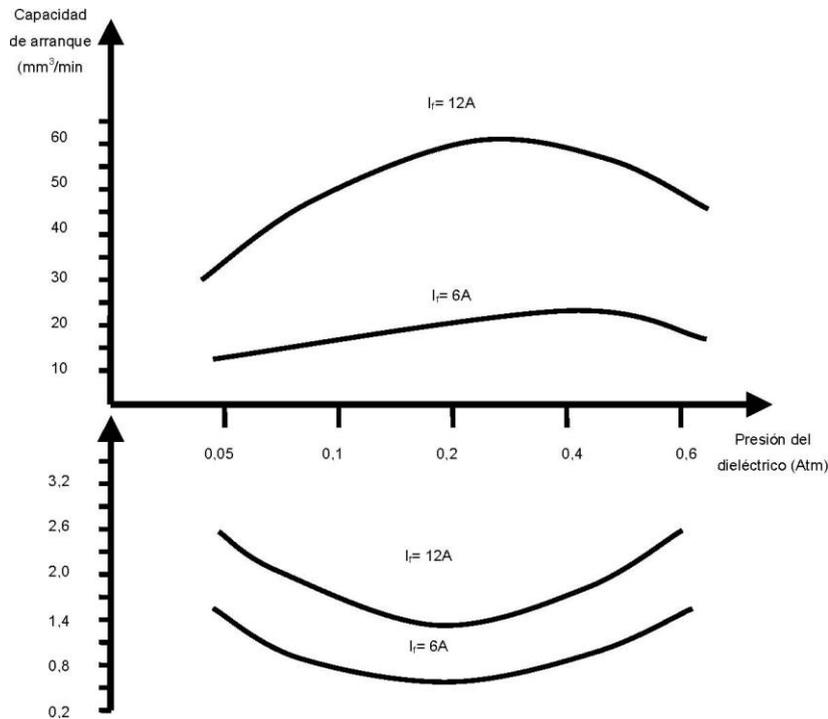


Figura 18. Influencia de la presión del dieléctrico en el rendimiento del mecanizado y el desgaste.

Máquinas y Generadores

Cuando aparecieron las primeras máquinas de electroerosión eran todas de penetración, pero la evolución tecnológica permitió que a finales de los setenta aparecieran las primeras máquinas de hilo, gracias al gran desarrollo que desde esas fechas ha experimentado la tecnología de los controles numéricos.

La diferencia fundamental que identifica a ambos tipos de máquina es que en las de penetración el electrodo tiene una forma tridimensional y en una operación de erosión con movimiento de un eje, consigue realizar en la pieza una cavidad tridimensional; en tanto que en las de hilo el electrodo tiene forma de un alambre que va cortando la pieza de acuerdo al programa de interpolación que va ejecutando el control numérico asociado.

Esta diferencia funcional hace que tanto la estructura de la máquina como el número de ejes e incluso el dieléctrico sean diferentes en ambas ramas de la tecnología de la electroerosión.

No obstante, los elementos básicos de ambos tipos de máquina son los mismos.

Partes de una máquina

Las partes fundamentales de una máquina de Electroerosión son las siguientes:

- Una bancada o armazón, que sirve de base para los demás elementos.
- La mesa de trabajo.
- La unidad de filtrado, con el sistema de circulación de dicho líquido, su filtrado, enfriamiento, etc.
- El generador de impulsos, que puede estar incorporado en la bancada, pero que generalmente se halla en un armario aparte, y se sitúa al lado de la máquina.
- Una unidad de CNC, que permite unos muy elevados niveles de automatización.

Sistema de ejes de una máquina de electroerosión

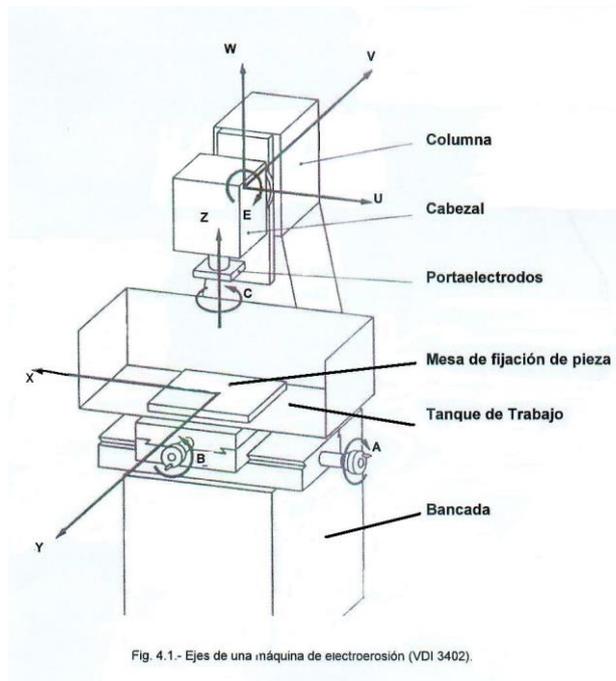


Figura 19. Partes de una máquina de electroerosión y su ejes.

Dados los diferentes conceptos constructivos de máquina que existen, además de las dos tipologías básicas de penetración e hilo, y de las numerosas variantes que pueden ser utilizadas para dar solución al amplio abanico de aplicaciones de la electroerosión, la asociación alemana VDI desarrolló la norma VDI 3402 en la que se definían los diferentes ejes de cualquier máquina de electroerosión.

Armazón

Constituye el esqueleto de la máquina. Aunque puede tener formas diversas ha de estar concebido para servir de base de sujeción a todos los elementos y dispositivos

necesarios para el proceso de electroerosión, tales como los dedicados al accionamiento del sistema portaelectrodos, en las de penetración, al sistema de movimiento y guiado del hilo, en las de hilo, y a la mesa de trabajo con el tanque de dieléctrico por otra.

Además, estos dispositivos deben estar dispuestos de forma que sean fáciles las maniobras en ellos, tales como el cambio de electrodos o la puesta a punto de las piezas a mecanizar. En máquinas pequeñas, normalmente, en la construcción del armazón se adopta la forma de cuello de cisne.

La tendencia más moderna en máquinas de electroerosión es a separar el generador de los elementos mecánicos introduciendo aquél en un armario aparte. Esta tendencia está justificada por el gran número de variantes que se pueden dar en los generadores para alimentar una misma máquina, en el caso de la penetración, y en la conveniencia de alejar del cuerpo de la máquina de cualquier fuente de calor que pudiese producir distorsiones mecánicas.

El cabezal (máquinas de penetración)

El cabezal de una máquina de electroerosión es un elemento esencial de la misma, ya que lleva consigo todo el complejo sistema de mecanizado automático.

Su parte principal es el servosistema de control que actúa sobre el portaelectrodos asegurando un desplazamiento vertical del electrodo, siempre sobre el mismo eje. La rigidez de estos elementos ha de ser muy cuidada.

El servosistema de control es el encargado de mantener el gap constante. En el proceso de electroerosión se van desgastando ambos electrodos, lo cual daría como consecuencia su separación en el momento en que el gap se hubiera agrandado. La velocidad de arranque de material y el desgaste dependen de la intensidad de la descarga y del tiempo de impulso.

Según sean las dimensiones del electrodo, ambos polos tenderán a separarse en un tiempo más o menos corto. Por ello el servosistema de control ha de tener gran velocidad de respuesta para acercar el electrodo a la pieza y un avance muy preciso.

Asimismo hay casos en los que el electrodo y la pieza entran en contacto directamente, produciéndose un cortocircuito. En este caso el servosistema de control debe de separarlos automáticamente con gran rapidez.

Este movimiento automático se realiza aprovechando la relación que existe entre la tensión media entre electrodos y su distancia. Toda variación de esta distancia se traduce automáticamente en una variación y en el mismo sentido de dicha tensión. Midiendo con la ayuda de un dispositivo apropiado la desviación de dicha tensión como señal de error, es posible regular automáticamente el avance y mantener constante la distancia entre electrodos.

En el caso de cortocircuitos, una de las causas que los provoca es un avance excesivamente rápido del electrodo y otra es el exceso de partículas en el gap. Por ello el servosistema de control debe regular el avance con una respuesta muy rápida y precisa.

Asimismo el cabezal comporta una serie de órganos que sirven para parar la máquina automáticamente al final del trabajo y para la lectura de la posición del electrodo.

La mesa de trabajo

La mesa de trabajo es la unidad en la que se fija la pieza para su mecanización.

Según sea el concepto constructivo de la máquina, el sistema de coordenadas que permite los desplazamientos relativos entre la pieza y el electrodo puede hacer que sea éste o bien la mesa el elemento móvil.

Las máquinas de Electroerosión se pueden considerar como semipunteadoras, lo que indica que la precisión del recorrido del portaelectrodos es de algunas micras en el total de su carrera y la precisión de desplazamiento relativo entre la mesa y el electrodo es del orden de 0,01 mm, en carreras de unos 350 mm.

Envolviendo a la mesa de trabajo se halla el tanque de trabajo, que se llena de líquido dieléctrico, y es donde se efectúa el mecanizado. El volumen de dicho tanque depende del tamaño de la pieza y de la potencia del generador.

Unidad de filtrado

Esta unidad es la encargada de extraer del líquido dieléctrico los residuos del material arrancado durante el proceso de electroerosión.

Además de los elementos necesarios para la función de filtración, esta unidad incluye los dispositivos necesarios para asegurar el envío del líquido hacia el tanque de trabajo y poder ejecutar los diferentes tipos de limpieza de la zona de trabajo.

Control Numérico (CNC)

La evolución tecnológica de la electrónica ha permitido que desde comienzos de la década de los ochenta comenzase la incorporación de los controles numéricos a las máquinas de electroerosión.

De este modo, en el plazo de veinte años, la práctica totalidad de las máquinas de electroerosión ya iban equipadas con unidades CNC, que permitían la realización de una muy variada gama de funciones, las cuales, en conjunción con la programabilidad de los regímenes de potencia de los generadores, el control del estado del proceso y los

sistemas automáticos de intercambio de electrodos y piezas, han supuesto, desde entonces, un muy elevado grado de automatización y la posibilidad de trabajar en modo inatendido durante largos períodos de tiempo.

El generador

El generador es uno de los elementos fundamentales de la máquina de electroerosión. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversos tipos. Principalmente se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Generadores de relajación.
- Generadores de impulsos transistorizados.

La tensión de mantenimiento de las descargas cebadas es característica de cada pareja de metales electrodo-pieza y es independiente de la corriente de la descarga.

Así pues, el generador que proporciona los impulsos o descargas erosivas tiene como fundamento el proporcionar la tensión necesaria para el cebado o encendido de la descarga así como para su mantenimiento.

Además, tiene que limitar la corriente de las descargas así como imponer su duración en el tiempo y la frecuencia de sucesión de las descargas.

3.6.1.3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNAs)

Introducción

Existe actualmente una gran tendencia a establecer un nuevo campo de la computación que integraría los diferentes métodos de resolución de problemas que no pueden ser descritos fácilmente mediante un enfoque algorítmico tradicional. Estos métodos tienen su origen en la emulación de sistemas biológicos. Se trata de una nueva forma de computación que es capaz de manejar las imprecisiones e incertidumbres de problemas relacionados con el mundo real (reconocimiento de formas, toma de decisiones, etc.). Para ello se dispone de un conjunto de metodologías como la Lógica Borrosa, el Razonamiento Aproximado, la Teoría del Caos y las Redes Neuronales Artificiales.

Con las Redes Neuronales se busca la solución de problemas complejos, no como una secuencia de pasos, sino como la evolución de unos sistemas de computación inspirados en el cerebro humano, y dotados por tanto de cierta "inteligencia", los cuales no son sino la combinación de elementos simples de proceso (neuronas - se dará una visión rápida sobre el funcionamiento de las mismas en los seres vivos-) interconectados, que

operando de forma paralela en varios estilos que serán analizados detalladamente, consiguen resolver problemas relacionados con el reconocimiento de formas o patrones, predicción, codificación, control y optimización entre otras aplicaciones.

Panorama Histórico

Conseguir, diseñar y construir máquinas capaces de realizar procesos con cierta inteligencia ha sido uno de los principales objetivos y preocupaciones de los científicos a lo largo de la historia. Sin embargo a pesar de disponer de herramientas y de lenguajes de programación diseñados para el desarrollo de máquinas inteligentes, existe un problema de fondo que limita los resultados: estas máquinas se implementan sobre ordenadores basados en la filosofía de Von Neumann, y se apoyan en una descripción secuencial del proceso de tratamiento de la información.

Las primeras explicaciones teóricas sobre el cerebro y el pensamiento fueron dadas por algunos filósofos griegos, como Platón y Aristóteles, quienes fueron apoyados después por Descartes y filósofos empiristas.

Alan Turing, en 1936, fue el primero en estudiar el cerebro como una forma de ver el mundo de la computación, pero quienes primero concibieron algunos fundamentos de la computación neuronal fueron Warren McCulloch y Walter Pitts, después otras teorías iniciales fueron expuestas por Donald Hebb. Pero solo hasta 1957 Frank Rosenblatt comenzó el desarrollo del Perceptrón, la red neuronal más antigua que se explicará posteriormente.

Más adelante apareció el modelo ADALINE, desarrollado por Bernard Widrow y Marcial Hoff.

Stephen Grossberg realizó Avalancha en 1967, hasta 1982 el crecimiento se frenó pero surgieron luego investigaciones sobre redes como la de Marvin Minsky y Seymour Papert, después James Anderson desarrollo el Asociador Lineal, en Japón Kunihiko Fukushima y Teuvo Kohonen que se centraron en redes neuronales para el reconocimiento de patrones; en USA John Hopfield también realizó importantes investigaciones.

Desde 1985 comenzaron a consolidarse los congresos más importantes como Neuronal Networks for Computing, la Neural Information Processing Systems, entre algunas otras.

Actualmente, son numerosos los trabajos que se realizan y publican. Revistas como Neural Networks, Transactions on Neural Networks, entre otras, son las encargadas de la publicación de los últimos avances.

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos, la Sociedad Europea de Redes Neuronales son algunos de los ejemplos del resurgir de la investigación sobre redes neuronales.

El Modelo Biológico

La teoría y modelado de redes neuronales está inspirada en la estructura y funcionamiento de los sistemas nerviosos, donde la neurona es el elemento fundamental.

En general, una neurona consta de un cuerpo celular más o menos esférico, de 5 a 10 micras de diámetro, del que salen una rama principal, el axón, y varias ramas más cortas, llamadas dendritas (ver *Fig. 20*).

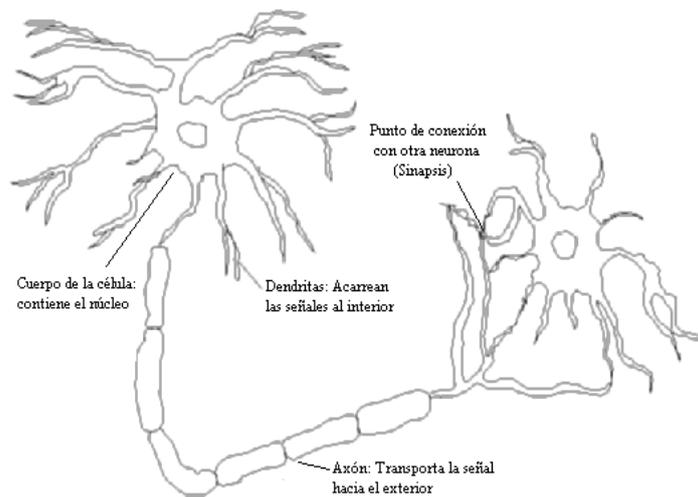


Figura 20. Partes de una Neurona biológica.

Una de las características de las neuronas es su capacidad de comunicarse. En términos generales las dendritas y el cuerpo celular reciben señales de entrada; el cuerpo celular las combina e integra y emite señales de salida. El axón transmite dichas señales a los terminales axónicos, que distribuyen información a un nuevo conjunto de neuronas. Se calcula que en el cerebro humano existen del orden de 10^{15} conexiones.

Las señales que se utilizan son de dos tipos: eléctrica y química. La señal generada por la neurona y transportada a lo largo del axón es un impulso eléctrico, mientras que la señal que se transmite entre los terminales axónicos de una neurona y las dendritas de otra es de origen químico.

Para establecer una similitud directa entre la actividad sináptica y la analogía con las redes neuronales artificiales podemos considerar: Las señales que llegan a la sinapsis son las entradas a la neurona; estas son ponderadas (atenuadas o simplificadas) a través

de un parámetro, denominado peso asociado a la sinapsis correspondiente. Estas señales de entrada pueden excitar a la neurona (sinapsis con peso positivo) o inhibirla (peso negativo). El efecto es la suma de las entradas ponderadas. Si la suma es igual o mayor que el umbral de la neurona, entonces la neurona se activa (da salida). Esta es una situación de todo o nada; cada neurona se activa o no se activa. La facilidad de transmisión de señales se altera mediante la actividad del sistema nervioso. Las sinapsis son susceptibles a la fatiga, deficiencia de oxígeno y la presencia de anestésicos, entre otros. Esta habilidad de ajustar señales es un mecanismo de aprendizaje.

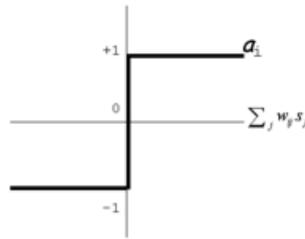
Elementos de una Red Neuronal Artificial

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos que intentan reproducir el comportamiento del cerebro. Como tal modelo, realiza una simplificación, averiguando cuáles son los elementos relevantes del sistema, bien porque la cantidad de información de que se dispone es excesiva o bien porque es redundante. Una elección adecuada de sus características, más una estructura conveniente, es el procedimiento convencional utilizado para construir redes capaces de realizar una determinada tarea. Los elementos de una RNA son los siguientes:

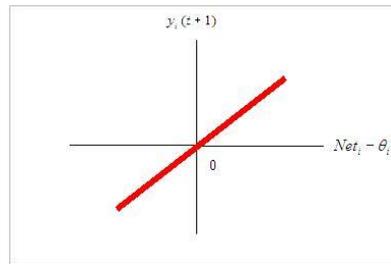
1. Se conoce como *capa o nivel* a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente y cuyas salidas se dirigen al mismo destino.
2. *Unidad de proceso*: La neurona Artificial. Existen tres tipos de unidades en cualquier sistema: entradas, salidas y ocultas. Las unidades de entrada reciben señales desde el entorno; las de salida envían la señal fuera de la red, y las unidades ocultas son aquellas cuyas entradas y salidas se encuentran dentro del sistema.
3. *Estado de Activación*. Los estados del sistema en un tiempo t se representan por un vector $A(t)$. Los valores de activación pueden ser continuos o discretos, limitados o ilimitados. Si son discretos, suelen tomar un conjunto discreto de valores binarios, así un estado activo se indicaría con un 1 y un estado pasivo se representaría por un cero. En otros modelos se considera un conjunto de estados de activación, en cuyo valor entre $[0,1]$, o en el intervalo $[-1,1]$, siendo una función sigmoideal.
4. *Función de Salida o de Transferencia*. Asociada con cada unidad hay una función de salida, que transforma el estado actual de activación en una señal de salida.

Existen cuatro funciones de transferencia típicas que determinan distintos tipos de neuronas:

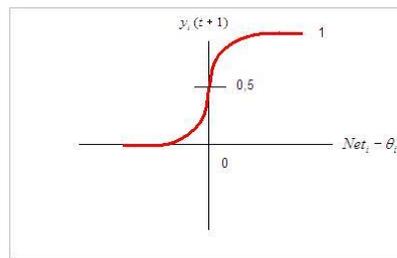
- Función Escalón



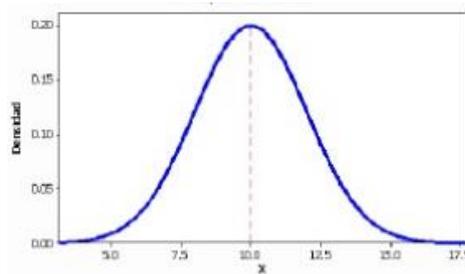
- Función Lineal y Mixta



- Sigmoidal



- Función Gaussiana



5. *Conexiones entre neuronas.* Las conexiones que unen a las neuronas que forman una RNA tiene asociado un peso, que es el que hace que la red adquiera conocimiento. Se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada neta que recibe una neurona es la suma del producto de cada señal individual por el valor de la sinapsis que conecta ambas neuronas y es lo que se conoce como red de propagación. Cuando se evalúa una neurona se debe calcular el conjunto de todas las neuronas o valores (denominado NET) mediante la ecuación 1:

$$NET_i(t) = \sum_{j=1}^{N-1} [W_{ij} \cdot O_j \cdot (t-1)] \quad (1)$$

Se utiliza una matriz W con todos los pesos, Si w_{ji} es positivo indica que la relación entre las neuronas es excitadora, es decir, siempre que la neurona i esté activada, la neurona j recibirá una señal que tenderá a activarla. Si w_{ji} es negativo, la sinapsis será inhibitoria. En este caso si i está activada, enviará una señal que desactivará a j . Finalmente si w_{ji} es 0 se supone que no hay conexión entre ambas. En la *Fig. 21* se representa el esquema de una neurona artificial.

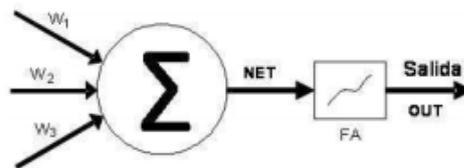


Figura 22. Esquema de una Neurona Artificial.

6. *Función o Regla de Activación. (FA)* Se requiere una regla que combine las entradas con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de activación. Esta función FA produce un nuevo estado de activación en una neurona a partir del estado que existía y la combinación de las entradas con los pesos de las conexiones. Esa FA es denominada función de activación, y las salidas que se obtienen en una neurona para las diferentes formas de F serán:

- Función de Activación Escalón
- Función de Activación Identidad
- Función de Activación Lineal -Mixta
- Función de Activación Sigmoidal

7. *Regla de Aprendizaje.* El aprendizaje puede ser comprendido como la modificación de comportamiento inducido por la interacción con el entorno y como resultado de experiencias conduce al establecimiento de nuevos modelos de respuesta a estímulos externos. En el cerebro humano el conocimiento se encuentra en la sinapsis. En el caso de las RNA el conocimiento se encuentra en los pesos de las conexiones entre neuronas. Todo proceso de aprendizaje implica cierto número de cambios en estas conexiones. En realidad, puede decirse que se aprende modificando los valores de los pesos de la red.

Estructura de una Red Neuronal Artificial

Anteriormente ya se estipuló que la distribución de neuronas dentro de la red se realiza formando niveles o capas de un número determinado de neuronas cada una, y que existen capas de entrada, de salida, y ocultas (ver *Fig. 23*), ahora veamos las formas de conexión entre neuronas.

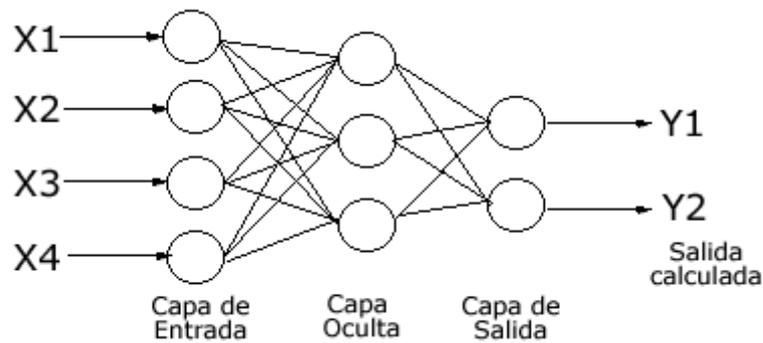


Figura 23. Capas en una RNA.

Cuando trabajamos con grandes cantidades de neuronas, es natural ordenar aquellas que tienen comportamientos similares en “capas”. Cada capa es un vector de neuronas.

Cuando ninguna salida de las neuronas es entrada de neuronas del mismo nivel o de niveles precedentes, la red se describe como de propagación hacia delante (feedforward).

Cuando las salidas pueden ser conectadas como entradas de neuronas de niveles previos o del mismo nivel, incluyéndose ellas mismas, la red es de propagación hacia atrás (feedforward/feedback).

Características de las Redes Neuronales

Existen cuatro aspectos que caracterizan una red neuronal: su topología, el mecanismo de aprendizaje, tipo de asociación realizada entre la información de entrada y salida, y la forma de representación de estas informaciones.

1. *Topología de las Redes Neuronales.* La arquitectura de las redes neuronales consiste en la organización y disposición de las neuronas formando capas más o menos alejadas de la entrada y salida de la red. En este sentido, los parámetros fundamentales de la red son: el número de capas, el número de neuronas por capa, el grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas.

- *Redes Monocapa*: Se establecen conexiones laterales, cruzadas o autorrecurrentes entre las neuronas que pertenecen a la única capa que constituye la red. Se utilizan en tareas relacionadas con lo que se conoce como autoasociación; por ejemplo, para generar información de entrada que se presentan a la red incompleta o distorsionada.
 - *Redes Multicapa*: Son aquellas que disponen de conjuntos de neuronas agrupadas en varios niveles o capas. Una forma de distinguir la capa a la que pertenece la neurona, consiste en fijarse en el origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal de salida. Según el tipo de conexión, como se vio previamente, se distinguen las redes feedforward, y las redes feedforward/feedback.
2. Mecanismo de Aprendizaje. El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas, la creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero, una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero. Se puede afirmar que el proceso de aprendizaje ha finalizado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables ($dw_{ij}/dt = 0$).

Un criterio para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual, o si el aprendizaje supone la desconexión de la red.

Otro criterio suele considerar dos tipos de reglas de aprendizaje: las de aprendizaje supervisado y las correspondientes a un aprendizaje no supervisado, estas reglas dan pie a una de las clasificaciones que se realizan de las RNA: Redes neuronales con aprendizaje supervisado y redes neuronales con aprendizaje no supervisado. La diferencia fundamental entre ambos tipos estriba en la existencia o no de un agente externo (supervisor) que controle el aprendizaje de la red.

Redes con Aprendizaje Supervisado. El proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor, maestro) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor comprueba la salida de la red y en el caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida se aproxime a la deseada.

Se consideran tres formas de llevar a cabo este tipo de aprendizaje:

- *Aprendizaje por corrección de error:* Consiste en ajustar los pesos en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos en la salida de la red; es decir, en función del error.
- *Aprendizaje por refuerzo:* Se basa en la idea de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. La función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 o fracaso = -1), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades.
- *Aprendizaje estocástico:* Este tipo de aprendizaje consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad.

Redes con Aprendizaje No Supervisado. Estas redes no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada es o no correcta, así que existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes.

En algunos casos, la salida representa el grado de familiaridad o similitud entre la información que se le está presentando en la entrada y las informaciones que se le han mostrado en el pasado. En otro caso podría realizar una codificación de los datos de entrada, generando a la salida una versión codificada de la entrada, con menos bits, pero manteniendo la información relevante de los datos, o algunas redes con aprendizaje no supervisado lo que realizan es un mapeo de características, obteniéndose en las neuronas de salida una disposición geométrica que representa un mapa topográfico de las características de los datos de entrada, de tal forma que si se presentan a la red informaciones similares, siempre sean afectadas neuronas de salidas próximas entre sí, en la misma zona del mapa.

En general en este tipo de aprendizaje se suelen considerar dos tipos:

- *Aprendizaje Hebbiano:* Consiste básicamente en el ajuste de los pesos de las conexiones de acuerdo con la correlación, así si las dos unidades son activas (positivas), se produce un reforzamiento de la conexión. Por el contrario cuando una es activa y la otra pasiva (negativa), se produce un debilitamiento de la conexión.
- *Aprendizaje competitivo y cooperativo:* Las neuronas compiten (y cooperan) unas con otras con el fin de llevar a cabo una tarea dada. Con este tipo de aprendizaje se pretende que cuando se presente a la red cierta información de entrada, solo una de las neuronas de salida se active (alcance su valor de

respuesta máximo). Por tanto las neuronas compiten por activarse , quedando finalmente una, o una por grupo, como neurona vencedora

Estos dos mecanismos de asociación dan lugar a dos tipos de redes neuronales: las redes heteroasociativas y las autoasociativas. Una red heteroasociativa podría considerarse aquella que computa cierta función, que en la mayoría de los casos no podrá expresarse analíticamente, entre un conjunto de entradas y un conjunto de salidas, correspondiendo a cada posible entrada una determinada salida. Existen redes heteroasociativas con conexiones feedforward, feedforward/feedback y redes con conexiones laterales. También existen redes heteroasociativas multidimensionales y su aprendizaje puede ser supervisado o no supervisado.

Por otra parte, una red autoasociativa es una red cuya principal misión es reconstruir una determinada información de entrada que se presenta incompleta o distorsionada (le asocia el dato almacenado más parecido). Pueden implementarse con una sola capa, existen conexiones laterales o también autorrecurrentes, habitualmente son de aprendizaje no supervisado.

1. *Tipo de Asociación entre las Informaciones de Entrada y Salida.* Las RNA son sistemas que almacenan cierta información aprendida; esta información se registra de forma distribuida en los pesos asociados a las conexiones entre neuronas de entrada y salida. Existen dos formas primarias de realizar esa asociación de entrada/salida. Una primera sería la denominada *heteroasociación*, que se refiere al caso en el que la red aprende parejas de datos [(A1, B1), (A2, B2)... (A_n, B_n)], de tal forma que cuando se presente cierta información de entrada A_i, deberá responder generando la correspondiente salida B_i. La segunda se conoce como *autoasociación*, donde la red aprende ciertas informaciones A1, A2...A_n, de tal forma que cuando se le presenta una información de entrada realizará una autocorrelación, respondiendo con uno de los datos almacenados, el más parecido al de la entrada.
2. *Representación de la Información de Entrada y Salida.* Las redes neuronales pueden también clasificarse en función de la forma en que se representa la información de entrada y las respuestas o datos de salida. Así un gran número de redes, tanto los datos de entrada como de salida son de naturaleza analógica, cuando esto ocurre, las funciones de activación de las neuronas serán también continuas, del tipo lineal o sigmoideal. Otras redes sólo admiten valores discretos o binarios a su entrada, generando también unas respuestas en la salida de tipo binario. En este caso, las funciones de activación de las neuronas son de tipo escalón. Existe también un tipo de redes híbridas en las que las informaciones de entrada pueden ser valores continuos, aunque las salidas de la red son discretas.

Implementación de las Redes Neuronales

En la búsqueda de sistemas inteligentes en general, se ha llegado a un importante desarrollo del software, dentro de esta línea se encuentran algunos de los neurocomputadores más conocidos. Un neurocomputador es básicamente un conjunto de procesadores conectados con cierta regularidad que operan concurrentemente. En la actualidad ya existen una serie de neurocomputadores comerciales destinados a la realización de redes neuronales. Por otro lado la realización de RNA puede llevarse a cabo por medio de uno o varios circuitos integrados específicos, para así poder obtener una estructura que se comporte lo más similar posible a como lo haría una red neuronal. Otra tecnología que podría ser apropiada en la implementación de las redes neuronales es la tecnología electroóptica, con la ventaja de utilizar la luz como medio de transporte de la información, permitiendo la transmisión, masiva de datos.

La realización más simple e inmediata consiste en simular la red sobre un ordenador convencional mediante un software específico. Es un procedimiento rápido, económico, e instituíble, pero su mayor desventaja radica en el hecho de que se intentan simular redes con un alto grado de paralelismo sobre máquinas que ejecuten secuencialmente las operaciones. Valores intrínsecos de las redes neuronales no pueden obtenerse de esta forma.

Otro método es la realización de redes neuronales a través de arquitecturas orientadas a la ejecución de procesos con un alto de paralelismo, tales como redes de transportes, arquitecturas sistólicas, etc. Este método es una optimización del anterior, ya que el acelera el proceso, permitiendo una respuesta en tiempo real, pero el comportamiento real de la red sigue siendo simulado por una estructura ajena a la estructura intrínseca de una red neuronal.

Una tercera aproximación radicalmente distinta es la realización de redes neuronales mediante su implementación por uno o varios circuitos integrados específicos. Son los llamados chips neuronales. Las neuronas y las conexiones se emulan con dispositivos específicos, de forma que la estructura del circuito integrado refleja la arquitectura de la red. Se consigue de esta forma realizaciones que funcionan a alta velocidad, pero a costa de una pérdida notable de velocidad.

Fases en la implementación de RNAs:

Esta etapa comprende todas las fases necesarias para el desarrollo de una RNA, y comprende las siguientes etapas:

- Diseño de la arquitectura
- Entrenamiento de la red
- Validación de la red.

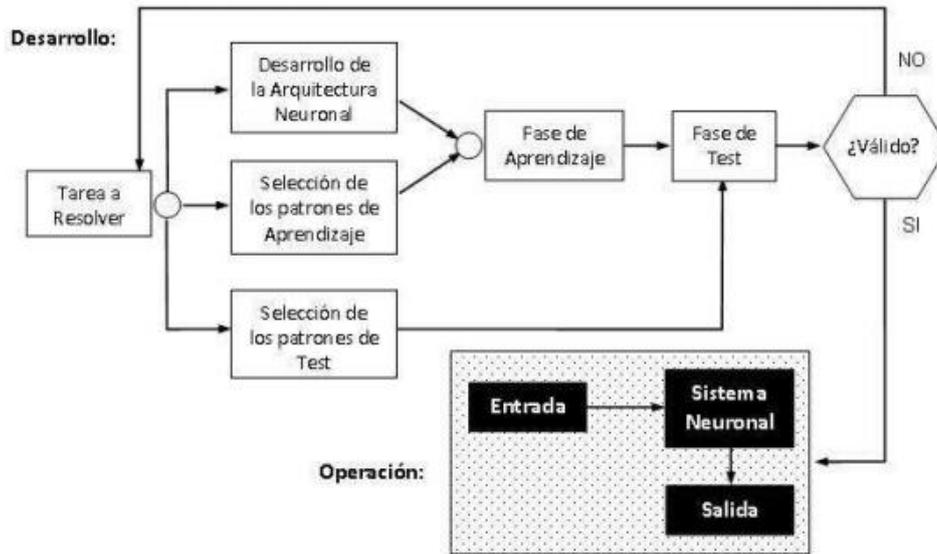


Figura 24. Esquema del desarrollo de una RNA.

Diseño de la arquitectura

En esta fase se determina el número de neuronas que tendrá la red, así como su disposición en capas y la conectividad entre las mismas. A partir de un análisis de los datos del problema, se determina cuántas entradas y salidas tiene la red. Esta etapa es crítica, puesto que la topología de la red determina la representatividad de la misma, y por tanto, la cantidad de conocimiento que puede albergar. La topología de la red debe adecuarse al problema a resolver, y la no existencia de técnicas que realicen esta función hace que haya que recurrir a la experiencia y a la técnica de *ensayo y error*, probando varias topologías diferentes, para finalmente conseguir una que se adapte satisfactoriamente al problema

Esta etapa también alberga el determinar las funciones de activación y transferencia que se usarán (habitualmente las mismas para todas las neuronas).

Fase de Entrenamiento

Norbert Wiener en su libro “Dios y el Golem” proporciona una de las definiciones más neutrales de aprendizaje. Allí define un sistema que aprende como: “Un sistema organizado puede definirse como aquel que transforma un cierto mensaje de entrada en uno de salida, de acuerdo con algún principio de transformación. Si tal principio está sujeto a cierto criterio de validez de funcionamiento, y si el método de transformación

se ajusta a fin de que tienda a mejorar el funcionamiento del sistema de acuerdo con ese criterio, se dice que el sistema aprende”.

Uno de los principales objetivos de los sistemas autónomos es emular la habilidad que posee el hombre para interactuar con el ambiente y aprender de dichas interacciones. Es así como necesitan de una estructura flexible, capaz de desempeñarse en ambientes de operación dinámicos sujetos a diversas incertezas y perturbaciones. Dentro de las aproximaciones existentes en la teoría de la Inteligencia Artificial, surgen las Redes Neuronales Artificiales como elementos capaces de proveer de dicha estructura flexible, mediante la integración con diferentes sistemas de aprendizaje. Tales sistemas están orientados hacia diferentes operaciones y como ya se ha explicado previamente pueden clasificarse en dos tipos: aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado.

Una vez diseñada la arquitectura de la red y las funciones que la regirán, se tiene que proceder a entrenar la red para que aprenda el comportamiento que debe tener, es decir, para que aprenda a dar la respuesta adecuada a la configuración de estímulos o patrones de entrada que se le presenten.

En la vida de las redes con comportamiento aprendido se distinguen dos fases o periodos claramente diferenciados. Durante la fase de aprendizaje se entrena a la red para que vaya modificando sus pesos sinápticos, adaptándolos paulatinamente para que la respuesta de la red sea correcta. Después bien la fase de funcionamiento real o fase de ejecución, durante la cual la red ya es operativa y sus pesos sinápticos no volverán a ser modificados. Durante esta fase se usa la red como si se tratara de cualquier programa informático convencional.

Aprendizaje supervisado

Con esta técnica de aprendizaje el entrenamiento consiste en presentarle a la red repetitivamente patrones de estímulos de entrada pertenecientes a un juego de ensayo. El juego de ensayo está formado por parejas “patrón de estímulos- respuesta correcta” y debe ser elegido cuidadosamente. Cada pareja se denomina hecho. En el juego de ensayo debe estar representada equilibradamente toda la información que la red necesite aprender.

Al realizar el entrenamiento la respuesta que da la red a cada patrón se compara con la respuesta correcta ante dicho patrón, y en virtud de esa comparación se reajustan los pesos sinápticos.

Cuando ante un patrón de entrada la red de neuronas ya responde correctamente, se pasa al siguiente patrón de juego de ensayo y se procede de la misma manera.

Cuando se termina con el último patrón del juego de ensayo, se tiene que volver a empezar con el primero, ya que los pesos se han ido modificando. En casos sencillos al cabo de unos pocos pasos de entrenamiento completos, con todos los elementos del juego de ensayo, los pesos sinápticos de todas las neuronas se estabilizan en torno a

unos valores óptimos. Se dice entonces que el algoritmo de aprendizaje converge. Es decir, después de sucesivas presentaciones de todos los patrones estimuladores del juego de ensayo, la red, responderá correctamente a todos ellos y se puede considerar entrenada y dar por terminada la fase de aprendizaje.

Aprendizaje no supervisado

En este tipo de aprendizaje, no se especifica cuál debe ser la respuesta correcta; es decir, no hay una comparación entre la respuesta de la red y la respuesta deseada. Además, en este modelo de aprendizaje no existe ninguna influencia externa de la red, puesto que no se le informa de si un resultado fue correcto o no; tan sólo se le suministran grandes cantidades de datos con los que la red puede construir sus propias asociaciones. Se necesita, por tanto, una cantidad mucho mayor de patrones de entrada durante el entrenamiento para que la red pueda ajustar correctamente sus pesos sinápticos.

En este tipo de aprendizaje lo que de hecho se está haciendo es exigirle a la red que capte por sí misma alguna de las características presentes en los datos de entrada. Se pretende que las neuronas se auto-organicen aprendiendo a captar las regularidades de los datos de entrada sin suministrarles ningún tipo de criterio ayuda externa que dirija dicha autoorganización.

Problemas comunes en el entrenamiento

Uno de los problemas más comunes al entrenar una RNA es que la red no se entrene con precisión suficiente; es decir, que tenga un alto porcentaje de fallos. Cuando esto sucede se deberá analizar el diseño de la red y del juego de ensayo. Si los resultados son pobres es preciso comprobar el juego de ensayo. Tal vez se haya olvidado representar en el juego de ensayo alguno de los problemas tipo con los que la red debe enfrentarse, o la información sea engañosa o contradictoria. Se tendrá en cuenta que, cuando se modifica el juego de ensayo añadiendo nuevos hechos o corrigiendo alguno de los existentes, la red debe ser entrenada de nuevo con la totalidad de los hechos y no tan sólo con los nuevos o con los corregidos. Una forma de determinar qué hechos están produciendo problemas es entrenar la red hasta que responda con un nivel de aciertos aproximadamente del 90%. Luego al probar la red, se observan los hechos a los cuales la red responde mal. A continuación se le deberá proporcionar a la red una mayor información similar a la de los hechos no aprendidos y se entrenará de nuevo. Si se llega a la conclusión de que se le han dado suficientes hechos a la red, es decir, que el juego del ensayo es completo y cubre todos los problemas a resolver y ésta sigue comportándose poco satisfactoriamente, habrá que considerar la posibilidad de cambiar el modo de presentar la información de entrada a la red.

Una situación muy común es entrenar la red con un juego de ensayo que contiene ruido, puesto que en el mundo real en muchas ocasiones no se puede eliminar todo el ruido de las mediciones que se realizan. Cualquier algoritmo de aprendizaje máquina que sea capaz de aprender y ofrecer una precisión al 100%, ha aprendido los patrones de

entrenamiento y el ruido de los mismos, sin llegar a discriminarlo, es decir, ha perdido capacidad de generalización.

El proceso de entrenamiento tiende a minimizar el error que se consigue en el conjunto de entrenamiento durante el mismo, (ver Fig. 25a). Sin embargo, si durante el entrenamiento se realizan tests a la red con patrones que no se presentan durante el entrenamiento, el error observado en estos tests no tiende siempre a minimizarse, como puede verse en la Fig.25b, sino que llega a un punto en el que la red empieza a sobreentrenarse y perder la capacidad de generalización, por eso se comporta mal en los test.

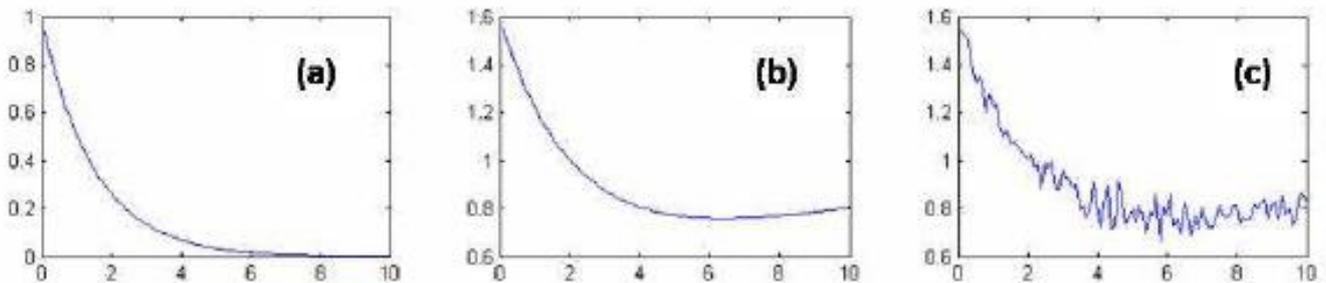


Figura 25. Evolución del error durante la fase de entrenamiento.

Una solución a este problema podría ser realizar test durante el entrenamiento, y detectar el punto en el que el error en el test empieza a crecer (valor 6 en el eje de abscisas en la Fig.25c).

Fase de validación o test

Tras la fase de entrenamiento viene la fase de ejecución, durante la cual se pedirá a la red que responda a estímulos diferentes a los presentados durante la fase de entrenamiento. Gracias a los ejemplos aprendidos del juego de ensayo, la red deberá ser capaz de generalizar y dar respuestas correctas ante patrones de estímulos nuevos.

En otras palabras, una vez terminado el entrenamiento, una red puede generalizar; es decir, ante entradas similares a las de su juego de ensayo, producirá salidas correctas. Hay que tener en cuenta que es muy difícil conseguir la capacidad de generalización sin utilizar grandes cantidades de datos que estos sean muy variados.

Para operar con una red entrenada, el proceso es el mismo que cuando se realizaba el entrenamiento. Por lo tanto, se sigue suministrando información de entrada a la red, sólo

que ahora no se realizará ningún ajuste en los pesos sinápticos. La red reconocerá o evaluará y dará una respuesta a partir de los pesos establecidos durante el entrenamiento.

Para conseguir el mejor rendimiento de generalización, los datos usados para el entrenamiento deben cubrir un rango de hechos suficientemente amplio. En general, cuando aumenta el tamaño y variedad del juego de ensayo disminuye la necesidad de que los datos de entrada durante la fase de trabajo normal se parezcan mucho a los patrones del juego de ensayo; es decir, la red generalizará mejor. En el juego de ensayo debe haber suficientes hechos, es decir, parejas “patrones de estímulos-respuesta correcta”. Además, los hechos del juego de ensayo deberán cubrir ampliamente la totalidad de las características a los que la red debe enfrentarse.

Por otra parte a una red evaluadora es importante mostrarle tanto los patrones de entrada que llevan a respuestas positivas, como los patrones de entrada que llevan a evaluaciones negativas, ya que, de lo contrario, la red simplemente aprenderá que todo está correcto siempre.

Además no se puede incluir en el juego de ensayo una colección exageradamente grande de hechos. Es necesario seleccionar aquellos hechos que reflejen claramente cada uno de los patrones a reconocer y las situaciones extremas de evaluación en una red evaluadora.

Lo ideal es preparar una colección amplia de hechos de entrenamiento que cubran todos los problemas a los que se pueda tener que enfrentar la red. A continuación, se seleccionarán algunos de ellos para el juego de ensayo, procurando que todos los problemas queden bien representados.

Ventajas de las Redes Neuronales

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las RNA presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Como se ha ido comentando, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas. Estas ventajas incluyen:

1. *Aprendizaje Adaptativo*: Es una de las características más atractivas de las redes neuronales, es la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o una experiencia inicial.

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan unos resultados específicos. Una RNA no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de los pesos de los enlaces mediante el aprendizaje. También existen redes que continúan aprendiendo a lo largo de su vida, después de completado el periodo inicial de entrenamiento.

La función del diseñador es únicamente la obtención de la arquitectura apropiada. No es problema del diseñador el cómo la red aprenderá a discriminar; sin embargo, si es necesario que desarrolle un buen algoritmo de aprendizaje que proporcione la capacidad de discriminar de la red mediante un entrenamiento con patrones.

2. *Autoorganización:* Las redes neuronales usan su capacidad de aprendizaje adaptativo para organizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Una RNA puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje. Esta autoorganización provoca la facultad de las redes neuronales de responder apropiadamente cuando se les presentan datos o situaciones a los que no habían sido expuestas anteriormente.
3. *Tolerancia a Fallos:* Comparados con los sistemas computacionales tradicionales, los cuales pierden su funcionalidad en cuanto sufren un pequeño error de memoria, en las redes neuronales, si se produce un fallo en un pequeño número de neuronas, aunque el comportamiento del sistema se ve influenciado, sin embargo no sufre una caída repentina.

Hay dos aspectos distintos respecto a la tolerancia a fallos: primero, las redes pueden aprender a reconocer patrones con ruido, distorsionados, o incompleta. Segundo pueden seguir realizando su función (con cierta degradación) aunque se destruya parte de la red.

La razón por la que las redes neuronales son tolerantes a fallos es que tienen su información distribuida en las conexiones entre neuronas, existiendo cierto grado de redundancia en ese tipo de almacenamiento, a diferencia de la mayoría de los ordenadores algorítmicos y sistemas de recuperación de datos que almacenan cada pieza de información en un estado único, localizado y direccionable.

4. *Operación en Tiempo Real:* Los computadores neuronales pueden ser realizados en paralelo, y se diseñan y fabrican máquinas con hardware especial para obtener esta capacidad.
5. *Fácil inserción dentro de la tecnología existente.* Debido a que una red puede ser rápidamente entrenada, comprobada, verificada y trasladada a una implementación hardware de bajo costo, es fácil insertar RNA para aplicaciones

específicas dentro de sistemas existentes (chips, por ejemplo). De esta manera, las redes neuronales se pueden utilizar para mejorar sistemas de forma incremental, y cada paso puede ser evaluado antes de acometer un desarrollo más amplio.

Aplicaciones de las Redes Neuronales

Las redes neuronales son una tecnología computacional emergente que puede utilizarse en un gran número y variedad de aplicaciones, tanto como comerciales como militares.

Hay muchos tipos diferentes de redes neuronales, cada uno de los cuales tiene un aplicación particular más apropiada. Separándolas según las distintas disciplinas algunos ejemplos de sus aplicaciones son:

Biología:

- Aprender más acerca del cerebro y otros sistemas.
- Obtención de modelos de la retina.

Empresa:

- Reconocimiento de caracteres escritos.
- Identificación de candidatos para posiciones específicas.
- Optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo.

Explotación de bases de datos:

- Evaluación de probabilidad de formaciones geológicas y petrolíferas.
- Síntesis de voz desde texto.

Medio Ambiente:

- Analizar tendencias y patrones.
- Previsión del tiempo.

Finanzas:

- Previsión de la evolución de los precios.
- Valoración del riesgo de los créditos.
- Identificación de falsificaciones.
- Interpretación de firmas.
- Manufacturación

Robots automatizados y sistemas de control (visión artificial y sensores de presión, temperatura, gas, etc.):

- Control de producción en líneas de proceso.
- Inspección de calidad.
- Filtrado de señales.

Medicina:

- Analizadores del habla para la ayuda de audición de sordos profundos.
- Diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas y/o de datos analíticos (encefalograma, etc.).
- Monitorización en cirugía.
- Predicción de reacciones adversas a los medicamentos.
- Lectoras de Rayos X.
- Entendimiento de causa de ataques epilépticos.

Militares:

- Clasificación de las señales de radar.
- Creación de armas inteligentes.
- Optimización del uso de recursos escasos.

3.6.2. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se explicarán los procedimientos que se han aplicado para alcanzar el objetivo de estudio.

3.6.2.1. INTRODUCCIÓN

Como ya se ha especificado en el apartado “3.3. Descripción del problema”, el objetivo principal del presente proyecto se basa en el estudio de la caracterización del error en trayectorias circulares dentro del proceso de mecanizado de electroerosión por hilo (WEDM), con el fin de optimizar el mismo, haciendo uso para ello de un modelo predictivo a través de la implementación de una Red Neuronal Artificial (RNA).

Para ello, tal y como se ha concretado previamente, se han cortado un número reducido de probetas en diversos espesores y radios tal y como muestra la siguiente tabla:

Espesor (H) en mm	Radios (R) en mm
H40	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20
H70	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20
H100	1 - 1.5 - 3
	5 - 9 - 12
	15
	20

Tabla 1. Espesores y radios cortados.

En las filas que aparecen tres números (1 – 1.5 – 3, por ejemplo), significa que se han cortado los tres radios en la misma probeta (ver Fig. 1).



Figura 1. Probeta de espesor 40 (H40) y radios 5, 9 y 12 mm.

En cuanto a la elección de los espesores de las probetas se tuvo en cuenta los requerimientos genéricos de la propia industria, ya que a nivel industrial y en cuanto a la aplicación más directa del estudio, que podrían ser punzones de troquelaría por ejemplo (ver Fig. 2), los espesores más comúnmente utilizados en la misma se sitúan en un rango de entre 40 mm y 100 mm siendo los más utilizados estos últimos. Así mismo la empresa *ONA ELECTROEROSIÓN* recomienda ensayar dichos espesores en estudios de investigación y optimización de proceso.

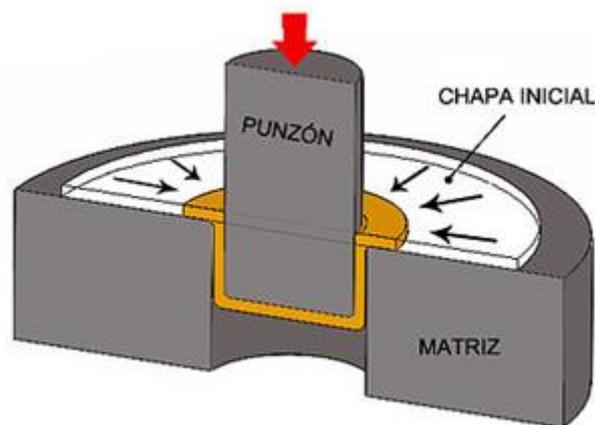


Figura 2. Conjunto punzón cilíndrico – matriz.

En cuanto a los radios cortados, en un principio se cortaron todos los que aparecen en la *Tabla 1*, pero, tal y como se explicará más adelante los radios de 1 y 1.5 mm se descartaron a la hora de entrenar la RNA, ya que se vio que hasta radio 2,5 – 3 mm hay pérdida de presión y, por tanto, el fenómeno es distinto. En el inicio se escogió 1 mm como radio más pequeño, puesto que en la empresa ONA tienen la siguiente clasificación:

- $R < \approx 0,3$ mm: arista viva
- $\approx 0,3 < R < 1$ mm: radios de redondeo

- $1 \text{ mm} < R$: círculos

Por tanto, el radio mínimo se cogió el primer ‘círculo’, es decir, 1 mm. El radio más grande se tomó R20 mm ya que a nivel de investigación en electroerosión por hilo, un radio mayor de 20 mm ya no se considera radio de un círculo sino trayectoria curva y como se pueden observar en los resultados ensayados con la tecnología estándar de ONA (más adelante se explicará en qué consiste dicha tecnología), que se muestra un ejemplo en la Fig. 3, los resultados para este radio son ya significativamente buenos como para incluso poder haber desechado este radio a la hora de entrenar la RNA. Cuando se habla de resultados buenos, quiere decir que las desviaciones con respecto al radio nominal de los diferentes puntos medidos, son muy pequeñas tal y como se aprecia en la *Figura 3*:

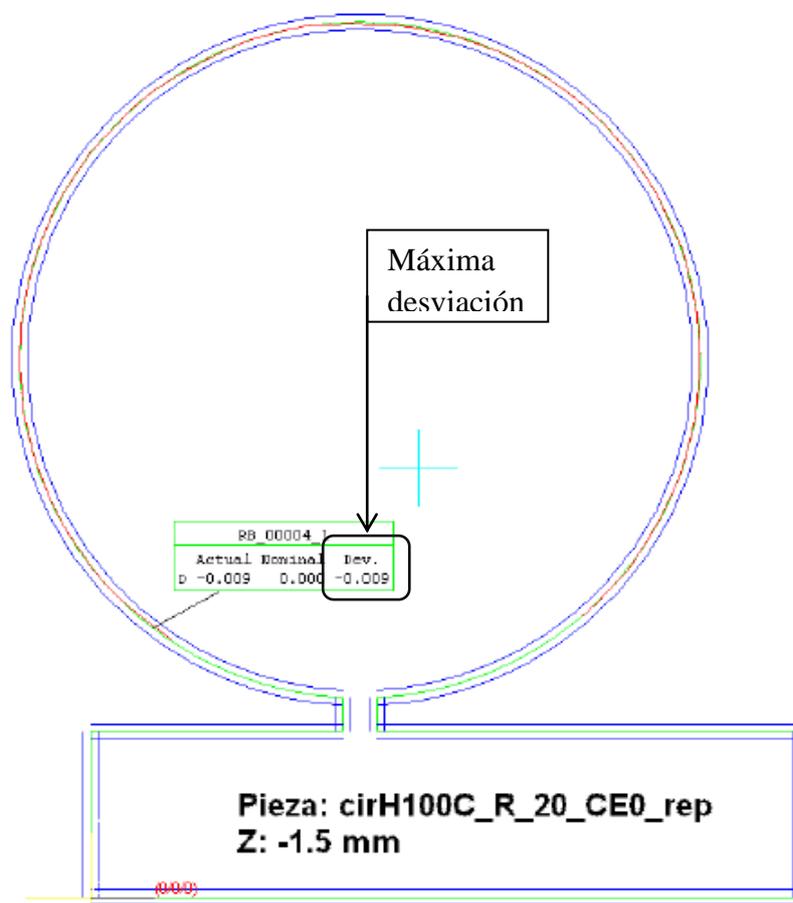


Figura 3. Imagen que muestra la desviación máxima en la probeta de espesor 100 y radio 20 mm.

En la Fig. 3 se observa una desviación máxima de 0.009 mm es decir $9 \mu\text{m}$. Como se explicará más adelante se trata de una desviación muy pequeña respecto a la medida nominal de un punto cualquiera.

3.6.2.2. PUESTA A PUNTO Y PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN DE LA MÁQUINA DE WEDM.

Antes de comenzar con los ensayos en la máquina de electroerosión por hilo utilizada ONA AX3 (ver Fig.4), la empresa ONA ELECTROEROSIÓN, efectuó mediante un técnico una exhaustiva verificación y puesta a punto de dicha máquina de manera que se comprobaron si las velocidades de corte se ajustaban a las nominales, si las guías por donde discurre el hilo de latón se encontraban en perfecto estado y si la verticalidad del mismo era la óptima. Todo esto para asegurar que los resultados de los diferentes ensayos fuesen adecuados.



Figura 4. Máquina de WEDM ONA AX3

Protocolo de verificación de la Máquina de WEDM.

El protocolo de verificación completo es necesario hacerlo cuando no se tiene la seguridad de que la máquina esté puesta a punto. Algunos de los puntos se han de comprobar más frecuentemente:

- Ajuste del chorro de enhebrado
- Búsqueda de los ceros máquina
- Cálculo de la verticalidad del hilo

Estado de las tomas de corriente

Se comprueba que las tomas de corriente superior e inferior no están muy gastadas (la marca del hilo no es demasiado profunda): si es así, se modifica la posición de las mismas. Unas tomas de corriente muy gastadas pueden dar lugar a continuas roturas de hilo durante la erosión, además de reducir su tensión, lo cual puede dar lugar a defectos en los distintos ensayos.



Figura 5. Comprobación de tomas de corriente.

Caudal de limpieza en los repasos

Los repasos se realizan con dieléctrico 2, que se corresponde con, aproximadamente, un caudal de 2 litros/min. Para calcular este caudal se mide el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de 1 litro con dieléctrico 2 (en la tabla de tecnología), recogiendo el agua de la boca superior. El caudal correcto es llenar 1 litro en, aproximadamente, 30s (en la máquina AX3 el variador de caudal está ajustado para que, con el parámetro de dieléctrico 2, el caudal sea de 1litro/min aproximadamente).

Cálculo del caudal real de la máquina	
Tiempo en llenar 1 litro	X segundos (X/60 minutos)
Caudal (número de litros en 1 minuto)	60/X (litros/min)

Ajuste de las tensiones de hilo

La medida se realiza mediante un medidor de tensión de hilo y con el hilo en marcha. Con un hilo de latón 0.25 mm, 900N/mm² y una tensión de hilo seleccionada de 18, con las tomas de corriente en OFF / ON, deben medirse los siguientes valores:

Ajuste de tensión de hilo	
Th: 18 OFF	aprox. 1150 gramos
Th: 18 ON	aprox. 1200 gramos

La máquina ya sale ajustada de manera que entre las posiciones OFF – ON la diferencia de tensiones sea aproximadamente de 50 gramos. Hay que verificar que la toma de corriente superior se desplaza cuando se cambian las posiciones de OFF a ON y que, en la posición ON, el hilo toca la toma (hace presión sobre la toma de corriente). Si en la posición ON la tensión de hilo medida es diferente, en la página del control de máquina donde se regulan las tensiones de hilo, se modifica el valor de OFFSET de hilo hasta que en la posición ON una tensión de hilo 18 corresponda a 1200 gramos.

También hay que comprobar que en esta posición ON con una tensión de hilo de 30 la tensión medida es de aproximadamente 2000 gramos.

Si hubiera algún problema con el desplazamiento de la toma, de manera que la diferencia de tensiones ON – OFF no es la adecuada, o de que la tensión del hilo en la posición OFF no es la correcta, entonces hay que proceder a un ajuste mecánico, sería un fallo.

En el caso de las máquinas AX3 se regula la distancia de un prisionero con el cual hace tope el desplazamiento de la toma superior.

Ajuste del chorro de enhebrado

Para un correcto enhebrado del hilo se hace necesario tener bien alineado el chorro de enhebrado (ver su activación con el mando). Para comprobar su verticalidad se coloca en la boquilla inferior un cono de manera que, activando el chorro, éste coincida con el extremo del cono. Si no coincide, está desplazado y hay que ajustarlo mediante los 3 tornillos de la boquilla superior que regulan la dirección de salida del mismo.

Búsqueda de los ceros máquina

Con el mando y en modo manual seleccionamos *búsqueda de ceros*. En las máquinas modelo AF con pulsar 1 eje de coordenadas (por ejemplo X) la máquina va buscando automáticamente los ceros máquina en todos los ejes sucesivamente: X - Y – Z – U – V, desplazándose las bocas superior e inferior. En la máquina AX3 no se realiza la búsqueda en todos los ejes al pulsar en uno de ellos, sino que hay que ir pulsando cada eje individualmente.

Para la búsqueda de ceros hay que partir de una posición vertical, si hay desplazamientos previos en U y/o V, pueden ocurrir colisiones. El orden de búsqueda sería X – Y – Z – U – V. Después de la búsqueda de ceros, U y V estarán desplazados y

hay que ponerlos en vertical. En esta posición, seleccionando coordenadas de trabajo, U y V deben estar a cero.

Cálculo de la verticalidad del hilo

Se enhebra el hilo en el interior de la anilla de verticalidad y activando la verticalidad se inicia el cálculo. Se desplaza el cabezal de la máquina y a diferentes alturas realiza sucesivos centrados de hilo en la anilla hasta obtener la verticalidad del hilo con una tolerancia de verticalidad de 0,01mm. Es muy importante que la verticalidad del hilo sea la óptima con el fin de que el corte sea preciso en todo el espesor de la pieza.

Corte de acero/ latón 0,25 H = 60mm C+2R (Todos los modelos)

Tecnología Standard de ONA: s_st25lt.tec

Seleccionamos el hilo con el que queremos cortar, ya que ello determinará el ciclo de corte y enhebrado de hilo, así como la corrección de esquinas.

Se activan los sistemas de protección estándar: RINI y protección de erosión.

La distancia entre la pieza y las boquillas no debe ser inferior a 0,20mm (cala de 0,20)

Se carga la tecnología de corte: s_st25lt.tec (limpieza buena) y el programa de corte, que será un cuadrado de lado 10mm donde se incluye desbaste y 2 repasos.

Verificación:

Velocidad de corte en el DESBASTE.

Velocidad media en el REPASO 1

Comprobar que en el REPASO 2 la velocidad es la limitada.

Medir con un micrómetro las 2 caras del cuadrado, comprobando que la verticalidad de la pieza es inferior a 0,01mm y la medida es correcta.

La rugosidad de la pieza debe ser aprox. 0,63Ra (16VDI)

Esta rugosidad deberá ser uniforme en todas las caras y a lo largo de cada una de ellas.

Corte de acero / latón 0,25mm, H = 40mm, C+4R (AF-25 – AF-35 –AF-60)

Tecnología: p_st25lt.tec

Después de verificar que el corte anterior está bien, se realiza la misma geometría en un espesor inferior pero con 4 repasos.

Verificación:

- Velocidad de corte en el DESBASTE.
- Velocidad media en el REPASO 1.
- Velocidad media en el REPASO 2.
- Comprobar que en el REPASO 3 la velocidad es la limitada.
- Comprobar que en el REPASO 4 la velocidad es próxima a la limitada, admitiéndose pequeñas variaciones de manera que quede bien repasada y sin marcas o rayas debidas a las variaciones de velocidad o por no repasar bien (marcas oscuras de mayor Ra).

Medir con un micrómetro las 2 caras del cuadrado, comprobando que la verticalidad de la pieza es inferior a 0,010mm (alrededor de 0,005mm) y la medida es correcta. La rugosidad de la pieza debe ser aprox. 0,32Ra (10VDI). Esta rugosidad deberá ser uniforme en todas las caras y a lo largo de cada una de ellas.

Material necesario

- Recipiente para la medición del caudal de agua.
- Medidor de tensiones de hilo.
- Cono para la verificación del chorro de enhebrado (se entrega con la máquina).
- Anilla de verticalidad (se entrega con la máquina).
- Calas de espesores 0,15 – 0,20 – 0,25 etc.
- Micrómetro (0 – 20mm).
- Rugosímetro.
- Material: acero en los espesores de 60mm y 40mm.
- Bobina de hilo de latón 0,25mm de 900N/mm².

3.6.2.3. DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE PROBETAS Y PROCEDIMIENTO CAD/CAM

A continuación se detallará el procedimiento de diseño de las probetas mediante un programa CAD, que en este caso el utilizado ha sido *Siemens Unigraphics NX 9.0*, y su posterior simulación de mecanizado mediante dicho programa, con el fin de obtener el postprocesado de las geometrías de las distintas probetas en lenguaje CNC, y proceder al corte por electroerosión mediante la máquina de WEDM ONA AX3.

Diseño CAD de las probetas.

Siempre se parte de la base de la necesidad de llevar a cabo un ahorro de cantidad de material mecanizado; en este caso las probetas, como se explicará en el siguiente apartado “3.6.2.4. Corte de las probetas”, se cortan en tochos de acero tratado térmicamente de tres espesores diferentes (40, 70 y 100 mm), cuyo precio es elevado, con lo que el ahorro de material es imprescindible.

Para llevar a cabo dicho ahorro de material y que el corte y medición de las probetas se den en condiciones óptimas, es necesario que en el diseño de las mismas se tengan en cuenta diversos aspectos:

- **Medición con la máquina de medir por coordenadas (MMC):** Las probetas se han medido mediante dicha máquina, y como se explicará en el apartado “3.6.2.5. Medición de las probetas”, para alinear a la perfección la probeta, con el fin de buscar el cero pieza y que la MMC tenga una referencia exacta a la hora de palpar los distintos puntos del contorno de los círculos, las probetas han de tener suficiente superficie en tres planos perpendiculares entre sí (ver Fig. 7), como para que el palpador de la MMC pueda “tocar” por ejemplo tres puntos que no estén en línea recta, y así crear un plano.

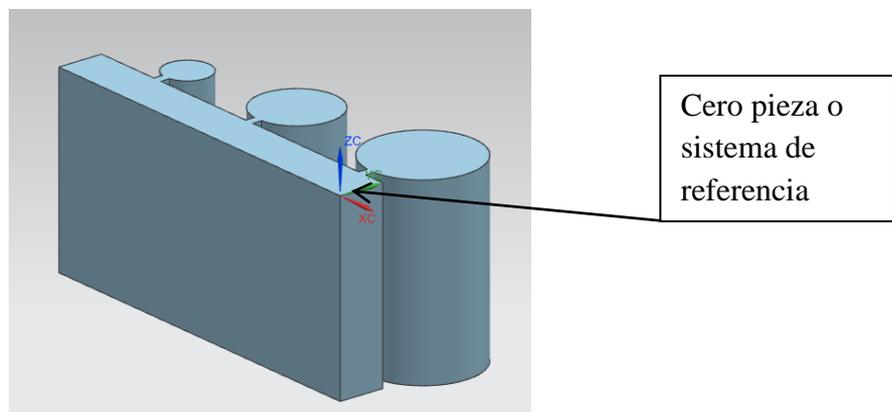


Figura 6. Geometría de la probeta de espesor 40 mm y radios 5, 9 y 12 mm.

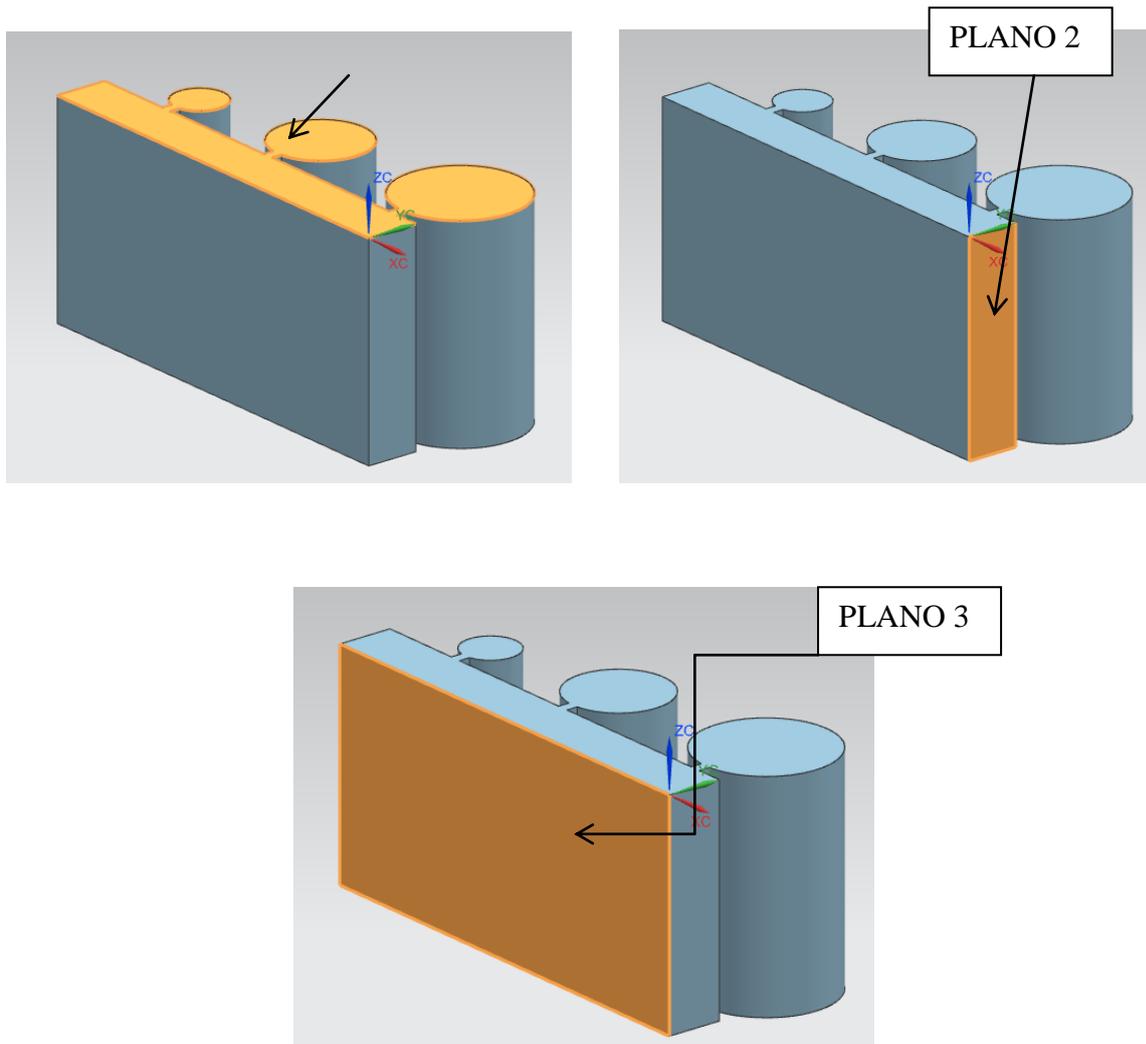


Figura 7. Planos que se han de “palpar” mediante la MMC para conseguir el cero pieza.

- Facilidad de manipulación y almacenamiento:** Esto es, las probetas de radios más pequeños, es decir, 1, 1.5, 3, 5, 9 y 12 mm se han cortado de tal manera que en cada probeta se puedan medir tres radios, es decir, se ha cortado para cada espesor una probeta con tres radios 1, 1.5 y 3 mm, y otra, también para los tres espesores, de radios 5, 9 y 12 mm, con el fin de tener menos radios de probetas individuales y que sea más sencillo localizarlos y almacenarlos. Los radios de 15 y 20 mm se han cortado como probetas únicas debido a las dimensiones de los tochos de acero templado, y a las propias dimensiones de los círculos de dichas probetas (en definitiva diámetros de 30 y 40 mm).

- **Espacio entre distintos cortes:** Como se ve en la *Figura 8*, debe haber un espacio mínimo entre cada corte en todas las direcciones, de al menos 4 mm, puesto que las boquillas de la máquina de WEDM por donde discurre el hilo y el dieléctrico a presión (agua desionizada en este caso) tienen un diámetro de 7 mm, lo que equivale a un radio de 3.5 mm \approx 4 mm, por lo que se hace necesario para que el dieléctrico fluya a la presión adecuada y elimine la escoria sobrante durante el proceso de corte, que exista al menos 4 mm de material entre cada corte. Llevando esto a cabo se da un considerable ahorro de material.

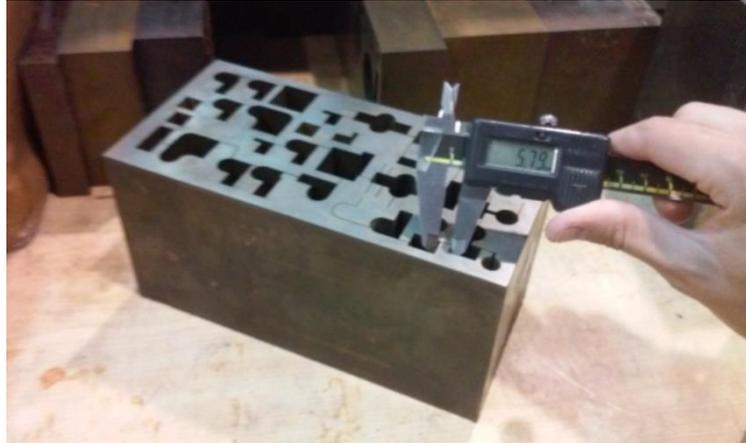


Figura 8. Tocho de acero templado con distintos cortes.

- **Entrada del palpador de la MMC:** Como se desarrollará más adelante en el apartado “3.6.2.5. *Medición de las probetas*”, el palpador de la Máquina de medir por coordenadas (MMC), al aproximarse a “palpar” los diferentes puntos de la parte inferior de los cilindros de las probetas (ver *Fig. 9*), debe haber el suficiente espacio entre cada cilindro como para que no se de una colisión del palpador con la probeta, con el consiguiente descalibrado del palpador y errores en la medición.

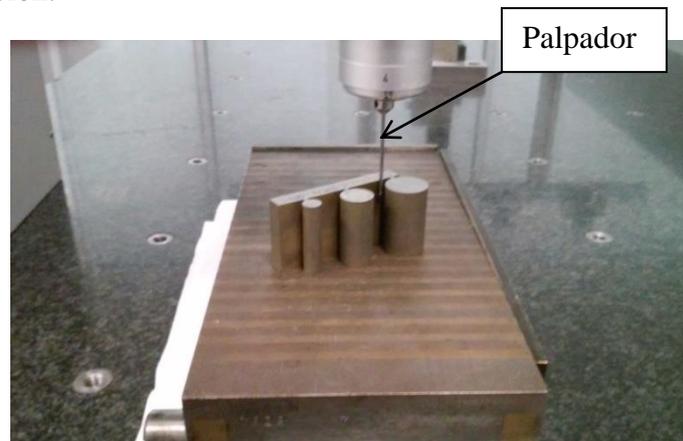


Figura 9. Palpador de la MMC.

Teniendo en consideración los anteriores aspectos de diseño se llegó a un diseño general para todas las probetas, teniendo en cuenta que cada una al tener radios distintos los cilindros, la longitud de un tramo u otro variará (Ver Fig. 11 (a) y (b)), pero las siguientes cotas se mantuvieron fijas para todas las probetas:

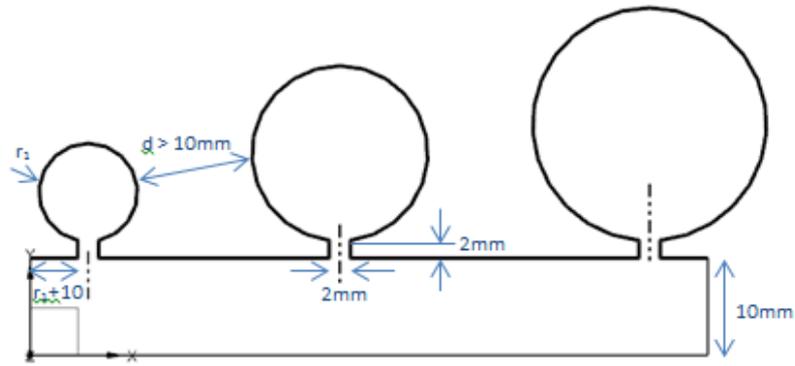


Figura 10. Cotas fijas para todas las probetas.

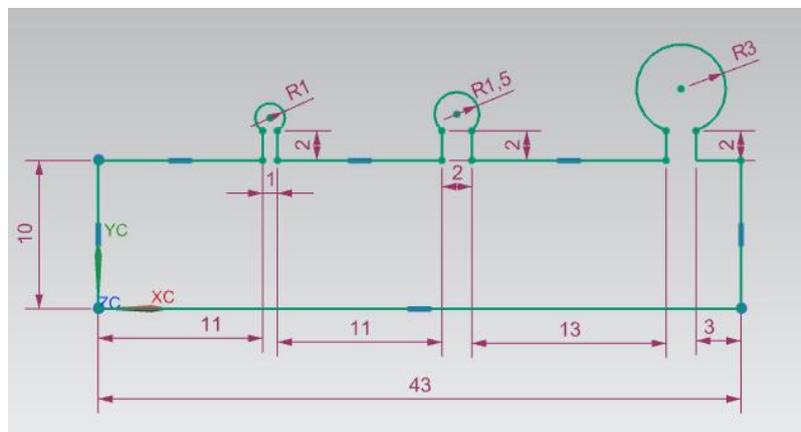
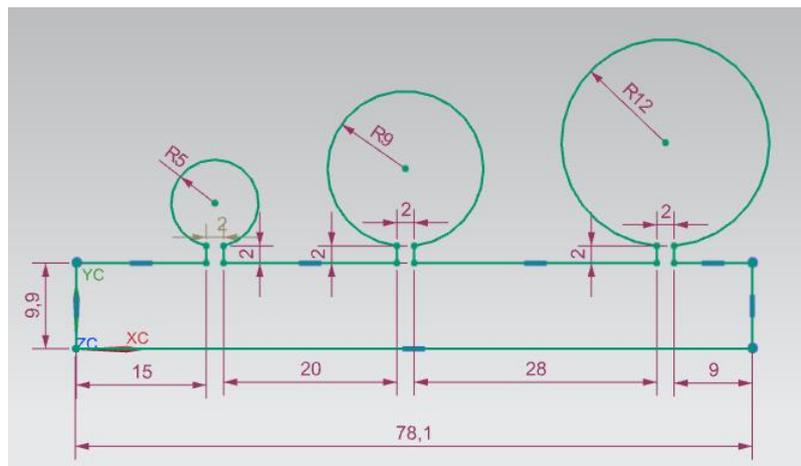


Figura 11 (a) y (b). Cotas para probetas de distintos radios.

En el documento “5.1. Planos” de los ANEXOS, se adjuntan los planos detallados de todas las probetas cortadas en el estudio.

Procedimiento de creación del CAM de las probetas

Una vez creado el CAD mediante *Unigraphics NX 9.0* (ver *Fig.11*), comienza el proceso de fabricación asistida por ordenador mediante el mismo, es decir el proceso de CAM (*Computer Aided Manufacturing*). El objetivo de éste es obtener el postprocesado de la pieza diseñada (el CAD) en lenguaje CNC, de tal forma que la máquina de electroerosión por hilo ONA AX3, pueda cortar la geometría especificada en dicho postprocesado.

- 1. Extrusión del perfil de la probeta:** el primer paso es extruir el perfil creado para cada probeta (ver *Fig.11*), es decir dotarle de un espesor a dicho perfil. Al tener tres espesores diferentes las sucesivas extrusiones serán de 40, 70 y 100 mm:

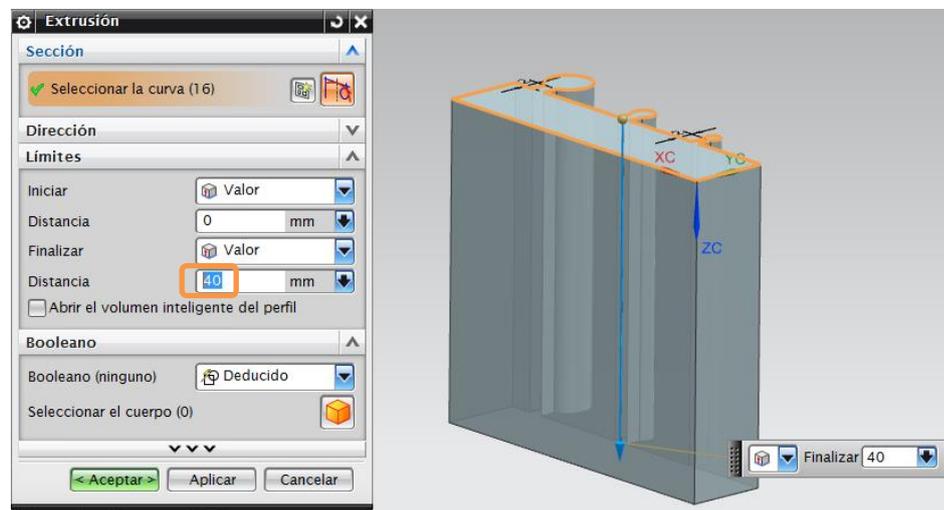


Figura 12. Extrusión de la probeta de radios 1, 1.5 y 3 mm a 40 mm (H40)

- 2. Entorno de maquinado de NX:** una vez extruido el perfil, se accede al entorno de maquinado de NX 9 y se selecciona el proceso de mecanizado *wire_edm* (ver *Fig. 13*)

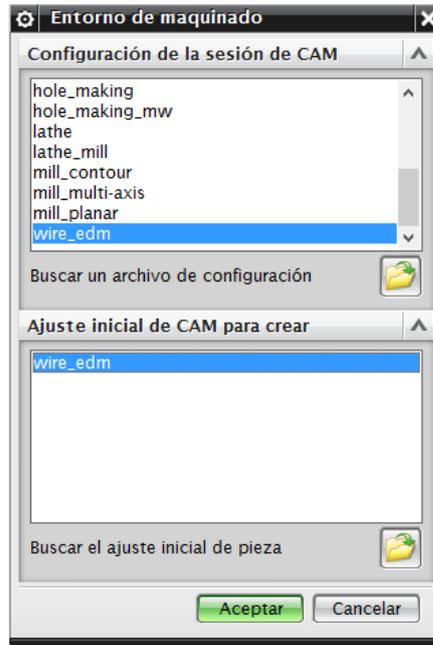


Figura 13. Entorno de maquinado de Siemens Unigraphics NX 9.0.

- 3. Creación de la geometría:** seguidamente se accede a la vista de la geometría y se selecciona de entre las distintas opciones de geometrías de corte, la opción “*WEDM_GEOM*”, puesto que es la genérica y en la que se parte de un tocho de material efectuándose los cortes en el interior del mismo (ver Fig. 14).

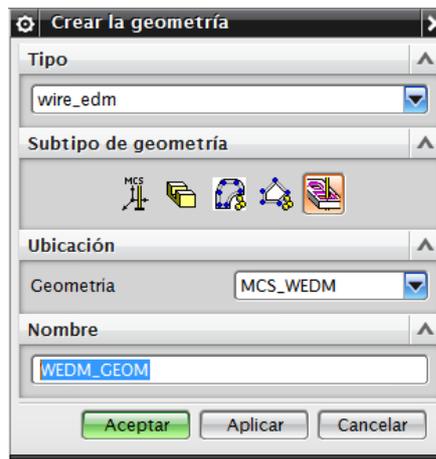


Figura 14. Selección del tipo de geometría a cortar.

Con la geometría, se seleccionan los distintos tramos rectos y curvas que conforman el perfil de la probeta, los cuales forman la trayectoria que seguirá el hilo en el posterior postprocesado (ver Fig. 15). Es importante que se

seleccionen los distintos tramos de manera adecuada y en el orden requerido ya que de ello dependerá el correcto postprocesado.

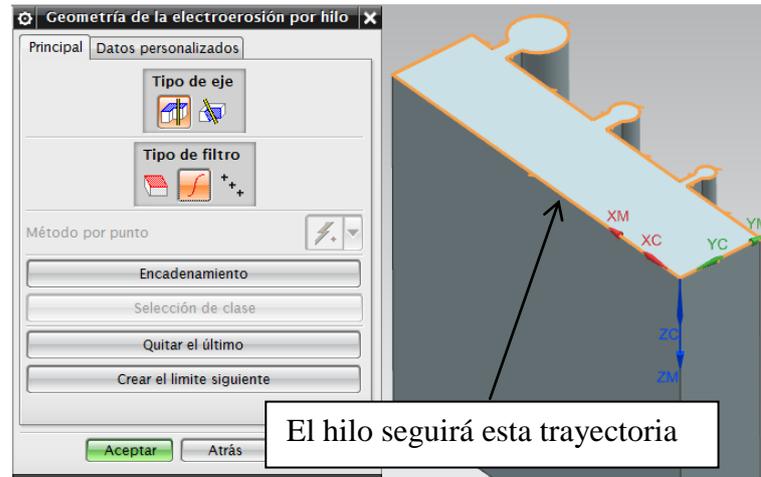


Figura 15. Selección del contorno de la probeta.

La trayectoria marcada en la Fig. 14 en color naranja la seguirá el centro del hilo, con lo que en principio se debería “sumar” al CAD de la pieza un offset o compensación (demasiá de material), que tenga en cuenta el diámetro del hilo más el gap en el primer corte para cada espesor (más adelante se explicará este punto con mayor grado de detalle). Sin embargo este proceso de añadir la compensación, se efectúa en la propia máquina de WEDM mediante un comando, con lo que el CAD se mantiene con las cotas nominales o teóricas.

4. **Creación de operación:** a continuación se crea la propia operación de mecanizado por electroerosión por hilo (WEDM), y teniendo en cuenta que el CAD es un perfil abierto, es decir, en el mismo no dibujamos el tocho y la probeta, sino solo a probeta, se elige la opción de “OPEN_PROFILE” (ver Fig. 16).

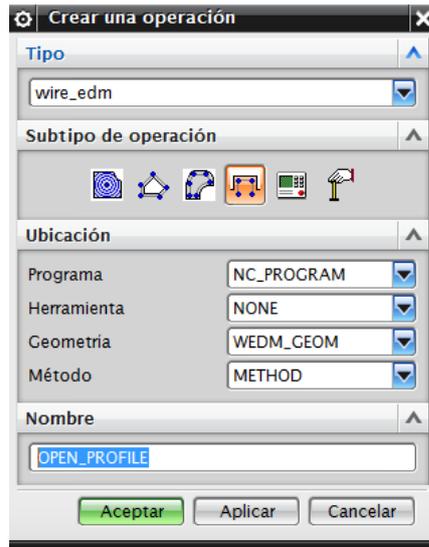


Figura 16. Selección de la operación de corte.

5. **Selección de parámetros:** seguidamente se escogen los parámetros de corte para el corte requerido (ver Fig.17). Se selecciona el diámetro del hilo, que es de 0.25 mm, y las pasadas de acabado, que en este caso solo se ha efectuado corte (desbaste) luego son 0.

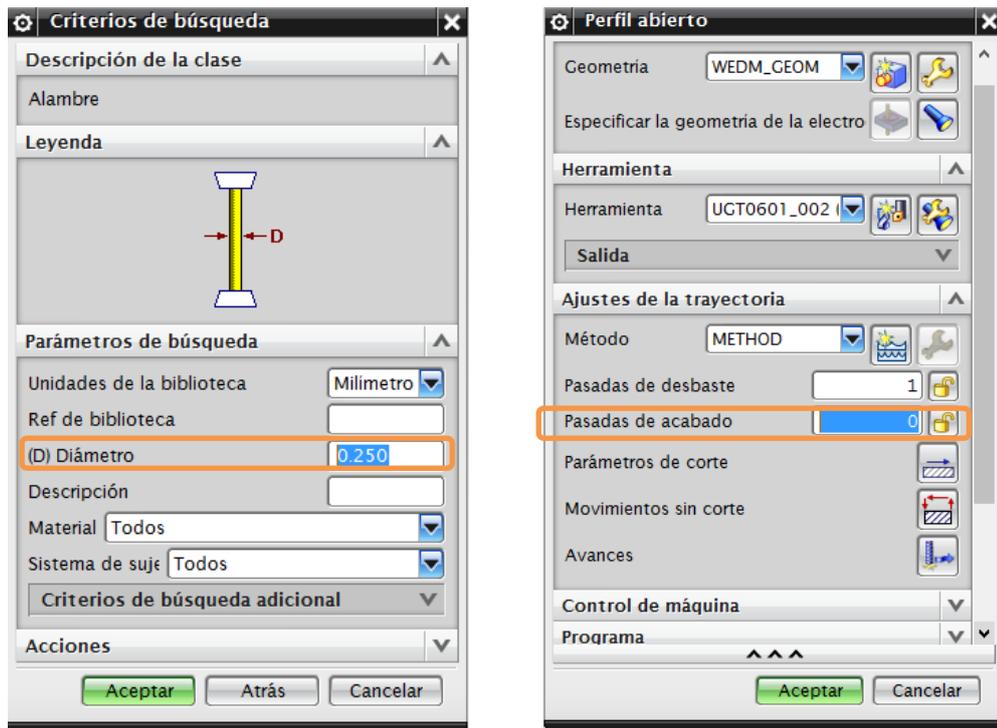


Figura 17. Selección de los parámetros de corte.

6. **Verificación de la trayectoria:** finalmente se verifica la trayectoria del hilo con el fin de que el proceso se haya resuelto satisfactoriamente (ver Fig. 18).

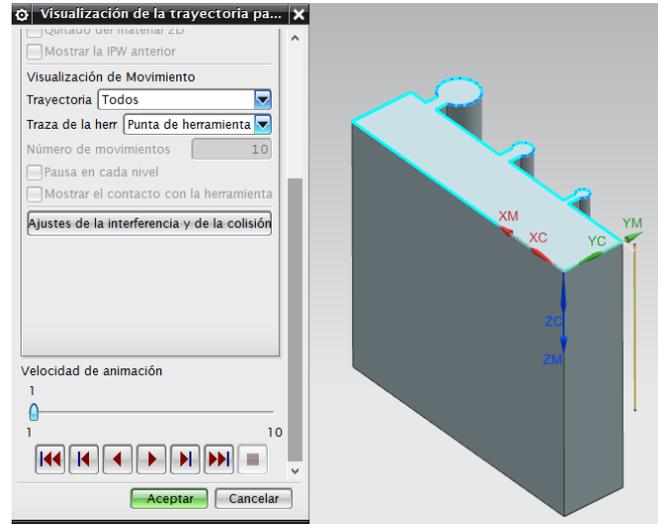


Figura 18. Simulación de la trayectoria del hilo

7. **Postprocesado:** se trata del último paso antes de poder iniciar el corte en la máquina de electroerosión por hilo ONA AX3, y resulta imprescindible para que la máquina pueda interpretar la geometría de corte de la probeta (ver Fig. 19)

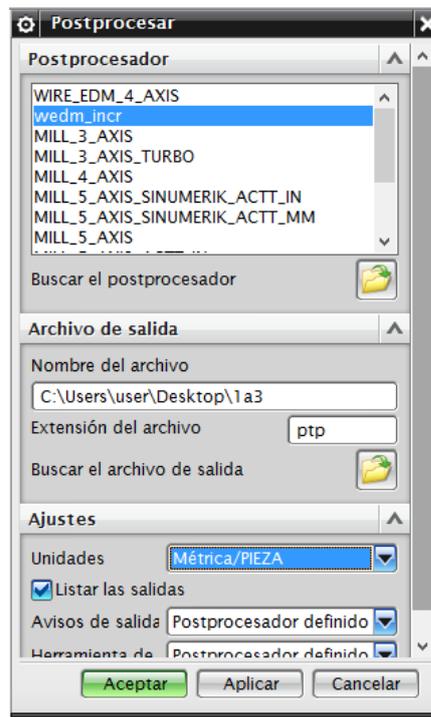


Figura 19. Postprocesado de la probeta.

El archivo de postprocesado se da en formato txt y para el ejemplo de espesor 40 mm y radios 1, 1.5 y 3 mm. El mismo sería el que sigue:

```
=====  
Listado informativo creado por: usuario  
Fecha                          : 23/04/2015 19:22:42  
Pieza de trabajo actual        : C:\Users\user\Desktop\1a3.prt  
Nombre del nodo                 : edu  
=====  
N0010 G41 G01 G91 X0.0 Y10. U0.0 V0.0  
N0020 X11.  
N0030 Y12.  
N0040 G02 G90 X12. I-.5 J-.866  
N0050 G01 G91 Y10.  
N0060 X23.  
N0070 Y12.  
N0080 G02 G90 X25. I-1. J-1.118  
N0090 G01 G91 Y10.  
N0100 X38.  
N0110 Y12.  
N0120 G02 G90 X40. J-2.8284  
N0130 G01 G91 Y10.  
N0140 X43.  
N0150 Y0.0  
N0160 X0.0  
N0170 Y10.  
N0180 X-2.5  
N0190 M02
```

Una vez obtenido el txt en lenguaje CNC la máquina de WEDM ONA AX3 ya es capaz de interpretar la geometría de la probeta y con ello, realizar el corte de la misma.

El resto de programas en lenguaje CNC de las distintas probetas se encuentran en el documento "*Documento 5.4.: Programas CNC de probetas*" de los ANEXOS.

3.6.2.4. CORTE DE LAS PROBETAS

En este apartado se describe el procedimiento de corte de las probetas que forman parte del estudio. En la *Fig.1* se muestran las 12 probetas que forman parte del estudio.



Figura 1. Probetas cortadas que forman parte del estudio.

Los ensayos de corte de las probetas comienzan como se ha mencionado en el apartado anterior, con la obtención del programa en lenguaje CNC de cada probeta. Este programa puede ser modificado, y de hecho varios programas han sido modificados parcialmente, atendiendo a criterios de ahorro de material, puesto que la superficie de los tochos, como ya se ha comentado, es limitada.

Tales modificaciones únicamente han afectado a la entrada del hilo en el inicio del corte, prolongando o acortando la misma, y el giro de la geometría a cortar en algunos casos. Las variaciones en los programas han sido realizadas en un equipo informático (uno de los ordenadores de sobremesa del Taller Mecánico), con el Editor del Software específico de la empresa *ONA ELECTROEROSIÓN*, cuyo interfaz gráfico se muestra en la *Fig. 2*:

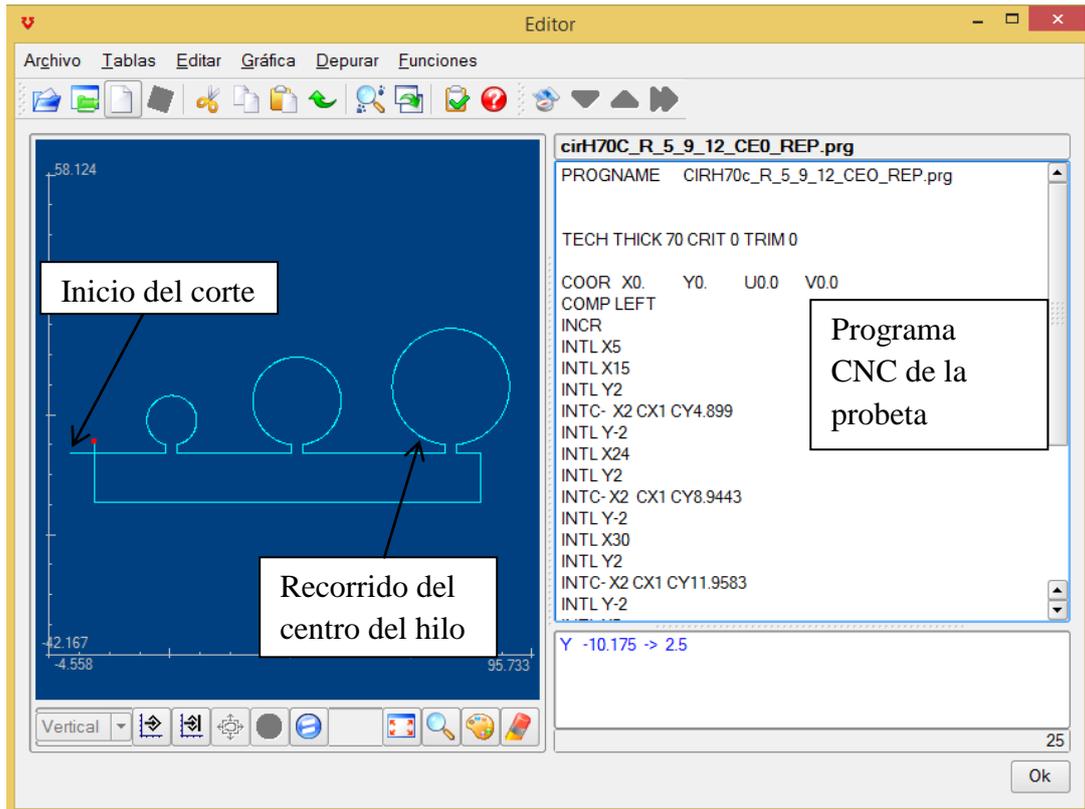


Figura 2. Editor del Software CNC de ONA ELECTROEROSIÓN

En la Fig. 2 se ve en la parte izquierda el recorrido que recorrerá el hilo durante el corte en la máquina de WEDM, así como el lugar en el que comenzará el mismo. En el ejemplo de la Fig. 2, se trata de la probeta de espesor 70 mm (H100) y radios 5, 9 y 12 mm, cuyo programa CNC modificado para el Software específico de I+D de ONA es:

```
PROGRAMNAME CIRH70c_R_5_9_12_CEO_REP.prg
```

```
TECH THICK 70 CRIT 0 TRIM 0
```

```
COORD X0. Y0. U0.0 V0.0
```

```
COMP LEFT
```

```
INCR
```

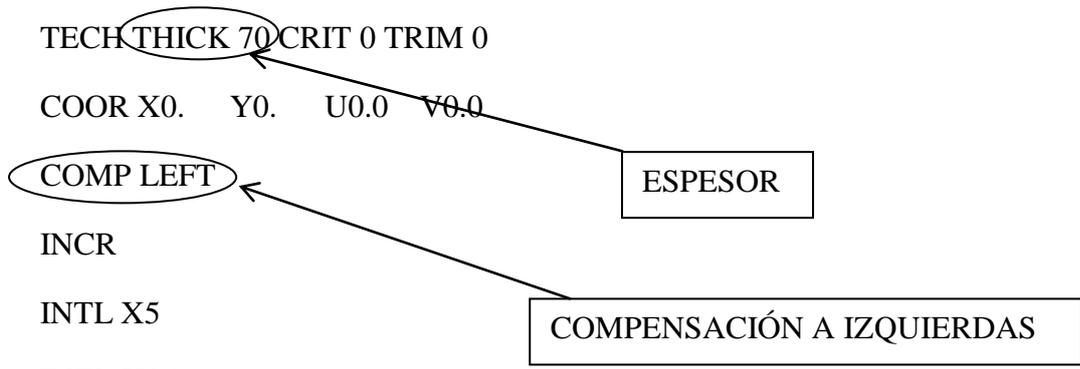
```
INTL X5
```

```
INTL X15
```

```
INTL Y2
```

```
INTC- X2 CX1 CY4.899
```

```
INTL Y-2
```



```

INTL X24
INTL Y2
INTC- X2 CX1 CY8.9443
INTL Y-2
INTL X30
INTL Y2
INTC X2 CX1 CY11.9583
INTL Y-2
INTL X5
INTL Y-10
INTL X-80
INTL Y12.5
COMP OFF
END

```

Diagram illustrating the interpolation methods used in the program:

- INTERPOLACIÓN LINEAL** (Linear Interpolation) is indicated by an arrow pointing to the **INTL X30** command.
- INTERPOLACIÓN CIRCULAR** (Circular Interpolation) is indicated by an arrow pointing to the **INTC X2 CX1 CY11.9583** command.

Cabe resaltar ciertos aspectos interesantes y a la vez muy importantes de cara a un correcto corte de las probetas:

- **La compensación:** es la “demasiá” o exceso de material que será necesario programar en el corte de las probetas teniendo en cuenta el radio del hilo utilizado y el *gap* (ver Fig. 3) el cual varía en función del espesor de la pieza a cortar. Es por ello que la compensación en electroerosión por hilo, es un punto muy importante en el proceso de corte y por ello se ha tenido en cuenta en los programas de corte como el de arriba mediante la función “COMP”.

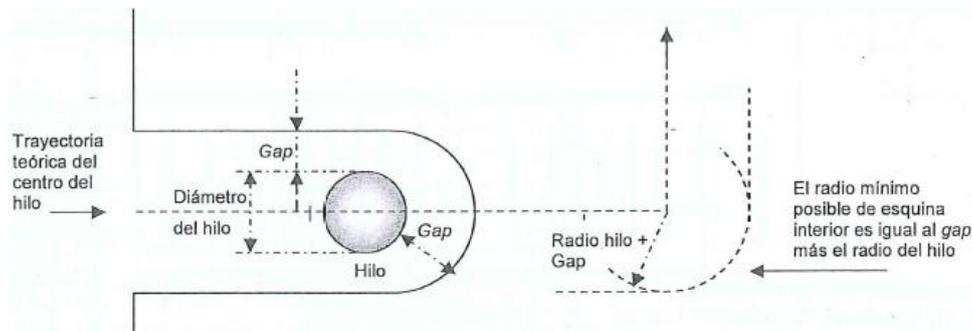


Figura 3. Compensación en WEDM.

Así mediante ella (la función COMP) se asegura que la trayectoria del centro del hilo durante el corte (línea azul clara de la Fig. 2), esté desplazada la compensación adecuada, diferente para cada espesor.

- **El tipo de tecnología de corte en función del espesor:** como ya se ha mencionado, el espesor del tocho a cortar influye notablemente en el proceso de corte puesto que condiciona la compensación a utilizar. Así en los ensayos realizados (corte de las distintas probetas), cada espesor y por tanto la compensación con la que se corta cada probeta se elige mediante la función “THICK” del lenguaje específico CNC de la máquina de WEDM de ONA.
- **Boquillas apretadas o separadas:** la máquina de electroerosión por hilo permite realizar dos tipos de ensayos: con las boquillas por donde discurre el hilo apretadas (denominado “bocas apretadas”), o con las mismas separadas cierta distancia (llamado “bocas separadas”). A continuación se describe cada uno de ellos.



Figura 4. Bocas apretadas.

En el primer caso, con bocas apretadas, que es como se han realizado los ensayos, la separación de las boquillas se hace coincidir con el espesor de la pieza. Tanto la boquilla superior como la inferior se colocan a una separación máxima de la pieza de $20\ \mu\text{m}$. Para ello se utiliza una cala de este espesor y se

comprueba que pase “rozando” entre la boquilla y las partes superior e inferior rectificadas de los tochos de acero templado. Con esto se consigue que el chorro de agua que se expulsa por las boquillas limpie el canal donde se producen las descargas eléctricas, evitando que el material fundido se acumule y se generen cortocircuitos. Como resultado, el proceso de corte es más rápido y con un mejor acabado. Sin embargo, esta forma de trabajo sólo es aplicable cuando la pieza tiene el mismo espesor en toda la longitud del corte. En el momento que el espesor disminuye, las presiones en el canal de descargas caen y la calidad del proceso empeora. Peor aún, si el espesor de la pieza aumenta, el cabezal colisionará con la pieza, pudiendo producir graves daños en la máquina.

En el segundo caso, con bocas separadas, tanto la boquilla superior como la boquilla inferior se encuentran separadas una cierta distancia de la pieza a cortar. La boquilla inferior no se puede separar más que la distancia que permite el giro de la rosca a la que va acoplada. Se rosca hasta el fondo para aprovechar toda la longitud. La boquilla superior tiene una mayor libertad y se puede colocar a cualquier distancia, con una precisión de $1 \mu m$.

Una vez explicados los aspectos más importantes a tener en cuenta en el proceso de corte, se enumerarán los pasos seguidos en la realización de los ensayos (corte de las probetas):

- 1. Modificación del programa:** como ya se ha comentado al inicio del presente apartado, el proceso comienza modificando el programa CNC que se obtiene del postprocesado de la geometría de cada probeta. Así se inserta el espesor: “THICK 40”, “THICK 70” o THICK 100”, en función si la probeta a cortar es de 40, 70 o 100 mm respectivamente; añadiéndose asimismo las funciones de compensación “COMP” pertinentes y se realizan modificaciones en las longitudes de interpolación lineal de cara a un ahorro de material en los tochos.
- 2. Selección de la tecnología de corte:** como ya se ha explicado el objetivo a largo plazo es la creación de una tecnología específica de corte para trayectorias circulares, por lo que para el corte de las probetas se ha escogido la tecnología de corte “*standard*” de ONA cuya denominación es “*ONA s_st25it.tec*”, con el fin de ver el defecto de forma que genera la misma en trayectoria circular y a partir de ahí poder corregir ese defecto mediante la ayuda de la RNA.
- 3. Sujeción, amarre y alineación del tocho:** el siguiente paso que se debe realizar es la colocación y alineación en la máquina del tocho de acero templado en el cual se cortan las probetas. Como se puede ver en la *Fig. 5*, el tocho se ha de apoyar en una de las escuadras de las guías de la bancada de la máquina con el

fin de disminuir al máximo posible el voladizo del mismo y que el corte se realice con una alineación en el eje z adecuada. Seguidamente se sujeta mediante amarres y tornillos de distintas longitudes en función del espesor del tocho. Se ha de intentar que el par aplicado a todos los tornillos sea aproximadamente el mismo con el objeto de que el tocho tenga la mayor planitud posible y no haya desviaciones en z. Por último, mediante la ayuda de un reloj comparador se verifica que no haya desviaciones en el eje citado y que la planitud es la adecuada.



Figura 5. Colocación del tocho en la máquina y amarre del mismo.

- 4. Toma de presiones:** las probetas se cortan con bocas apretadas ya que el espesor de los tochos es constante, por lo que, mediante una cala de $20\ \mu\text{m}$ y con el mando que controla el movimiento del cabezal de la máquina de WEDM (ver *Fig. 6*), se acercan progresivamente las boquillas a la cara superior rectificada del tocho hasta que pasando la cala en medio de la boquilla superior e inferior y las respectivas partes del tocho, la misma pase rozando a ambos.

El hecho de acercar el máximo posible las boquillas superior e inferior al tocho a mecanizar tiene una doble finalidad: por un lado, como ya se ha dicho, que el chorro de dieléctrico que discurre por las boquillas elimine de manera más eficiente la escoria producida durante el proceso de corte con el fin de evitar posibles cortocircuitos y demás anomalías en el mismo, y por otro lado, intentar que la deformación y pérdida de verticalidad del hilo durante el corte sea la menor posible.

Para comprobar lo expuesto en el párrafo anterior, antes de comenzar a cortar cualquier probeta, se ha de establecer una toma de presiones para cada espesor con el fin de asegurar que el dieléctrico fluye con la presión adecuada en el corte. A tal efecto, una vez se han situado las boquillas de la máquina a $20\ \mu\text{m}$ del tocho, se inicia el chorro de dieléctrico mediante su botón de la máquina y se comprueba en pantalla que la presión alcanza aproximadamente unos 18 bares, que es la presión para la tecnología de corte standard de ONA para los espesores 40, 70 y 100 mm. Si este valor de presión no se alcanza se vuelven a regular las boquillas hasta que se alcance.

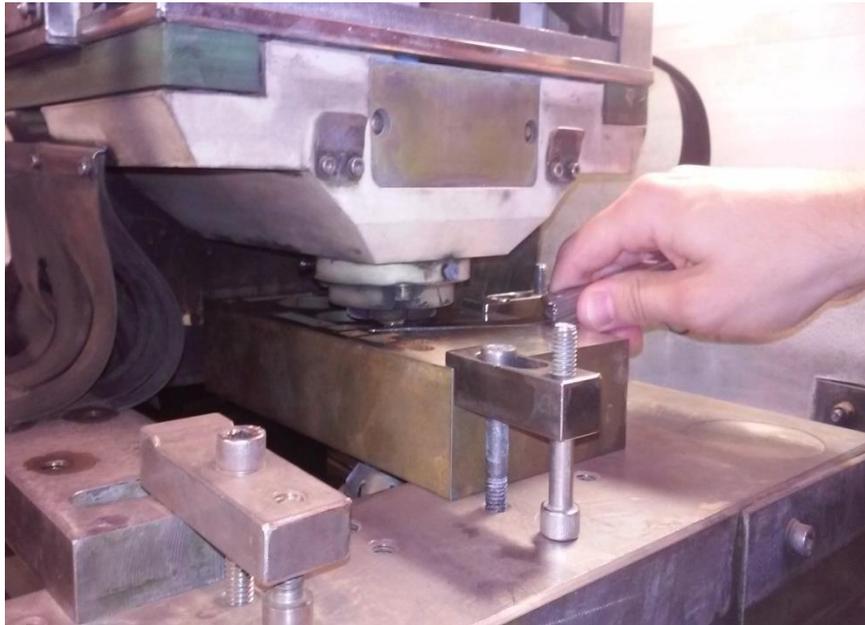


Figura 5. Paso de cala de $20\ \mu\text{m}$ para toma de presiones.

- 5. Enhebrado e inicio del corte:** una vez se ha verificado que la presión del dieléctrico alcanza el valor óptimo, se procede al enhebrado automático del hilo, mediante el botón de enhebrado de la máquina de WEDM. Ya enhebrado el hilo, se hace contacto con el mismo en una “pared libre” (ver Fig. 6) de un corte anterior en el tocho con el fin de marcar el cero de referencia en el eje que corresponda (X o Y), y posteriormente, se separa el hilo 1 mm de la pared en la que se ha efectuado el contacto para así definitivamente marcar en el panel de control CNC de la máquina de WEDM, el $X=0$ e $Y=0$, es decir la referencia donde el programa comenzará el corte siguiendo la geometría y distancias marcadas por el programa CNC de cada probeta (ver Fig. 2).



Figura 6. Toma de contacto del hilo para proceder al inicio del corte.

- 6. Fin del corte y limpieza:** finalmente una vez que el corte de la geometría ha concluido, se retira la probeta cortada y se realiza una marca en su parte superior para poder diferenciarla en la medición (en el siguiente apartado se explicará el por qué). Seguidamente se limpia con un producto químico recomendado por ONA que asegura la eliminación de impurezas y restos de erosión que pudieran desvirtuar los resultados de las mediciones, y se nombra con la nomenclatura adecuada indicando espesor y radio(s). Ejemplo: probeta de espesor 100 mm y radios de 5, 9 y 12 mm: *cirH100_R_5_9_12*.

3.6.2.5. MEDICIÓN DE LAS PROBETAS

A continuación se explicará con gran detalle el procedimiento de medición de las probetas que forman parte del presente estudio. Como ya se comentó en el apartado “3.5. Estudio de Alternativas”, se eligió como método óptimo de medición la Máquina de Medir por Coordenadas ZEISS MC 850 de la sala de metrología que se encuentra en Taller Mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (ver Fig.1). Finalmente se eligió una máquina de medir por coordenadas puesto que, para las probetas que forman parte del ensayo y teniendo en cuenta sus dimensiones, es el instrumento de medición más adecuado.



Figura 1. Máquina de medir por coordenadas Zeiss MC 850.

Introducción a la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC)

Una máquina de medida por coordenadas es un instrumento de medida absoluta de precisión capaz de determinar la dimensión, forma, posición y "actitud" (perpendicularidad, planaridad, etc.) de un objeto midiendo la posición de distintos puntos de su propia superficie.

La posición de un punto en el espacio está definido, en coordenadas cartesianas, por los valores relativos de los tres ejes X, Y y Z con respecto a un sistema de referencia. Usando series de puntos, es posible construir el elemento geométrico que pase por ellos o que se aproxime al máximo.

Una máquina de medir tridimensional es capaz de definir unívocamente y con extrema precisión la posición de estos puntos en un espacio tridimensional, y de calcular los parámetros significativos de las figuras geométricas sobre las que han sido tomados estos puntos.

Las máquinas de medir por coordenadas (MMC) se utilizan para las siguientes aplicaciones:

- Control de la correspondencia entre un objeto físico con sus especificaciones teóricas (expresadas en un dibujo o en un modelo matemático) en términos de dimensiones, forma, posición y actitud.
- Definición de características geométricas dimensionales (dimensiones, forma, posición y actitud) de un objeto, por ejemplo un molde cuyas características teóricas son desconocidas.

Procedimiento de medición

La medición de las probetas que forman parte del estudio se lleva a cabo una vez termina el corte de cada probeta, tras la limpieza de la misma, con el fin de eliminar cualquier elemento que pudiera distorsionar la medición. La electroerosión por hilo se trata de un proceso de mecanizado de alta precisión, y como tal, se ha de tener sumo cuidado con todos los procedimientos que tengan como objetivo la optimización del proceso.

Como ya se explicó en el apartado "3.4. Antecedentes", el hilo durante el corte, debido a diferentes fuerzas de difícil cuantificación, sufre una leve deformación, perdiendo su verticalidad inicial. Esta deformación o "pandeo" del hilo lleva consigo desviaciones en la geometría de la pieza programada, principalmente en su verticalidad, pero también en su perfil especialmente en aquellas zonas que suponen cambio de dirección en el movimiento de las guías, es decir, en círculos por ejemplo. Con lo que en las probetas, a

lo largo de su espesor (en este caso tres distintos: 40, 70 y 100 mm), la geometría sufrirá variaciones, siendo estas más pronunciadas en el centro del espesor que en los extremos, puesto que como se ha explicado en el apartado “3.6.2.4. Corte de las Probetas”, el corte se realiza con “bocas apretadas”, es decir, con las boquillas de las guías del hilo lo más cerca posible de las caras rectificadas del tocho de acero templado, lo que significa que el hilo sufrirá menor deformación en las proximidades de las boquillas, es decir, la zona superior e inferior de las probetas.

Con todo esto, el procedimiento de medición comenzó con la decisión de medir las probetas a lo largo de todo su espesor, es decir, en diferentes planos (ver Fig. 2), con el fin de observar cómo afecta dicha pérdida de verticalidad del hilo a la geometría de las mismas.

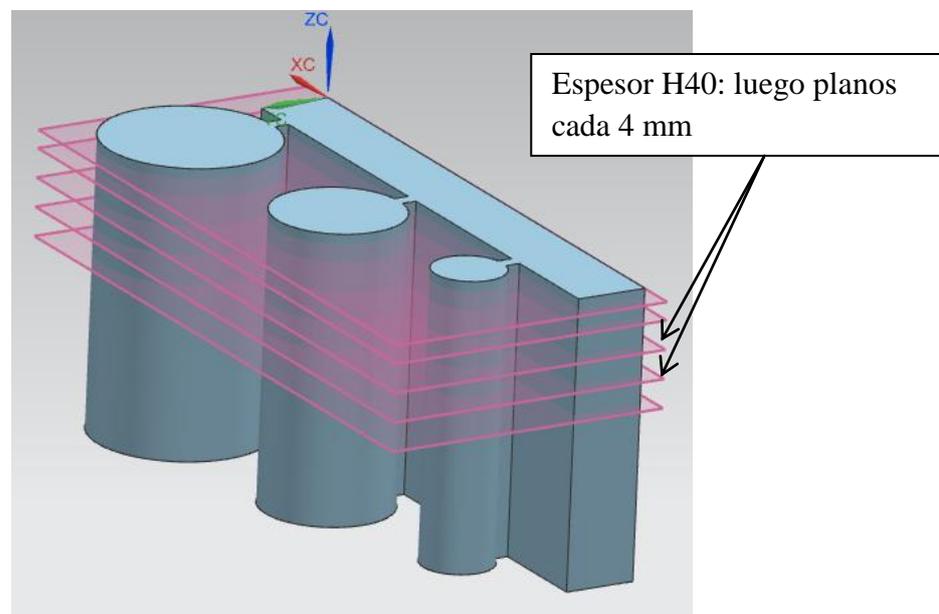


Figura 2. Imagen de una probeta de espesor 40 mm y radios 5, 9 y 12 mm, dividida en 5 planos (parte superior).

Por ello, se decidió dividir cada espesor en 10 planos diferentes, teniendo todos ellos en común un plano a 1.5 mm de la parte superior e inferior de cada probeta. Como se explicará más adelante, el vástago del palpador de la máquina de medir por coordenadas utilizado tiene 50 mm de longitud, con lo que resultó imposible tratar de medir de una misma vez todos los planos que conforman el espesor de todas las probetas, por lo que se tomó la decisión de dividir la medición de cada probeta en parte superior e inferior, teniendo claro cuál era la superior e inferior (tras el corte se nombraba cada cara con dichas denominaciones). Esto es, se dividieron las 10 mediciones, en 5 mediciones para cada parte, superior e inferior, dando origen a dos archivos CAD diferentes para cada probeta.

A continuación se presenta una tabla con los distintos planos para cada espesor, teniendo en cuenta que la medida se toma desde el plano de la cara superior de cada probeta, y se desplaza esa distancia a lo largo del eje z (ver Fig. 2).

Espesor (mm)	Distancia de cada plano respecto a cara superior (mm)	Parte superior o inferior de cada probeta
H40	z - 1.5	superior
	z - 4	
	z - 8	
	z - 12	
	z - 16	
	z - 24	inferior
	z - 28	
	z - 32	
	z - 36	
	z - 38.5	
H70	z - 1.5	superior
	z - 7	
	z - 14	
	z - 21	
	z - 28	
	z - 42	inferior
	z - 49	
	z - 56	
	z - 63	
	z - 68.5	
H100	z - 1.5	superior
	z - 10	
	z - 20	
	z - 30	
	z - 40	
	z - 60	inferior
	z - 70	
	z - 80	
	z - 90	
	z - 98.5	

Tabla 1. Espesores de probetas y distancia a la cara superior de cada plano medido.

Como se puede observar en la *Tabla 1*, se han tomado mediciones:

- En espesor 40 (H40): a 1.5 mm de las caras superior e inferior y cada 4 mm
- En espesor 70 (H70): a 1.5 mm de las caras superior e inferior y cada 7 mm
- En espesor 100 (H100): a 1.5 mm de las caras superior e inferior y cada 10 mm

Con la salvedad de que se ha omitido la medición justo en medio de cada probeta debido a los ya mencionados condicionantes dimensionales del palpador de la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC).

Una vez se tomó la decisión comentada, se comenzó a medir las probetas siguiendo la siguiente metodología para cada una de ellas:

- 1. Disposición de la probeta en el plato magnético:** primeramente se coloca la probeta de forma vertical, de manera que apoye en los círculos de una de sus caras rectificadas (ver Fig. 2). Las probetas se colocan de esta manera y no de forma horizontal, puesto que el palpador mediante el cual se palpan los diferentes puntos de cada cilindro en cada probeta, es recto y no puede acceder a palpar la mitad inferior de los círculos (ver Fig. 3) puesto que colisionaría con éstos.

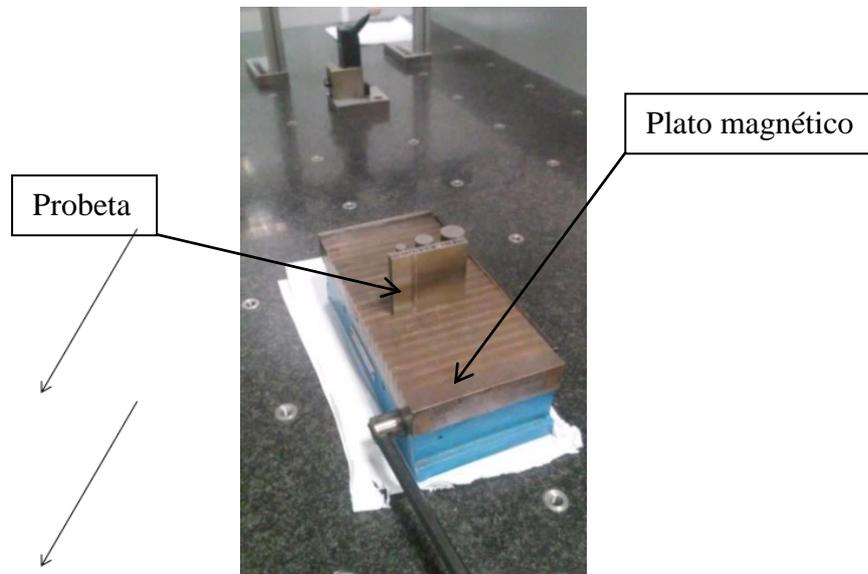


Figura 2. Probeta situada en plato magnético.

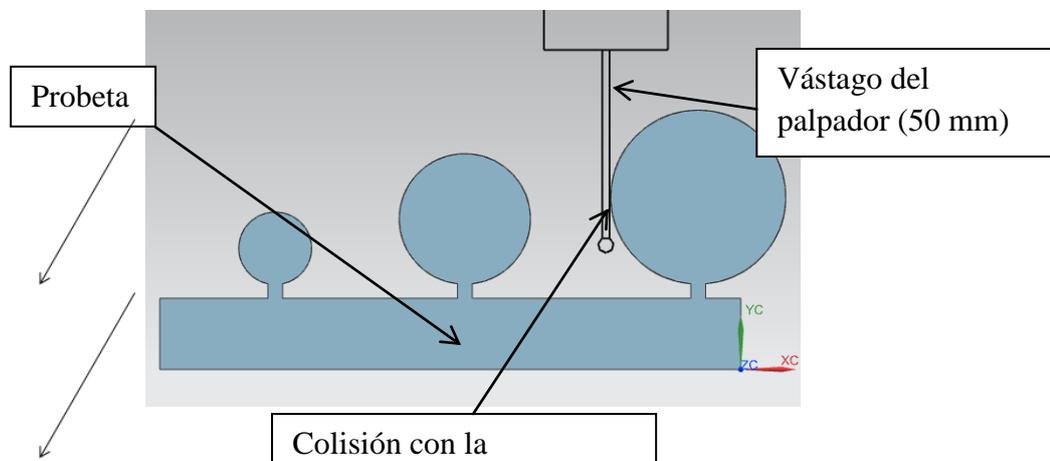


Figura 3. Representación del choque del palpador con uno de los cilindros de la probeta.

Disponiendo las probetas de manera correcta (vertical), surge el ya explicado inconveniente de que el vástago del palpador no llega a medir todos los planos de la probeta que se está midiendo, luego una vez finalice la medición del último plano de la parte superior de cada probeta, habrá que darle la vuelta a la misma, con el fin de continuar midiendo los 5 planos restantes, es decir, por ejemplo para una probeta cualquiera de espesor 100 mm (H100) se coloca en el plato magnético de tal manera que la planta superior de la misma sea la cara superior rectificada, y se comienza la medición desde el plano z-1.5 mm, una vez termine la medición de ese plano, se empieza la medición del siguiente, es decir, el plano z-10 mm, y así sucesivamente hasta llegar al plano z-40 mm que es el último de la parte superior de las probetas de espesor 100 mm (H100) (ver *Tabla 1*).

Una vez finalice la medición de este último plano se voltea la probeta situándose de tal manera que esta vez sea la cara inferior rectificada la que se vea como planta superior, y se procede con la medición de sus distintos planos, con la salvedad de que esta vez el primer plano visto en planta superior no será el z-1.5 mm sino el z-98.5 mm (en la práctica la medición se hace a 1.5 mm de la parte superior de la probeta tal y como está situada), seguido del plano z-10 mm que esta vez será el z-90 mm y así hasta concluir la medición.

- 2. Calibración del palpador:** una vez que se ha situado la probeta en el plato magnético para medir la parte que corresponda, superior o inferior, se enciende la máquina de medir por coordenadas (MMC) y se procede a la calibración del palpador de la misma con el fin de obtener resultados óptimos a la hora de medir las probetas. Este paso es necesario realizarlo antes de medir cualquier probeta puesto que es probable que el palpador se haya descalibrado debido a algún golpe en una medición anterior, o del mismo palpado de puntos en una medición.

Se calibra el palpador mediante el cual se efectúan las mediciones cuya bola de palpador es de 3 mm y cuyo material es rubí. El rubí es uno de los materiales más resistentes conocidos, con una superficie extraordinariamente suave y alta resistencia a la compresión y corrosión mecánica.

Antes de calibrar el propio palpador con el que se realizan las mediciones, se efectúa un palpado de referencia mediante un palpador de referencia, cuya bola de palpador de rubí es de 8 mm de diámetro (ver *Fig. 4*)

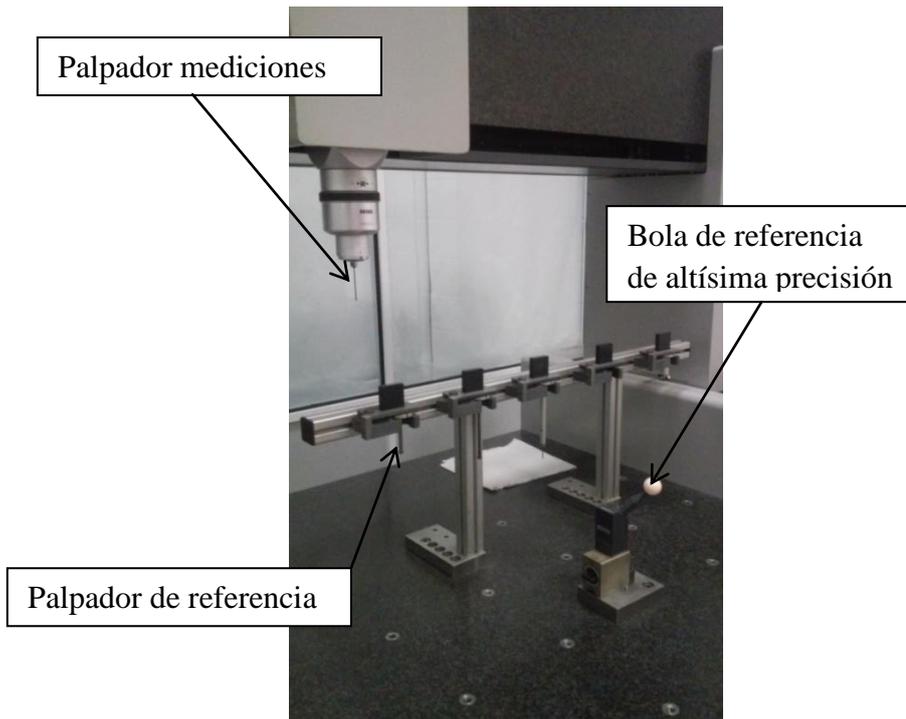


Figura 4. Depósito con los diferentes tipos de palpadores de la MMC.

Durante todo el proceso de medición se utilizan dos aplicaciones software (programas), de las que dispone la MMC:

- *Calypso*: para calibrar los palpadores.
- *Holos*: el resto del proceso.

Por lo tanto, se comienza abriendo el software *Calypso* cuyo entorno del programa se puede ver en la Fig. 5:

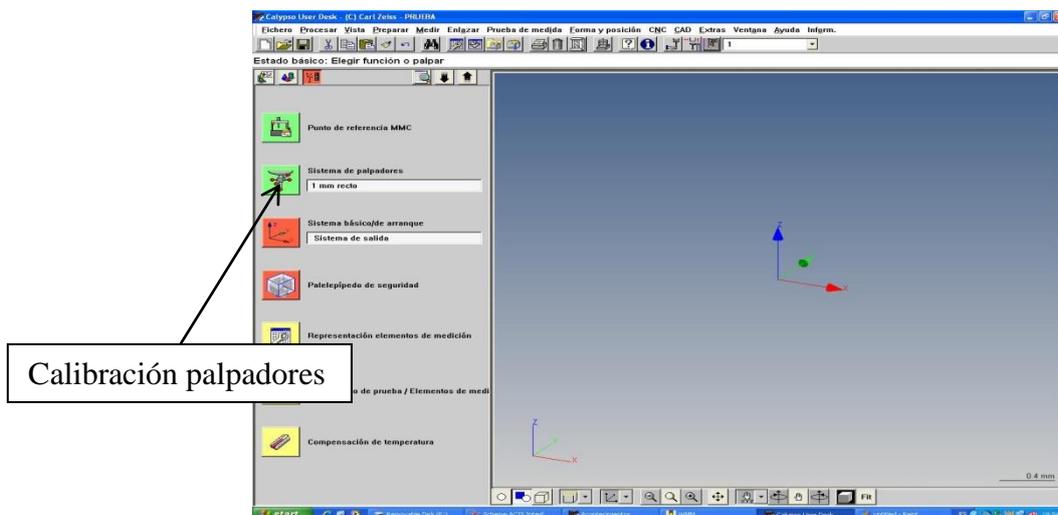


Figura 5. Entorno del programa Calypso.

Seguidamente se procede a la calibración del palpador de referencia mediante el botón “sistema de palpadores” (ver Fig.5), y se accede a la siguiente ventana (Fig. 6):



Figura 6. Opciones de calibrado.

Para elegir el palpador de referencia con el fin de iniciar el proceso, se seleccionan los botones de cambio de palpadores (ver Fig.6) con el fin de depositar el palpador que esté en el cabezal de la MMC, y una vez esté situado éste en su lugar correspondiente en el depósito (ver Fig.4), se selecciona el palpador de referencia cuya bola es de 8 mm y se pulsa el botón de inicio de calibrado (ver Fig.6). La MMC, lleva automáticamente éste a palpar diferentes puntos de la bola de referencia con el fin de encontrar el centro de la misma y que quede registrado en el software (ver Fig.7)

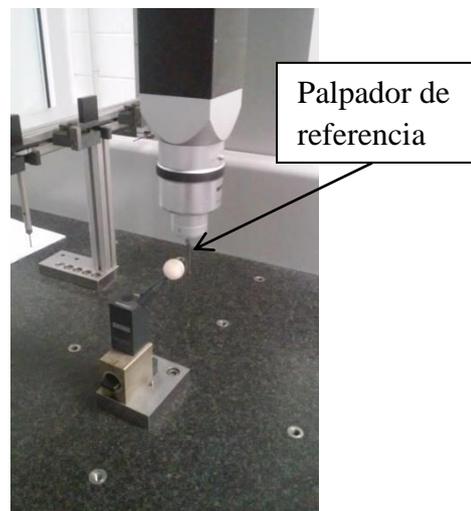


Figura 7. Calibrado del palpador de referencia.

Una vez termina de palpar los puntos de la bola de referencia, se comprueba mediante el protocolo de palpado del software *Calypso* (ver Fig. 8), que la desviación de la medida con respecto al radio nominal de la bola de referencia es menor de $0.2 \mu\text{m}$, considerándose una desviación ya muy pequeña, luego el error o desviación durante el palpado de las probetas por descalibrado se podrá considerar prácticamente despreciable.

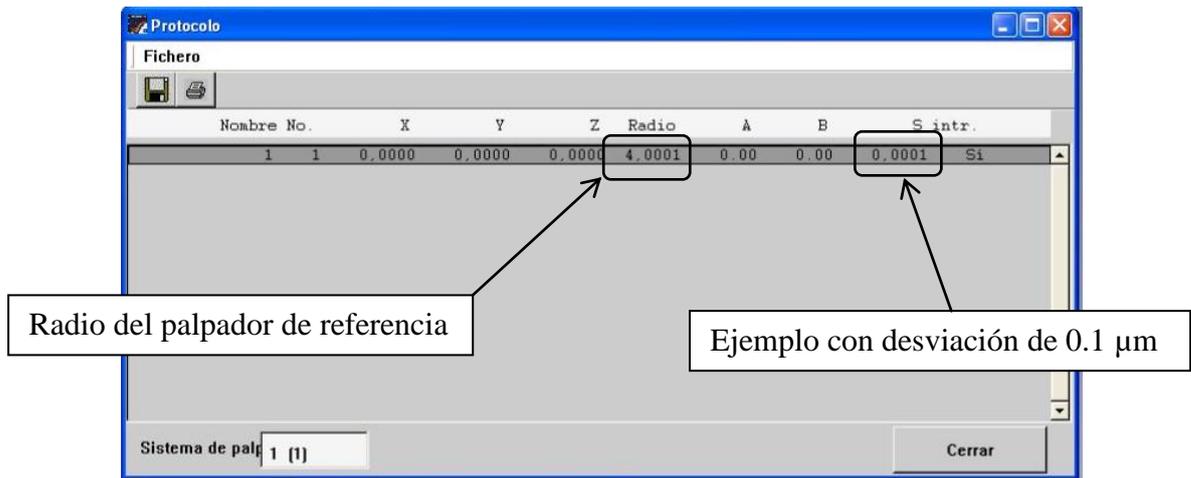


Figura 8. Protocolo de palpado de Calypso.

Finalizado el calibrado del palpador de referencia con el fin de encontrar el centro de la bola de referencia (ver Fig. 8, las coordenadas X, Y y Z igual a 0.0000 mm), se calibra el palpador de diámetro de bola 3 mm que es con el que se realizan las mediciones de las probetas del presente estudio. Para ello se repite el mismo proceso que con el palpador de referencia de bola de 8 mm de diámetro, es decir, se deposita éste en su lugar del depósito de palpadores, y se toma el palpador requerido (bola de $\text{Ø}3 \text{ mm}$). A continuación se efectúa la calibración del mismo palpando 6 puntos de la bola de referencia cuyo centro es ya conocido.

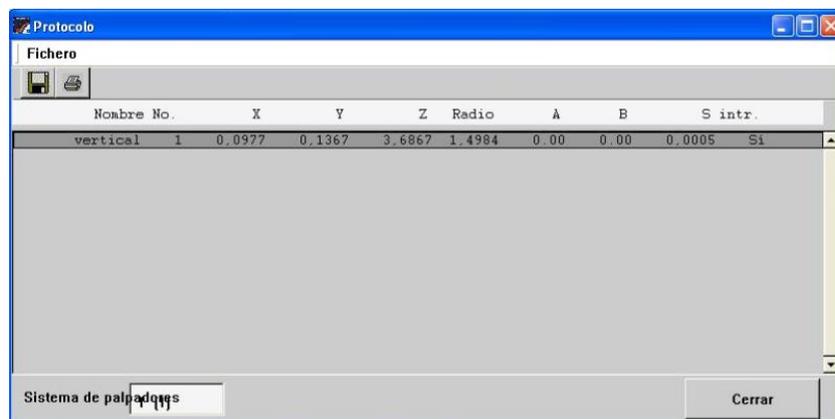


Figura 9. Protocolo de palpado para palpador de mediciones.

Como se puede ver en la Fig. 9, en el protocolo de palpado para el palpador de las mediciones, la desviación ha de ser menor o igual que $0.5 \mu\text{m}$ para que se considere un error muy pequeño las posteriores mediciones.

Una vez que se consiga que la desviación sea menor o igual que $0.5 \mu\text{m}$, puede darse por finalizada la calibración del palpador.

- 3. Importar Geometría en el software *Holos*:** una vez se ha verificado la calibración del palpador con el que se realizan las mediciones, se abre el entorno del programa *Holos*, que es mediante el cual se realiza el resto del proceso de medición, y se carga la geometría correspondiente a la parte de la probeta que se quiere medir (ver Fig. 10). Como ya se ha explicado previamente, para cada probeta se crean 2 CAD iguales, pero con la salvedad de que según se quiera medir parte superior o inferior el sistema de referencia del CAD se sitúa en un punto de la probeta u otro. Este cambio del sistema de referencia en el CAD está justificado por el procedimiento de alineación puesto que al voltear físicamente la probeta en el plato magnético para medir una parte u otra, el cero pieza para el software *Holos*, cambiará de posición con respecto a la posición de medida anterior. Por ejemplo, para la probeta que se muestra en la Fig. 10, que es de espesor 7 mm y de radios 5, 9 y 12 mm, y parte superior, la nomenclatura es cirH70C_R_5_9_12_sup, refiriéndose el “sup” a la parte superior de la misma.

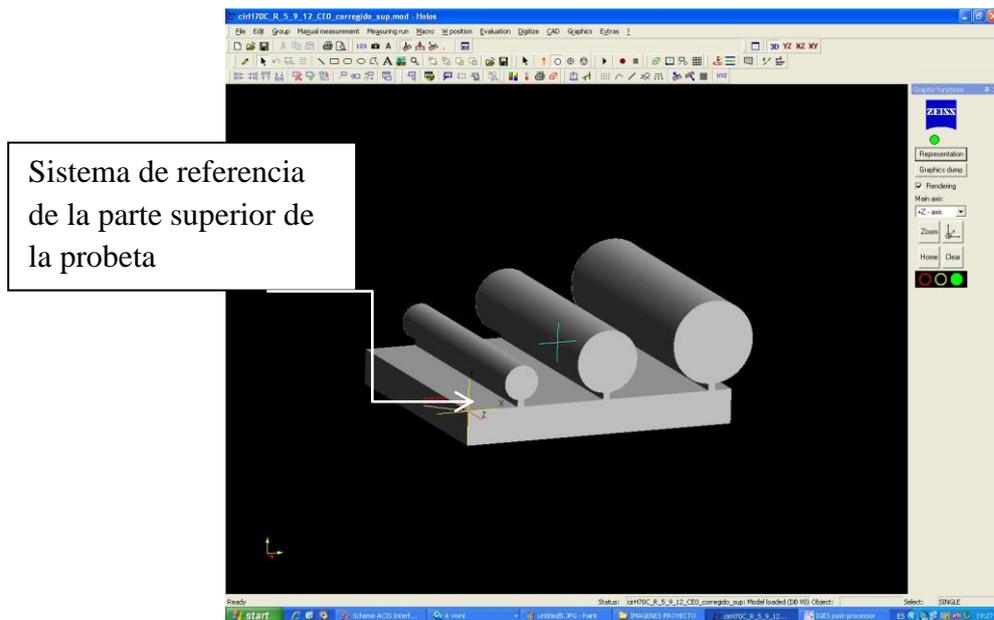


Figura 10. CAD de la probeta de espesor 70 mm y radios 5, 9 y 12 mm, parte superior.

Una vez que se termine de medir la parte superior de dicha probeta, se carga el CAD de la parte inferior de la misma (ver *Fig. 11*), cuya nomenclatura es *cirH70C_R_5_9_12_inf*, y se voltea la probeta en el plato magnético de tal manera que, como ya se ha explicado, se vea la parte inferior rectificada como planta superior. Como se ve en la *Fig. 11*, en el CAD de la parte inferior el sistema de referencia se encuentra en otro punto de la probeta con el fin de que el procedimiento de alineación se lleve a cabo de manera correcta y el software pueda registrar el cero pieza tomando tres planos de referencia (se explicará en el siguiente punto).

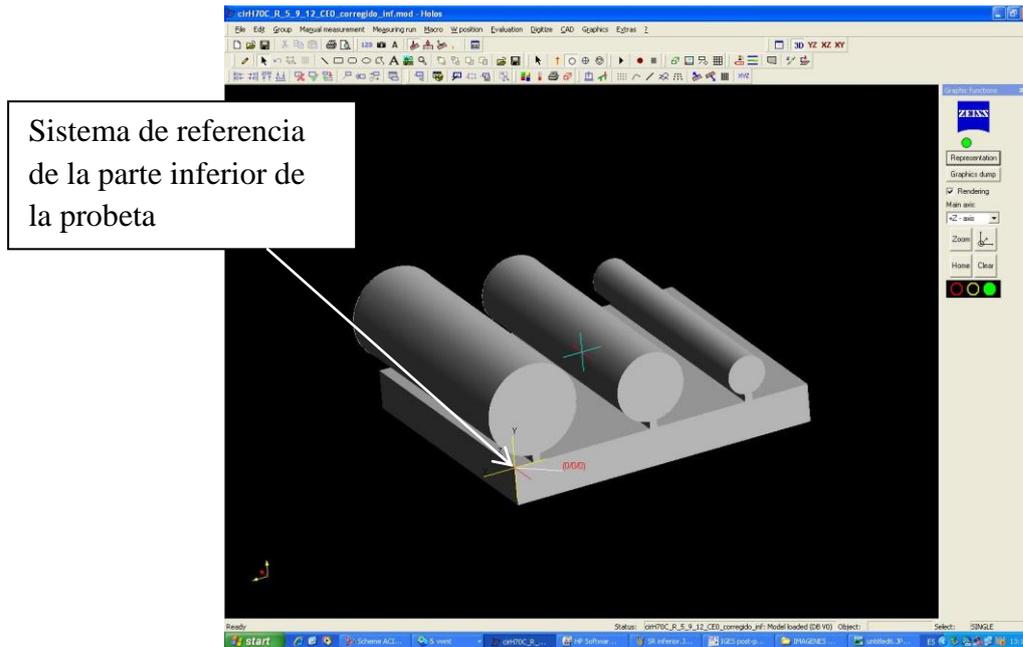


Figura 11. CAD de la probeta de espesor 70 mm y radios 5,9 y 12 mm, parte inferior.

- 4. Alineación de la probeta:** el procedimiento de alineación de cada probeta es de vital importancia si se desean buenos resultados en las mediciones. Se basa en el palpado de puntos en tres planos de la probeta con el fin de que el software *Holos*, genere un sistema de referencia de medición o “*cero pieza*”, que coincida con el sistema de referencia del propio CAD. Este “*cero pieza*”, una vez la probeta haya sido alineada, será el sistema de referencia o punto de coordenadas $X = 0$, $Y = 0$ y $Z = 0$, para las mediciones de los puntos palpados, es decir, las coordenadas de cualquier punto de la probeta palpado posteriormente estarán referenciadas con respecto a ese “*cero*”.

El proceso comienza seleccionando diferentes puntos del CAD en el *Holos*, mediante el comando “*Select measuring points*” (ver *Fig. 12*).

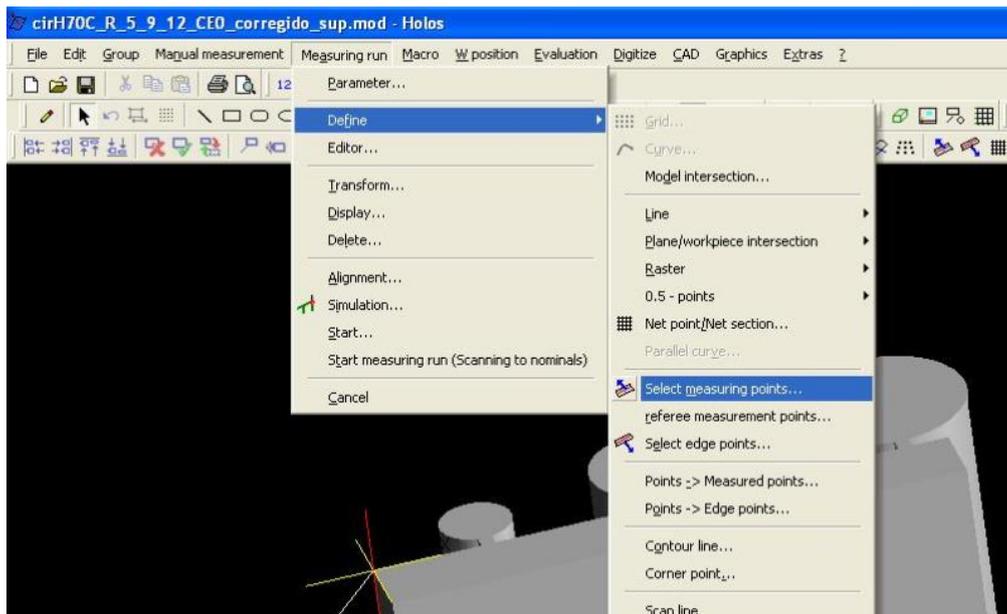


Figura 12. Definición de los puntos de palpado en la alineación.

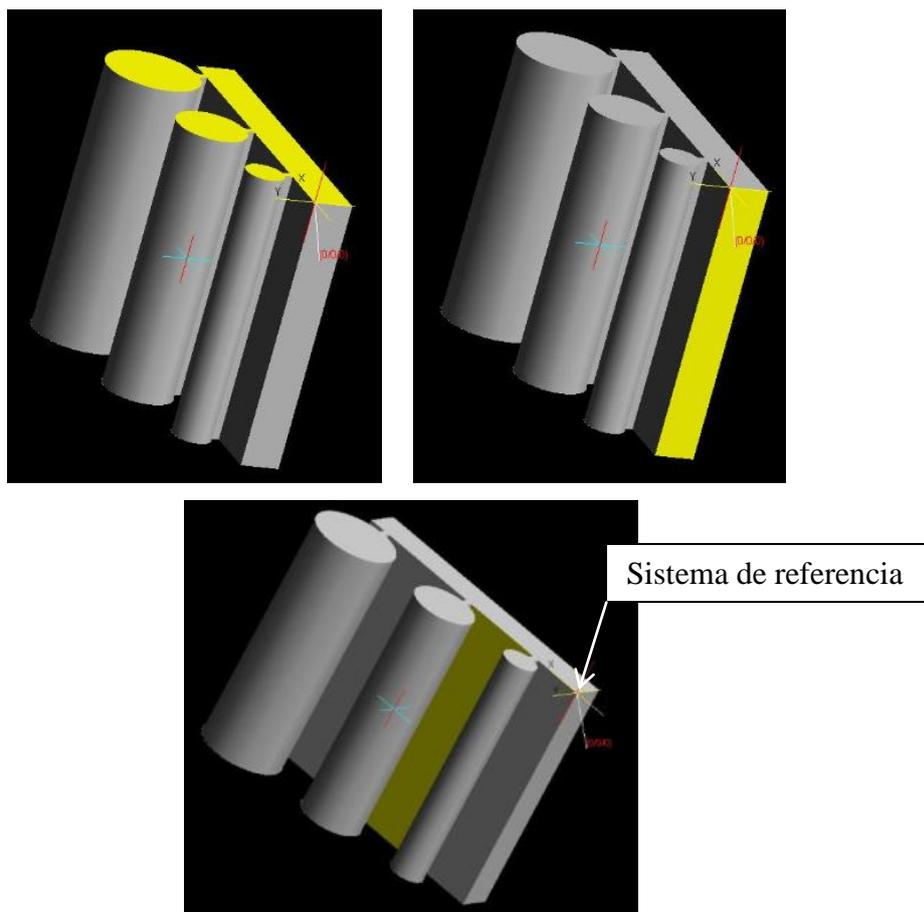


Figura 13. Los tres planos elegidos para que intersecten en el sistema de referencia o "cero pieza".

Como se puede observar en la *Fig.13* la idea es elegir los tres planos que intersecten en el sistema de referencia del CAD cada probeta, puesto que la intersección de tres planos perpendiculares entre sí da lugar a un punto concreto en el espacio (ver *Fig.14*).

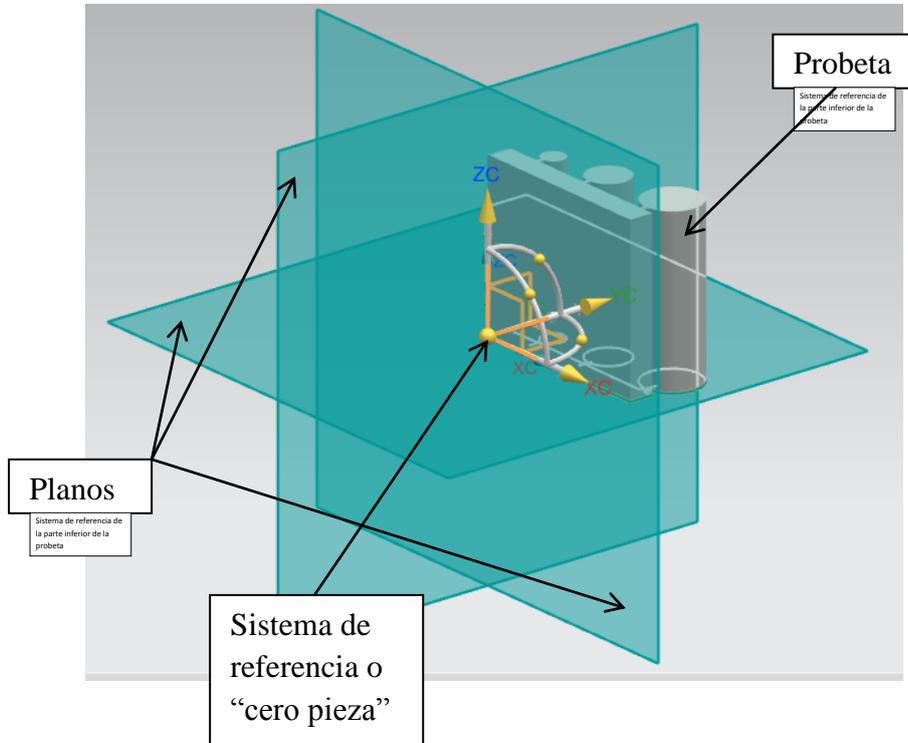


Figura 14. Tres planos perpendiculares entre sí que intersectan en el "cero pieza".

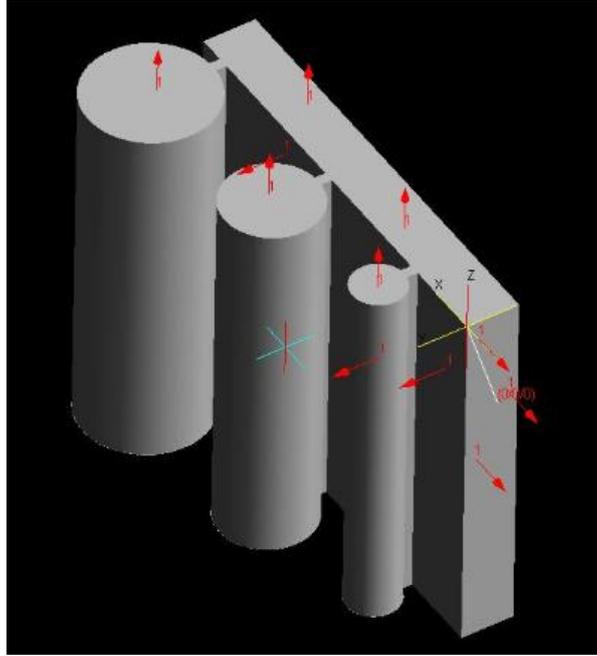


Figura 15. Puntos palpados en la alineación.

Como se puede ver en la Fig. 15, se seleccionan puntos (vectores salientes de color rojo) en los tres planos marcados en amarillo en la Fig. 13. de manera que éstos estén lo suficientemente distantes entre sí en cada plano, para que no formen una recta, y sí en cambio, un plano bien definido.

Con ello se asegura la correcta alineación de la pieza. Una vez seleccionados los distintos puntos en cada una de las 3 caras de la probeta (los tres planos), se procede a palpar manualmente dichos puntos. Manualmente quiere decir, mediante la ayuda de los joystick del centro de mandos de la MMC (ver Fig. 16)



Figura 16. Centro de mandos de la MMC.

Mediante los dos joystick de la Fig.16, y controlando la velocidad mediante el potenciómetro, se desplaza el cabezal de medición hasta que el palpador entre en contacto con los puntos seleccionados en la Fig.15, y siempre intentando aproximarse lo más posible a la situación real de los mismos en el CAD del Holos, teniendo en cuenta las dimensiones reales de la probeta. La razón de esto se explicará en el siguiente punto.

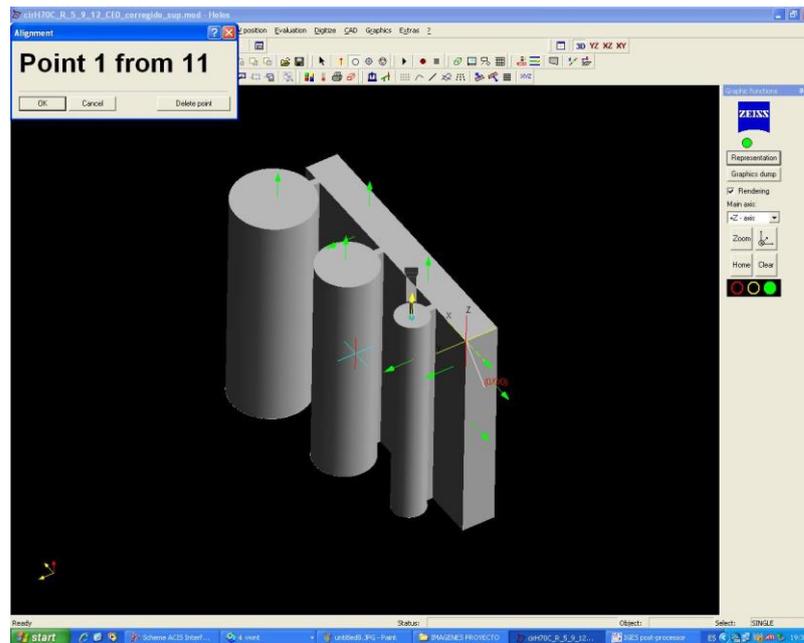


Figura 17. Palpado “manual” de los puntos de alineación.

En la Fig. 17 se observa como el software Holos, selecciona en el CAD el siguiente punto de la probeta que habrá de ser palpado. El procedimiento de palpado manual se ha de realizar con sumo cuidado y tocando suavemente los diferentes puntos de la probeta, puesto que cualquier golpe brusco podría descalibrar el palpador y sería necesario comenzar de nuevo el proceso de alineación.

Una vez se han palpado todos los puntos (en el caso de la Fig. 17, 11 puntos), se procede al palpado llamado “en automático”, que hace referencia a un palpado mecánico por parte de la MMC, de los puntos seleccionados en el CAD del Holos.

Antes de comenzar el palpado automático, es necesario realizar algunos cambios con el fin de asegurar un correcto palpado por parte de la MMC. Para ello en la pestaña “Measuring run parameters” se elige la opción “Clearance plane after each point” (ver Fig.18), que implica que después del palpado de cada punto, el

cabezal de medición, junto con el palpador, subirán a un plano de referencia, el cual definiremos mediante la opción “*Height of Clearance plan*”. En el ejemplo de la Fig. 18, se elige un plano ortogonal al plano X/Y, a una distancia de 10 mm con respecto al origen de coordenadas del CAD en el Holos, es decir, cada vez que palpe un punto de los de la Fig. 17, el cabezal junto con el palpador se desplazarán hasta 10 mm de la parte superior rectificada de la pieza. Con esto, se asegura que el palpador no colisione con la probeta cada vez que cambie de plano de palpado.

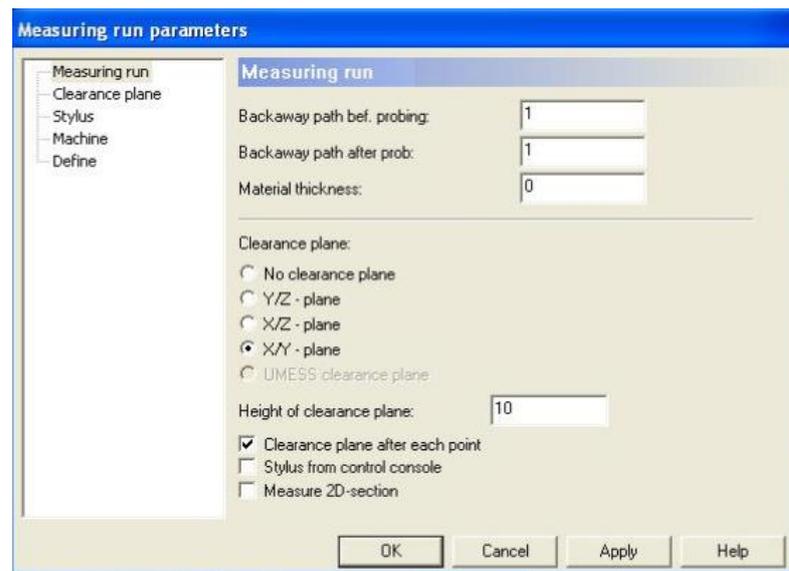


Figura 18. Parámetros del proceso de medición en la alineación.

Con la selección adecuada de los parámetros de alineación, se comienza el procedimiento de palpado automático de los puntos de alineación.

Una vez la máquina ha terminado de palpar los puntos. Aparece en pantalla en rectángulos verdes información relativa a la desviación en mm de los puntos palpados con respecto a los puntos programados en la alineación manual (ver Fig. 19). En el siguiente apartado se explica cómo se intenta corregir al máximo posible dicha desviación mediante el comando “*best-fit*”.

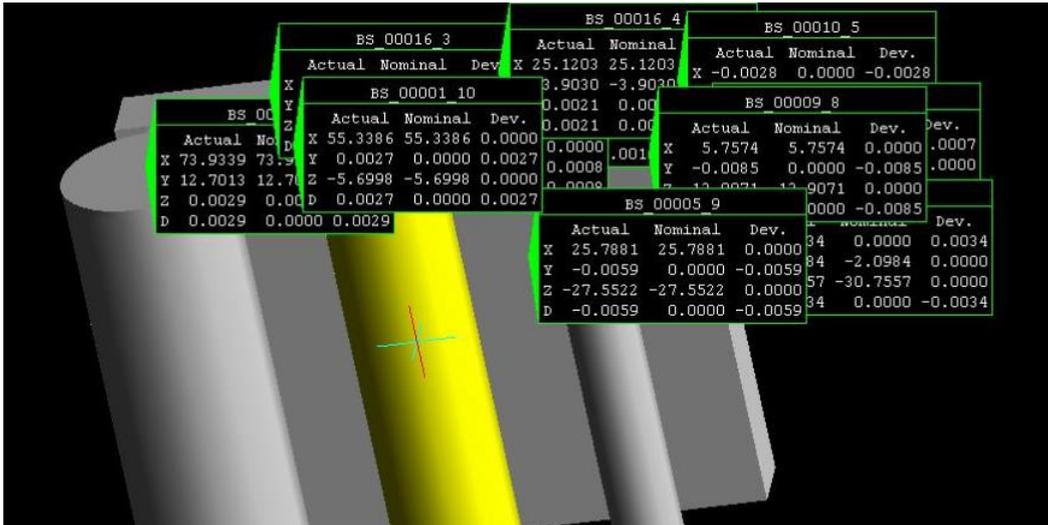


Figura 19. Desviación de los puntos palpados con respecto a los puntos programados en la alineación manual.

5. **“Best-fit”**: El best-fit (en castellano “mejor-ajuste”) aproxima la medida que toma mediante el palpador de la máquina de medir por coordenadas, al CAD cargado en el Software Holo de la misma. Se trata de una aproximación matemática que se utiliza para minimizar el error en la alineación de la pieza (probeta), haciendo que las cotas en las que se encuentra el CAD sean lo más aproximadas posible a las cotas en que se encuentra la pieza en el plato magnético de la MMC.

Para ello seleccionamos el comando “3-D best-fit” de la pestaña “Evaluation”.

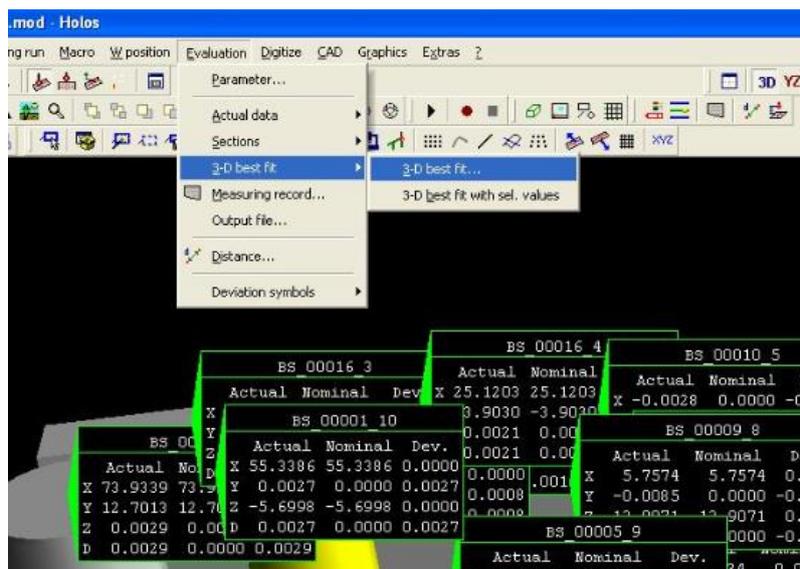


Figura 20. Selección del comando “best-fit”.

El software de la MMC automáticamente ajusta la medida palpada al CAD de la probeta consiguiendo reducir la desviación antes mencionada. Este procedimiento se realiza hasta que se estabiliza la desviación estándar (“*Standard deviation*”) a valores en torno a la micra ($\approx 1\mu\text{m}$). Si no se consigue bajar de la micra de desviación, se repite el procedimiento de best-fit hasta que la desviación estándar se estabilice en torno a un valor fijo. En el ejemplo de la *Fig. 21* se consiguió minimizar la desviación hasta un valor de $1.7\mu\text{m}$.

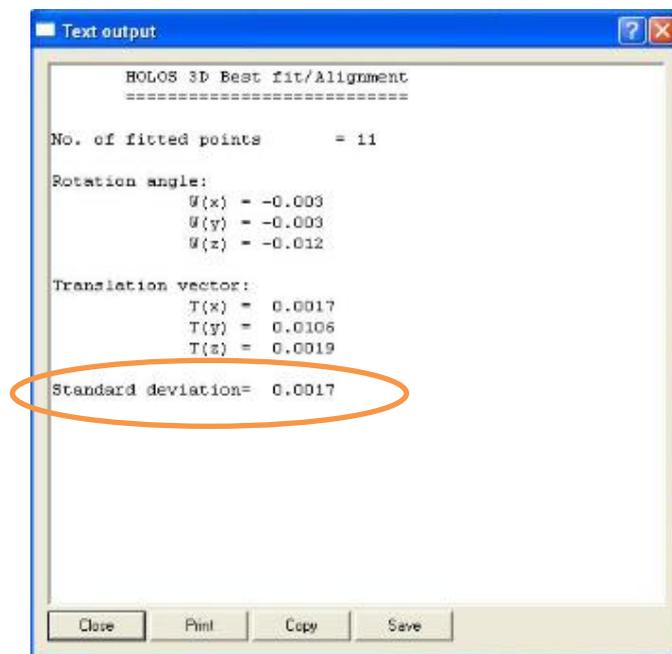


Figura 21. Reducción de la desviación estándar a 1.7 micras.

- 6. Selección de los puntos de palpado en los cilindros:** una vez la probeta está alineada correctamente, puede comenzar el proceso de selección de los puntos que palpará la MMC. Para ello primeramente se han de crear planos de medición (ver *Fig. 22*). Estos planos (líneas verdes) intersectan la probeta y su situación de intersección se corresponde con los planos establecidos en la *Tabla 1* del apartado “*Procedimiento de medición*”. Estos planos ortogonales al eje z de la geometría de las probetas, hacen de “guía” para los puntos que se palpan en los cilindros, es decir la MMC palpará tantos puntos como se le indique en esa línea verde. El número de puntos que se palpa en cada cilindro viene dado en la siguiente tabla y varía en función del radio de cada cilindro de las probetas:

Radio (mm)	Nº de puntos
R1	20
R1.5	25
R3	30
R5	35
R9	40
R12	50
R15	60
R20	80

Tabla 2. Relación de valores de los valores de radios de las probetas con el número de puntos palpados.

Como es lógico cuanto mayor sea el radio del círculo mayor es el numero de puntos palpados con el finde caracterizar de manera adecuada el error en todos los radios de las probetas.

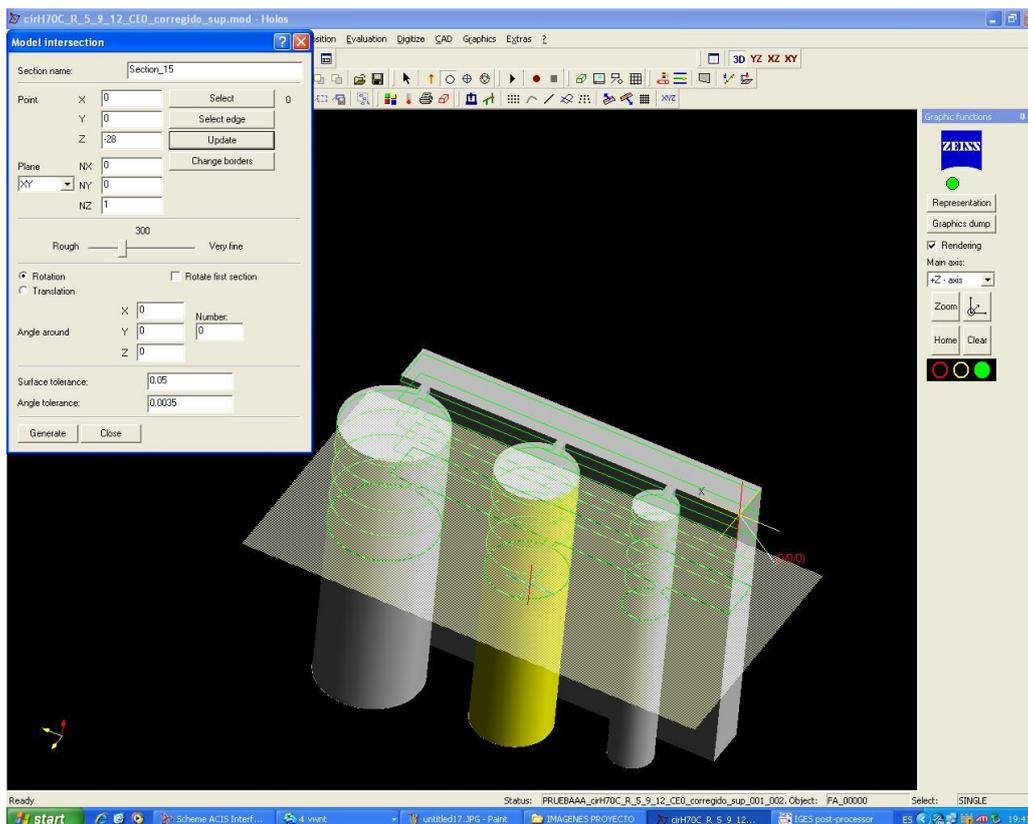


Figura 22. Creación de los planos de medición para el palpado de puntos.

En la Fig. 22, se puede ver el CAD de la probeta de espesor 70 mm (H70) y radios 5, 9 y 12 mm y parte superior, que al ser de espesor 70 se ha dividido en 5 planos a z-1.5, z-7, z-14, z-21, z-28 mm, tal y como se explica al principio del apartado “3.6.2.5.2. Procedimiento de medición de las probetas” y se refleja en la Tabla 1 del mismo apartado.

Una vez se han creado los distintos planos para la probeta, se selecciona el plano en el cual se quiere empezar a seleccionar los puntos y se ha de tener cuidado con el sentido de selección de los puntos de palpado, puesto que se ha de seguir la dirección de las flechas amarillas numeradas que recorren el plano seleccionado (ver Fig. 23), puesto que ese será el orden que lleve el cabezal de la MMC junto con el palpador a la hora de palpar los puntos de la probeta. Para seleccionar los puntos se elige en el comando “*model section*” la opción “*number of line points*”, y en ese campo se introduce en número de puntos a palpar en cada cilindro según la Tabla 2.

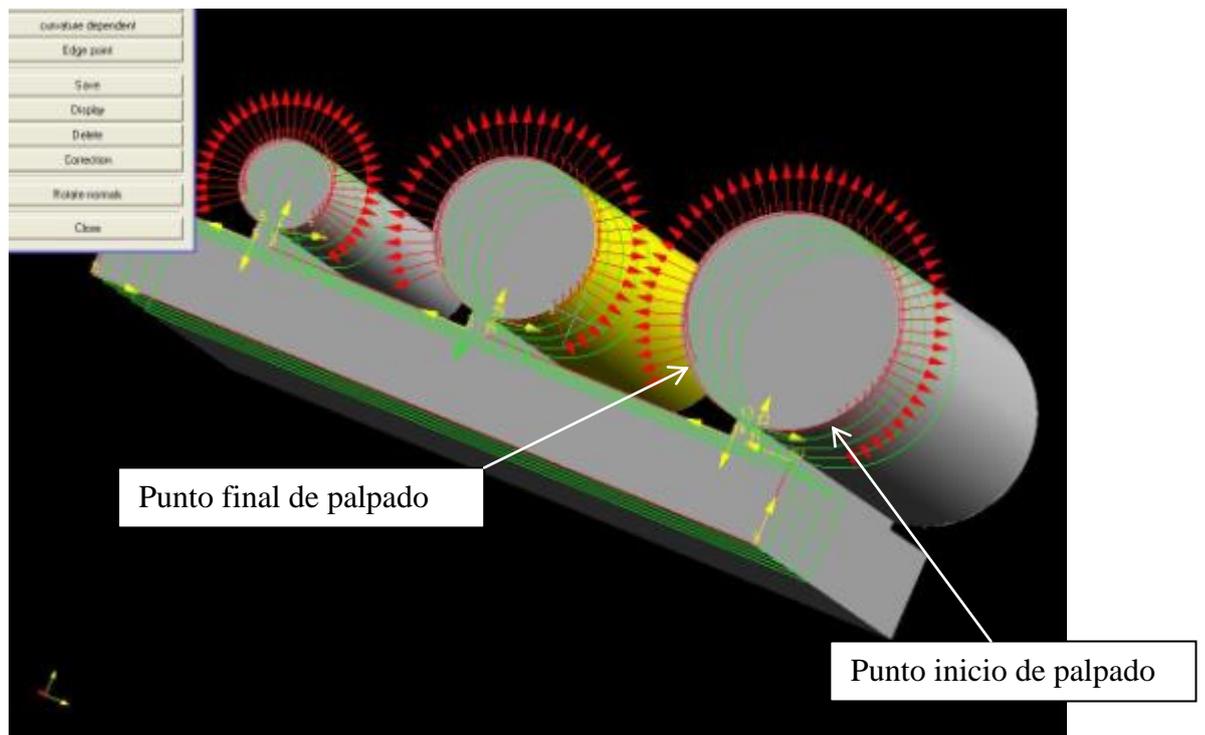


Figura 23. Selección en el plano z-1.5 mm de los puntos de palpado en los tres radios.

Seguidamente se arrastra el cursor del ratón desde el punto de inicio de palpado del primer círculo hasta el punto final del mismo, teniendo especial precaución de no tomar un sector angular en el círculo demasiado amplio cubiendo la posibilidad de choque de la bola del palpador con la probeta, tal y como se ha explicado al principio del presente apartado.

Este procedimiento se repite para todos los círculos y en todos los planos seleccionados previamente.

- 7. Medición por palpado de los puntos:** una vez se finalice la selección de los puntos, puede iniciarse el proceso de medición por palpado automático de los mismos.

Antes de comenzar a medir se han de modificar ciertos parámetros con el fin de evitar colisiones y que el proceso se efectúe de forma correcta. Así, con el fin de optimizar el tiempo se activa la opción de “*No clearance plane*”, evitando que el palpador regrese al plano de referencia cada vez que palpe un punto. También se establecen valores de 1 mm de retroceso después del palpado de cada punto (“*Backway path after probing*”), para evitar que la bola del palpador colisione con la probeta al palpar la parte inferior de los círculos (ver Fig. 2)

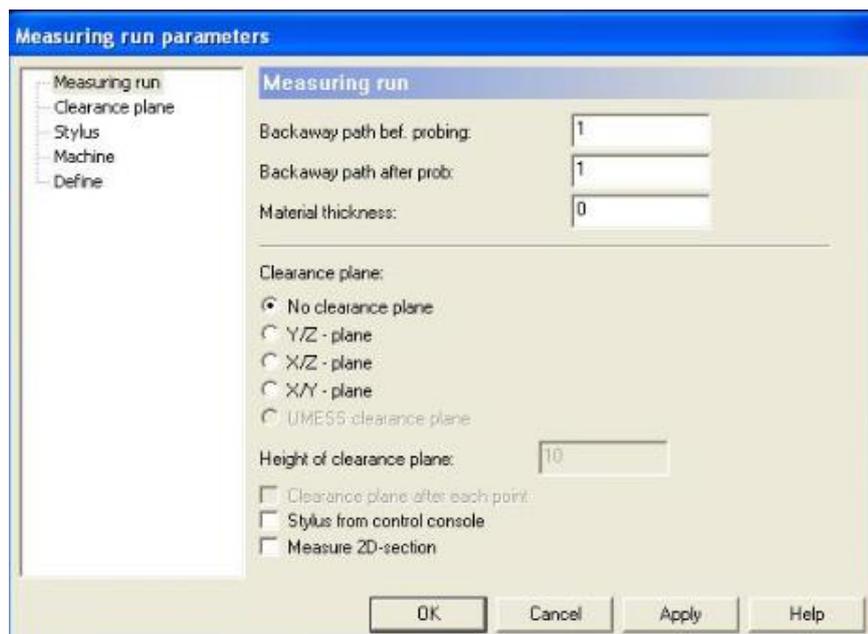


Figura 24. Modificación de parámetros de palpado.

Asimismo se fijan parámetros de evaluación para la posterior presentación y visualización de los resultados de las mediciones (ver Fig.25). Se establecen valores de tolerancias superiores e inferiores de $30 \mu\text{m}$ respecto a la medida nominal de los círculos. Se han escogido $30 \mu\text{m}$ de tolerancia ya que con la rugosidad inherente al propio corte no se puede considerar menos error. Esta tolerancia resulta aceptable para que no se considere rugosidad sino defecto de forma.

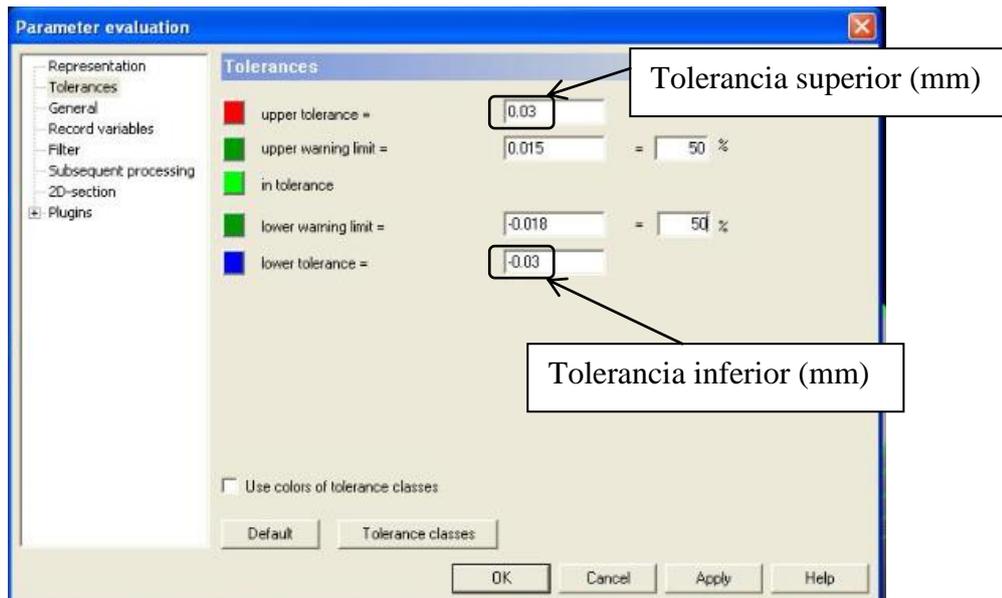


Figura 25. Modificación de parámetros de evaluación de la medición.

De esta forma los puntos palpados cuya desviación con respecto al CAD (medida nominal), supere en $30\ \mu\text{m}$ por exceso, se marcarán en color rojo (ver Fig. 25), y aquellos cuya desviación con respecto a la nominal supere la misma medida pero por defecto, se representarán en color azul.

Una vez se modifiquen los parámetros citados, comienza la medición de los puntos de los círculos en cada plano. Para ello se acerca el cabezal de la MMC junto con el palpador al punto de inicio de palpado del primer círculo, como se puede ver en la Fig. 26.

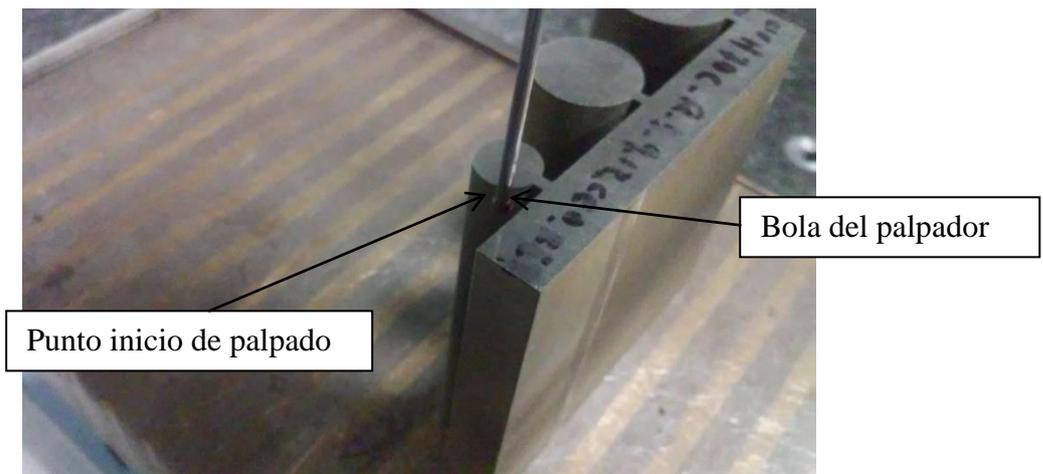


Figura 26. Inicio del palpado de los puntos.

8. Representación de los resultados de las mediciones: tras el palpado de todos los puntos de todos los círculos, el software Holos presenta en pantalla el perfil de la probeta junto con una serie de rectángulos que representan los puntos palpados por la MMC. En ellos aparece información relativa a sus coordenadas nominales respecto al cero pieza del CAD y el valor real de las mismas tras el palpado, así como su desviación con respecto al valor nominal (ver Fig. 27).

Lo realmente interesante es saber cuáles son las desviaciones máximas en cada círculo y en qué lugar de éstos se producen con el fin de caracterizar adecuadamente el error y visualizar el defecto de forma. Para ello se tratan los resultados de la Fig. 27, consiguiéndose para cada probeta una visualización de resultados como la que aparece en la Fig. 28, donde se puede distinguir en color verde la línea de medidas nominales del círculo, es decir un círculo del CAD de la probeta; dos círculos azules que bordean el círculo verde, se corresponden con la tolerancia por exceso y por defecto de 30 μm comentada en el punto anterior; el defecto de forma se puede visualizar en color rojo, que concierne a las desviaciones de cada punto palpado; y finalmente varios rectángulos similares a los de la Fig. 27, pero sólo con la información necesaria, la desviación de los puntos palpados donde señalan las flechas unida a éstos, con respecto a su valor nominal (círculo verde).

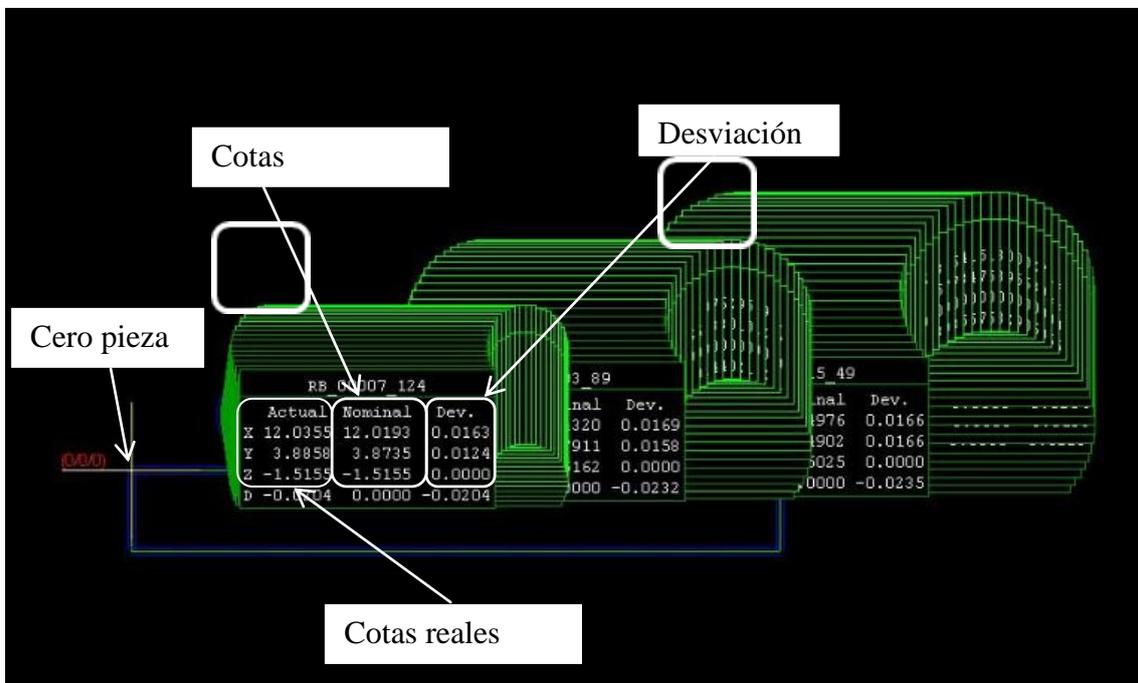


Figura 27. Resultados de medición.

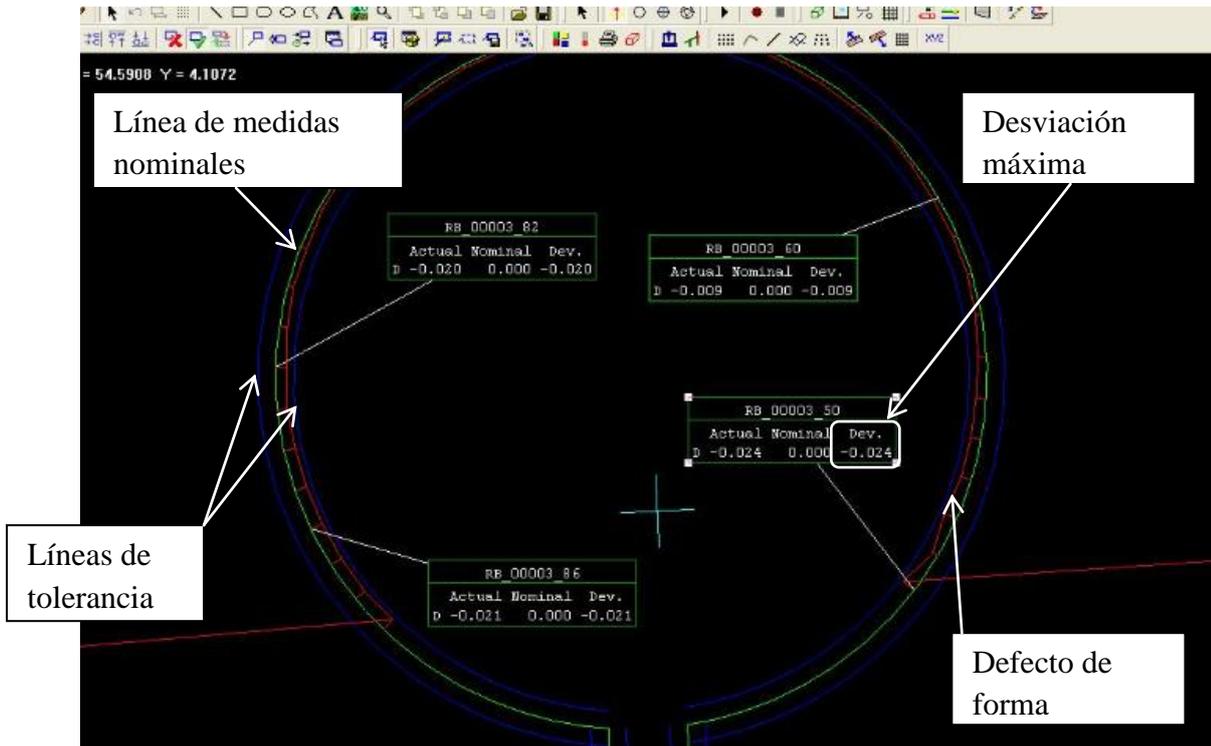


Fig. 28. Adecuación de los resultados de la medición.

Con lo cual de cada probeta y en cada medición resultan dos archivos por cada plano de medición: un archivo de texto que recoge las coordenadas reales y nominales de todos los puntos palpados, así como sus desviaciones (ver Fig. 29), y un archivo de extensión *pdf* donde se pueden visualizar de manera más clara los datos de la medición (desviaciones, tolerancias), así como el defecto de forma (ver Fig. 30).

```

=====
                                HOLOS measuring record

W-name       : cirH70C_R_1_1_5_3CE0_corregido_sup
Part no.     :
Job no.      :
Supplier/customer:
Operat.      :
Remark       :
Date        : 09/02/2015
=====
Upper tolerance : 0.0300 mm
Lower tolerance : -0.0300 mm
=====
Pt.          X Act   Y Act   Z Act  Ex   Ey   Ez   Distance
            X Nom   Y Nom   Z Nom
=====
                                Coordenadas reales
Segment evaluation  z1ym_cirH70C_R_1_1_5_3CE0_corregido_sup_001_002.sec
1                4.3723  12.5878  1.4946  0.0415  0.0045  0.0000  -0.0417
                4.3308  12.5833  1.4946
-----
2                4.3621  12.8279  1.4942  0.0271 -0.0039  0.0000  -0.0274
                4.3349  12.8317  1.4942
-----
3                4.3890  12.9920  1.4942  0.0160 -0.0051  0.0000  -0.0168
                4.3730  12.9972  1.4942
-----
4                4.4478  13.1499  1.4945  0.0088 -0.0046  0.0000  -0.0100
                4.4389  13.1546  1.4945
=====
                                Desviaciones
                                Coordenadas nominales
    
```

Figura 29. Archivo de texto con los resultados de medición. En este caso se muestran únicamente 4 puntos palpados de uno de los círculos correspondientes a la probeta cir_H70_R_1_1.5_3.

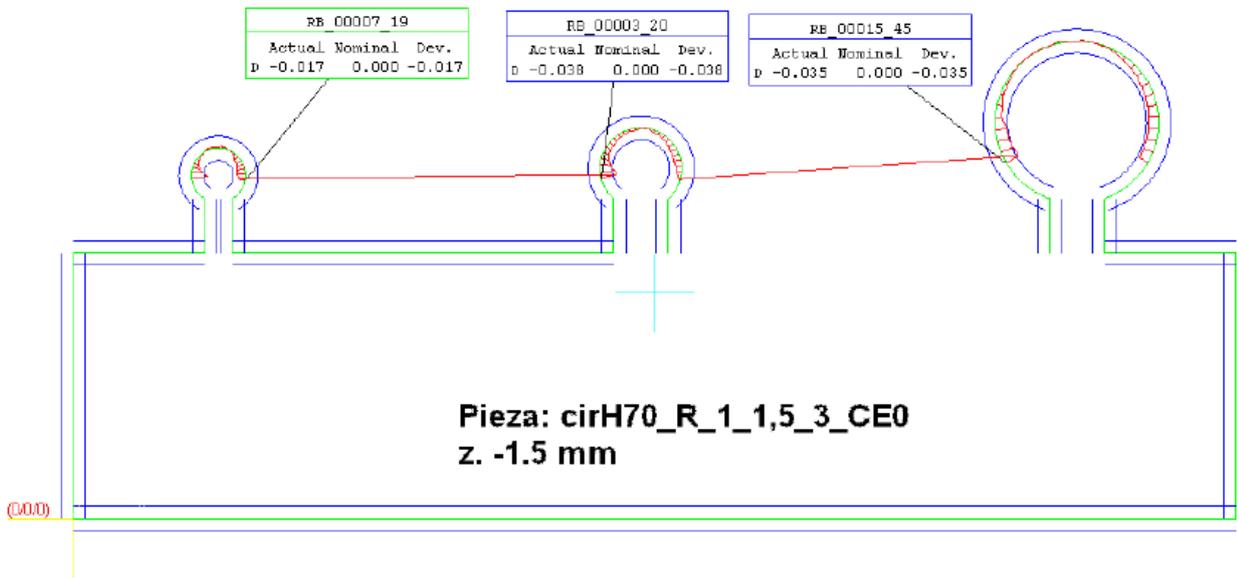


Figura 30. Imagen del archivo de extensión pdf con resultados de desviaciones máximas y defecto de forma (color rojo).

El resto de imágenes de desviaciones máximas de todas las probetas en todos los planos de medición se presentan ordenadamente en el apartado “5.2. Resultados” de los ANEXOS.

3.6.2.6. ACONDICIONAMIENTO DE RESULTADOS

Tras la obtención de los resultados de mediciones de todas las probetas, se ha procedido al acondicionamiento y ordenación de los mismos de cara al correcto entrenamiento de la Red Neuronal Artificial (RNA).

Primeramente se ha optado por pasar los datos de los archivos de texto (.txt) de las mediciones de las probetas, a hojas de cálculo, con el fin de poder manipular dichos resultados de forma efectiva. Para ello se ha creado una MACRO para el programa de hojas de cálculo Microsoft Excel (el código de la misma se encuentra en el apartado “Documento 5.5: Programa MACRO IMPORTAR TXT”), que volcaba en la hoja de cálculo adecuada, las coordenadas reales y teóricas (X, Y), así como la desviación de los puntos palpados por la MMC en cada plano de medición de cada probeta. A tal efecto se han creado tres documentos de hojas de cálculo con los tres espesores ensayados en el presente Trabajo: H40, H70 y H100 (mm), y en cada uno de ellos se han creado hojas de cálculo correspondientes a los resultados de las mediciones en cada radio, es decir, R1, R1.5, R3, R5, R9, R12, R15 y R20 (mm). En cada una de estas hojas de cálculo relativas al radio de cada probeta se ha dispuesto ordenadamente en los distintos planos de medición la información citada anteriormente respectiva a cada punto palpado por la MMC (ver Fig. 1).

PLANO	real		teórica		desviación	
	Xr	Yr	Xt	Yt	Ex	Ey
-1,5	3,9796	7,3444	4,0027	7,3291	-0,0231	0,0153
	4,5181	8,2391	4,5423	8,2259	-0,0242	0,0132
	4,9772	9,1768	5,0016	9,1662	-0,0244	0,0106
	5,3544	10,1498	5,3771	10,1422	-0,0227	0,0076
	5,6454	11,1557	5,6669	11,1505	-0,0215	0,0052
	5,8445	12,1831	5,8675	12,1797	-0,023	0,0034
	5,9599	13,2247	5,9775	13,2237	-0,0176	0,001

Figura 1. Coordenadas reales, teóricas y desviación de varios puntos.

Una vez se han volcado los resultados de todas las mediciones en las hojas de cálculo mediante la MACRO, puede comenzar el siguiente paso: convertir las coordenadas cartesianas reales de todos los puntos en coordenadas polares, es decir, en lugar de dar las coordenadas X e Y reales de los puntos palpados con respecto al cero pieza del CAD, establecer el cero en el centro teórico de cada círculo y así calcular el radio real de cada punto en base a ese centro y el ángulo con respecto a la vertical ortogonal a la base de cada probeta (color verde). (Ver Fig. 2)

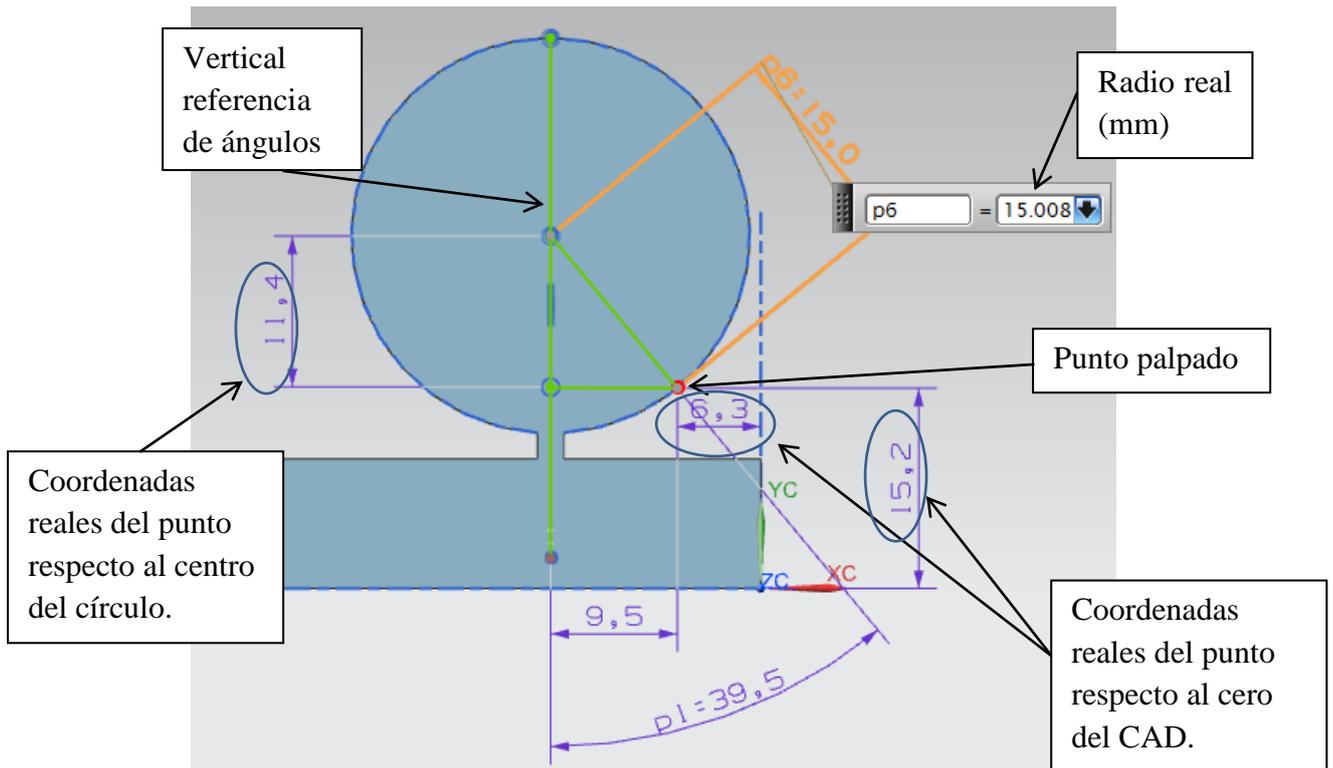


Figura 2. CAD con las cotas reales de un punto palpado en la probeta H100 y R15 en el plano z -1.5 mm.

La razón de transformar las coordenadas reales de los puntos de cartesianas a polares viene de la decisión de presentar los resultados de esta manera con el fin de caracterizar el error en toda la trayectoria circular de forma que se pueda visualizar el defecto de forma en los círculos en función de una posición angular. Así, como se comentará con posterioridad, la red se entañará mediante salidas asociadas a los radios y ángulos de cada probeta resultando algo similar a la gráfica de la Fig. 3:

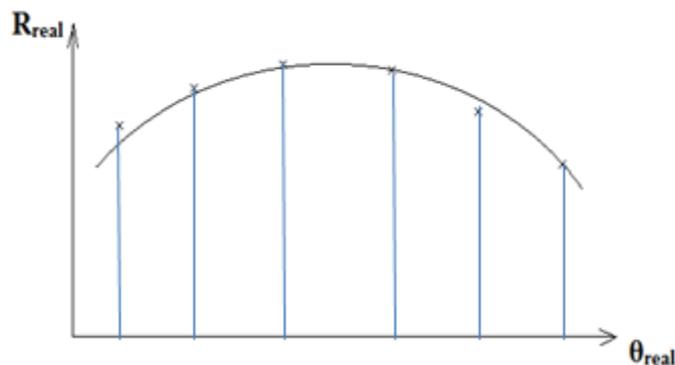


Figura 3. Ejemplo aproximado de curva que relaciona el radio en cada punto en función del ángulo.

Volviendo al ejemplo de la *Fig. 2*, en él se muestra el CAD de una de las probetas que forman parte del estudio, en el cual se ha dibujado mediante sus coordenadas un punto (en rojo) palpado a la probeta. En el CAD se representan varias cotas, como son las del propio punto referenciado respecto al sistema de referencia, y las coordenadas reales del punto respecto al centro del círculo. Pues bien, estas últimas son las necesarias para obtener el radio real de cada punto medido, el cual en el ejemplo de la *Fig. 2* es de 15.008 mm. En definitiva para obtener en las distintas hojas de cálculo las coordenadas polares de todos los puntos palpados en todas las probetas se procede de la siguiente manera:

1. Una vez obtenidas y dispuestas de manera ordenada en sus distintos planos las coordenadas cartesianas de todos los puntos en cada hoja de cálculo, se obtienen las coordenadas del centro teórico de los círculos en cada probeta mediante el CAD de los mismos.
2. Seguidamente se realiza la resta de las coordenadas (X,Y) del centro del círculo y las coordenadas reales de cada punto, obteniéndose así las coordenadas reales del punto respecto al centro del círculo (ver *Fig. 2*).
3. Para obtener el radio real de cada punto palpado, es decir, la línea radial que une el punto real y el centro teórico del círculo, se utiliza el teorema de Pitágoras (ver *Fig. 2*), siendo los catetos las coordenadas reales X e Y del punto respecto al centro del círculo (X' e Y'), y la hipotenusa el propio radio real del punto:

$$R_{real} = \sqrt{X'^2_{real} + Y'^2_{real}} \quad (1)$$

4. A continuación, para hallar el ángulo de esa línea radial con respecto a la línea vertical que pasa por el centro del círculo (ver *Fig.2*), se aplica la función ATAN de Microsoft Excel, que devuelve el arco tangente de un número en radianes. La función se aplica a la relación de coordenadas X' e Y' de cada punto obteniéndose el ángulo real θ' de la siguiente forma:

$$\theta_{rad}' = \tan^{-1} \left(\frac{X'}{Y'} \right) \quad (2)$$

5. Una vez se obtienen todos los ángulos en radianes, se convierten en grados, puesto que es una unidad más intuitiva de la posición real de cada punto en la circunferencia:

$$\theta'_{grad} = \frac{\theta_{rad} \cdot 180}{\pi} \quad (3)$$

6. Al existir puntos palpados en un sector angular de más de 180° , se tuvieron que variar los signos del resultado al aplicar la relación (2), puesto que al cambiar de cuadrante en el círculo los resultados angulares no estaban referidos a la línea vertical de referencia angular. Asimismo en cada cambio de cuadrante se realizó la resta de 180° o 360° según correspondiera, menos el resultado de la relación (3), con el fin de dar los ángulos respecto al mismo sistema de referencia angular, es decir, la línea vertical que pasa por el centro de cada círculo.

Como ya se ha explicado en el apartado “3.6.2.5. *Medición de las probetas*”, en cada probeta, para cada radio se han palpado un número distinto de puntos, por ejemplo para radio 15 mm se han palpado 60 puntos, para el radio 20, 80 puntos, etc., es por ello que a la hora de entrenar la RNA y tal y como se explicará en el siguiente apartado “3.6.2.7. *Entrenamiento de la RNA*”, se han cogido únicamente 30 puntos para todos los radios y en todos los planos, con el fin de facilitar el entrenamiento e interpretación de los resultados. Se escogió ese número puesto que se consideró suficiente para caracterizar el error. Para establecer esos 30 puntos para cada radio, se precisó que el ángulo de cada punto fuese el mismo en todos los radios, es decir, que el punto 1 de cada radio tuviese el mismo ángulo θ_1 para todos los radios, el punto 2 el ángulo θ_2 , y así hasta el punto 30. De esta manera los resultados se presentan de manera más eficiente y ordenada y la red Neuronal puede ser entrenada de forma adecuada.

A continuación se presentan una serie de capturas de pantalla de la hoja de cálculo utilizada para el caso concreto de la probeta de espesor 100 mm, radio 5 mm y plano de medición z-1.5 mm:

Z	real		teórica		Centro teórico		resta centro - pto real		Radio	Ángulo	Ángulo
	Xr	Yr	Xt	Yt	Cx	Cy	Xr'	Yr'	R _{real}	θ _{real} (rad)	θ _{real} (grados)
-1,5	19,728	3,809	19,740	3,799	15,817	6,899	-3,911	3,090	4,985	-0,90211	308,313
	20,059	4,282	20,073	4,274			-4,242	2,617	4,984	-1,01807	301,669
	20,337	4,793	20,349	4,788			-4,520	2,106	4,987	-1,13488	294,976
	20,551	5,333	20,564	5,328			-4,734	1,567	4,987	-1,25125	288,309
	20,701	5,890	20,714	5,888			-4,884	1,009	4,987	-1,36712	281,670
	20,781	6,468	20,798	6,467			-4,964	0,431	4,983	-1,48419	274,962
	20,803	7,065	20,814	7,065			-4,986	-0,166	4,989	1,53754	268,094
	20,743	7,689	20,754	7,691			-4,926	-0,790	4,989	1,41183	260,892
	20,617	8,262	20,627	8,264			-4,800	-1,363	4,990	1,29423	254,154
	20,427	8,810	20,436	8,813			-4,610	-1,911	4,990	1,17793	247,491
	20,175	9,332	20,183	9,336			-4,358	-2,433	4,991	1,06167	240,829
	19,869	9,822	19,872	9,824			-4,052	-2,923	4,996	0,94589	234,196
	19,499	10,272	19,504	10,276			-3,682	-3,373	4,993	0,82924	227,512
	19,083	10,678	19,086	10,682			-3,266	-3,779	4,995	0,71266	220,832
	18,624	11,029	18,627	11,035			-2,807	-4,130	4,993	0,59684	214,196
	18,133	11,333	18,132	11,331			-2,316	-4,434	5,002	0,48127	207,575
	17,606	11,569	17,605	11,568			-1,789	-4,670	5,001	0,36579	200,958
	17,054	11,748	17,053	11,744			-1,237	-4,849	5,004	0,24971	194,307
	16,487	11,857	16,487	11,854			-0,670	-4,958	5,003	0,13438	187,699
	15,910	11,904	15,910	11,898			-0,093	-5,005	5,006	0,01858	181,064
	15,292	11,878	15,293	11,872			0,525	-4,979	5,007	-0,10499	173,985
	14,722	11,786	14,723	11,778			1,096	-4,887	5,008	-0,22052	167,365
	14,163	11,625	14,165	11,618			1,654	-4,726	5,007	-0,33666	160,711
	13,629	11,401	13,631	11,396			2,188	-4,502	5,005	-0,45249	154,074
	13,126	11,117	13,128	11,114			2,691	-4,218	5,003	-0,56792	147,461
	12,653	10,779	12,657	10,774			3,164	-3,880	5,006	-0,68408	140,805
	12,227	10,390	12,233	10,385			3,590	-3,491	5,007	-0,79935	134,201
	11,844	9,953	11,853	9,946			3,973	-3,054	5,011	-0,91546	127,548
	11,516	9,475	11,528	9,468			4,302	-2,576	5,014	-1,03116	120,919
	11,257	8,960	11,261	8,958			4,560	-2,061	5,005	-1,14627	114,323
	11,046	8,421	11,053	8,418			4,771	-1,522	5,008	-1,26209	107,688
	10,904	7,856	10,909	7,855			4,913	-0,957	5,005	1,37844	101,021
	10,825	7,282	10,832	7,281			4,992	-0,383	5,007	1,49423	94,387
	10,818	6,671	10,822	6,671			4,999	0,228	5,004	-1,52522	87,389
	10,884	6,054	10,889	6,055			4,933	0,845	5,005	1,40123	80,284
	11,014	5,491	11,019	5,492			4,803	1,408	5,005	1,28559	73,659
	11,211	4,948	11,213	4,949			4,606	1,951	5,002	1,17014	67,044
	11,471	4,431	11,469	4,430			4,346	2,468	4,998	1,05422	60,402
	11,788	3,945	11,785	3,943			4,029	2,954	4,996	0,93822	53,756
	12,155	3,499	12,153	3,497			3,662	3,400	4,997	0,82248	47,125

En la figura anterior las columnas en color amarillo representan el radio real y ángulo real de cada punto palpado, obtenidos mediante las ecuaciones (1) y (3).

Así, se ha establecido una gráfica con la relación de ángulo real-radio real, para cada plano de medición en cada radio, resultando un total de 10 gráficas (10 planos de medición para cada radio), con las coordenadas polares de todos los puntos palpados por la MMC en cada radio. La siguiente gráfica se corresponde con los resultados de los 40 puntos palpados en la probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm. Como puede verse la mayor parte de valores de radio real se concentra en torno al radio nominal, es decir,

5.000 mm, siendo las desviaciones máximas de unas 15 μm . En el apartado “3.7. Resultados y Conclusiones se comentarán este y otros muchos resultados con mayor grado de detalle.

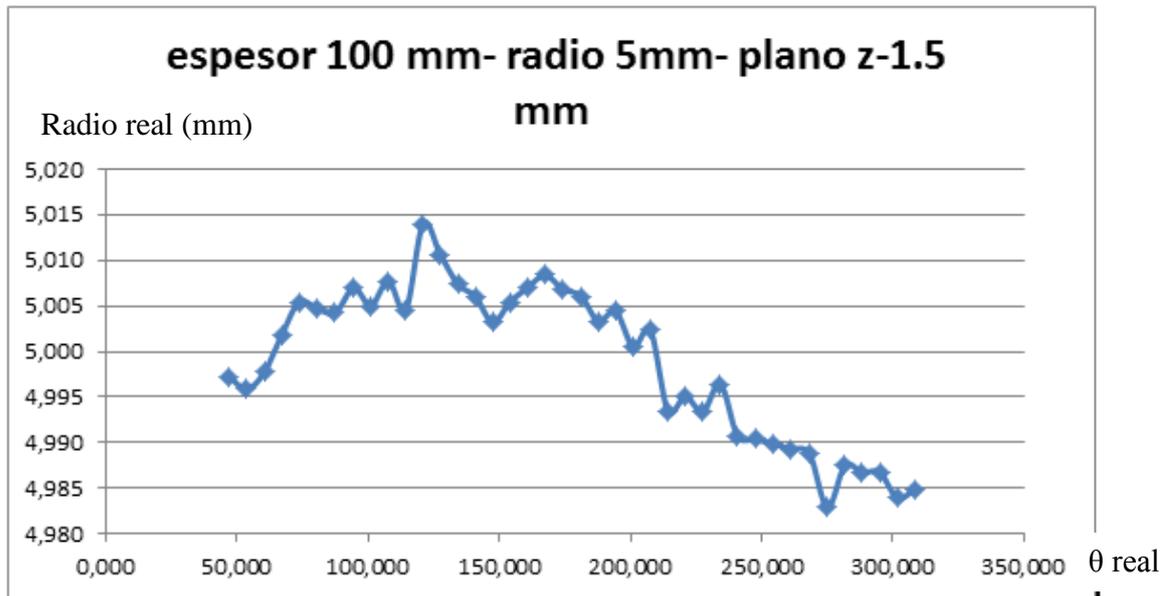


Figura 4. Gráfica ángulo-radio real de un plano de medición en una probeta.

Sin embargo, como ya se ha explicado, el entrenamiento de la RNA se ha llevado a cabo con 30 puntos para todos los radios, con lo cual ha sido necesario realizar una interpolación entre los valores reales de todas las gráficas (columnas en amarillo), obteniéndose 30 valores de ángulo y radio para todos los radios. Previo paso a la interpolación, la cual se ha llevado a cabo mediante una función de Interpolación de Microsoft Excel, ha sido necesario establecer unos ángulos máximos y mínimos para todas las probetas, a partir de los cuales fijar el resto de ángulos para así poder presentar los resultados de forma ordenada y caracterizar el error con el mismo criterio para todos los radios. Esto ha sido así debido a la imposibilidad del Software de medición por coordenadas *Holos* de establecer un mismo ángulo de inicio y final de palpado para todos los radios, puesto que como se ha explicado en el apartado “3.6.2.5. Medición de las probetas” el recorrido del palpador en los puntos palpados se establecía pinchando con el ratón en el punto del CAD en el cual se consideraba que no iba a ocurrir una colisión del palpador con la propia probeta, luego esto ha dado lugar a que en cada radio el ángulo inicial y final de los puntos palpados haya sido diferente para cada radio y en cada espesor. A continuación se muestran unas tablas con los ángulos iniciales y finales de palpado respecto a la línea de referencia angular.

Ángulos mín. y máx.		
H100	θ_{real} (grados)	θ_{real} (grados)
R3	59,157	302,797
R5	43,191	315,595
R9	38,725	320,236
R12	36,562	306,988
R15	39,463	320,169
R20	29,277	330,874
MEDIA	41,062	316,110

Ángulos mín. y máx.		
H70	θ_{real} (grados)	θ_{real} (grados)
R3	54,514	304,791
R5	61,173	298,304
R9	53,436	304,124
R12	53,658	307,338
R15	41,597	313,487
R20	44,317	319,781
MEDIA	51,449	307,971

Ángulos mín. y máx.		
H40	θ_{real} (grados)	θ_{real} (grados)
R3	69,984	296,166
R5	48,437	309,364
R9	45,204	313,320
R12	43,727	320,950
R15	43,035	312,854
R20	44,643	311,891
MEDIA	49,172	310,757

Ángulos mín. y máx.		
TOTAL	θ_{real} (grados)	θ_{real} (grados)
MEDIA	47,228	311,613

Conjunto de Tablas 1. Ángulos mínimos y máximos para cada radio en cada espesor.

Como puede verse se ha calculado la media en cada espesor y la media total (subrayado amarillo) para todos los ángulos mínimos y máximos. Por lo que de esta manera, redondeando se establecieron los siguientes ángulos mínimo y máximo para todos los radios de cara a la interpolación de resultados:

Ángulos mín. y máx.		
TOTAL	θ_{real} (grados)	θ_{real} (grados)
MEDIA	45	320

Como se puede ver en el *Conjunto de Tablas 1* no aparecen los radios más pequeños (1 y 1.5 mm). Esto es así ya que al observar los resultados de defecto de forma y desviaciones en las probetas de estos radios y debido a la pérdida de presión de dieléctrico en estas trayectorias por el radio de las boquillas de la máquina de WEDM, se concluyó que en estos radios se dan más efectos que los que se quiere tratar en el presente proyecto, luego se terminaron por descartar.

Mediante la función de interpolación se interpolaron todos los resultados de los radios reales de los puntos, entre los ángulos mínimo y máximo establecidos, 45 y 320°, dando lugar a 30 puntos en cada plano de medición para cada radio (los resultados de todas las mediciones y las tablas con los puntos interpolados en todos los radios se encuentran en el apartado “Documento 5.2. Resultados de mediciones”). A continuación se presenta un pantallazo ilustrativo de cómo se ha hecho uso de la hoja de cálculo para el caso concreto anterior de Espesor 100 mm, radio 5mm y plano de medición z-1.5 mm:

Ángulos mín y máx		Puntos RNA		
θ_{real}	θ_{real}	Punto	R	θ
43,191	315,595	1	4,998	45,000
		2	4,996	54,483
Ángulos establecidos		3	5,000	63,966
45,000	320,000	4	5,005	73,448
Divisiones		5	5,005	82,931
Nº puntos	Ángulo	6	5,006	92,414
30	9,483	7	5,005	101,897
		8	5,006	111,379
		9	5,014	120,862
		10	5,009	130,345
		11	5,006	139,828
		12	5,004	149,310
		13	5,007	158,793
		14	5,008	168,276
		15	5,006	177,759
		16	5,003	187,241
		17	5,003	196,724
		18	5,002	206,207
		19	4,994	215,690
		20	4,994	225,172
		21	4,996	234,655
		22	4,991	244,138
		23	4,990	253,621
		24	4,989	263,103
		25	4,985	272,586
		26	4,987	282,069
		27	4,987	291,552
		28	4,984	301,034
		29	4,985	310,517
		30	4,987	320,000

Ángulos mínimo y máximo para el plano de medición

Ángulos mínimo y máximo para todas las probetas

Los 30 puntos interpolados que se utilizarán para entrenar la RNA

Como ya se ha explicado la columna de ángulo (θ) del pantallazo anterior es igual para todos los radios y planos de medición puesto que el número de puntos (30) y los ángulos mínimo y máximo establecido son iguales (45 y 320°).

En la *Figura 5* puede verse una gráfica que recoge los 30 puntos interpolados para el ejemplo de la *Fig. 4* (radio 5 mm de probeta de espesor 100 mm y plano de medición z-1.5 mm), junto con los 40 puntos reales en los cuales se ha interpolado:

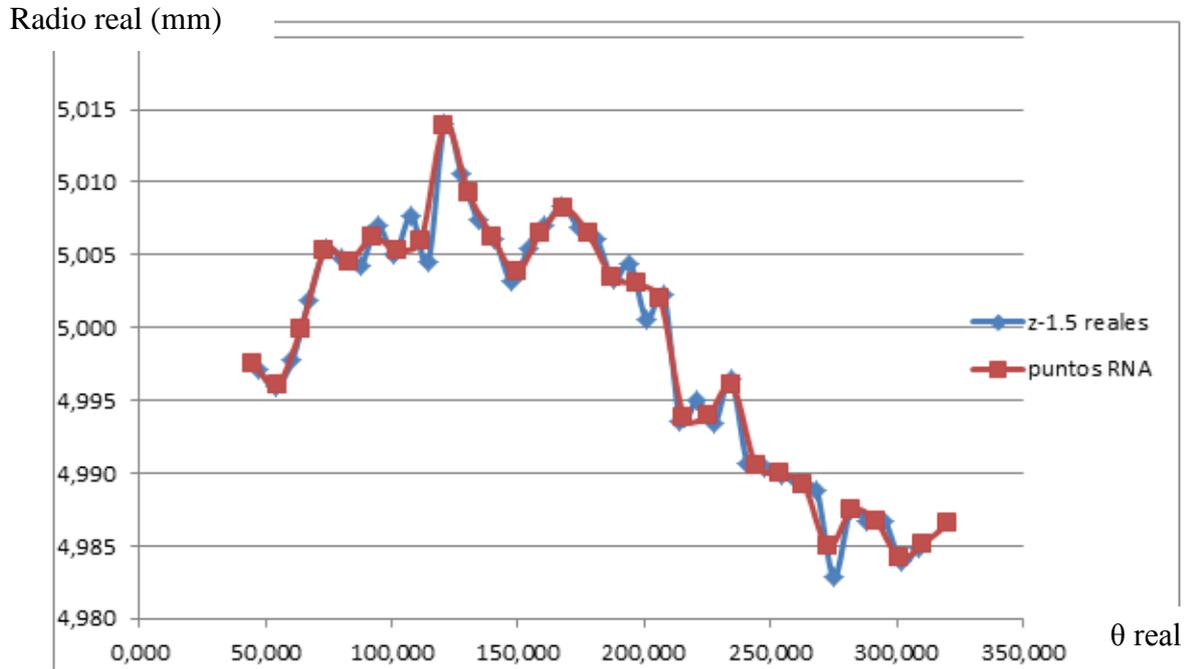


Figura 5. Gráfica con radios y ángulos interpolados de 45 a 320 °.

Los puntos de color azul son los puntos reales para el plano de medición z-1.5 mm y los de color rojo son los puntos interpolados entre los ángulos mínimo y máximo. Como puede verse en la gráfica existen ciertos puntos que se extrapolan fuera del rango de $[45^\circ, 320^\circ]$, debido a que como figura en el *Conjunto de Tablas 1* existen ciertos radios (sobre todo los de menor valor) que presentan puntos fuera de este rango. En la siguiente gráfica (*Fig. 6*) se muestra un caso en el que los puntos fuera de rango o extrapolados pueden distorsionar la desviación que pudiesen tener realmente:

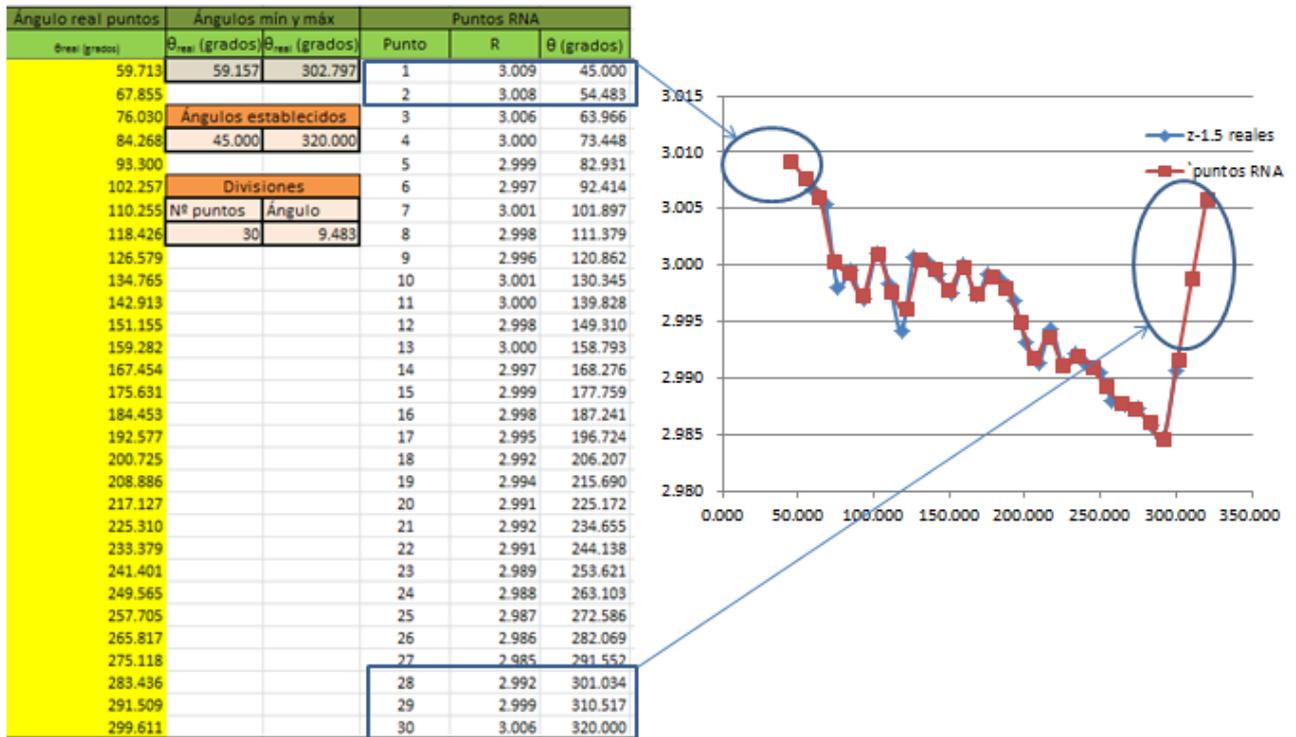


Figura 6. Puntos extrapolados.

La tabla y gráfica de la Fig. 6 se trata del plano de medición z-1.5 mm de una probeta de espesor 70 mm y radio 3 mm, y como se puede ver existen en total 5 puntos extrapolados, siendo los tres últimos los que de alguna manera pudieran desvirtuar o falsear la caracterización del error puesto que siguen la tendencia del último punto interpolado, que como puede verse presenta una elevada pendiente, dando lugar a una desviación mayor que la que pudiera darse realmente si se hubiese podido medir con mayor sector angular.

Al ser estos casos pocos viendo el resto de gráficas, y como se comentará en el siguiente apartado, los puntos que presentan esta característica de estar fuera de rango, es decir, los puntos que la función de interpolación extrapola, se han considerado como puntos nulos o “cero” a efectos del entrenamiento de la RNA mediante la función *NaN* del programa mediante el cual se ha implementado la misma, *Matlab*. Por lo que la Red Neuronal no los tendrá en cuenta a la hora de entrenar la misma.

Una vez que se han calculado todos los 30 puntos para cada plano de medición y en cada radio, puede comenzar la última fase del estudio: el entrenamiento de la Red Neuronal Artificial (RNA).

3.6.2.7. ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Introducción

Como ya se ha explicado en varios apartados del presente estudio, el objetivo del mismo es la caracterización del error en trayectorias circulares en electroerosión por hilo, utilizando para ello una herramienta de predicción que en este caso ha sido una Red Neuronal Artificial (RNA). Por medio de la misma se ha conseguido predecir el defecto de forma que tendrán probetas de espesores y radios diferentes a los ensayados, con el consiguiente ahorro económico y humano.

Una vez se obtuvieron los 30 puntos interpolados de los puntos medidos por la MMC con los radios y los ángulos reales (R , θ), se pudo iniciar el proceso de entrenamiento de la RNA escogida para predecir el error.

Tal y como se ha explicado de manera extensa en el apartado “3.6.1. Marco Teórico”, la Red Neuronal ha de ser previamente entrenada con el fin de que aprenda el comportamiento que debe tener, es decir, para que aprenda a dar la respuesta adecuada a la configuración de estímulos o patrones de entrada que se le presenten. Siguiendo esta línea, obviamente la Red debe tener una serie de entradas, y unas salidas conectadas con dichas entradas. En el caso del presente estudio se decidió que los datos de entrada a la red fuesen el espesor de la probeta, el radio, y el plano de medición de la misma; siendo las salidas para cada espesor radio y plano de medición, los 30 puntos interpolados que se han comentado en el párrafo anterior (ver *Fig.1*).

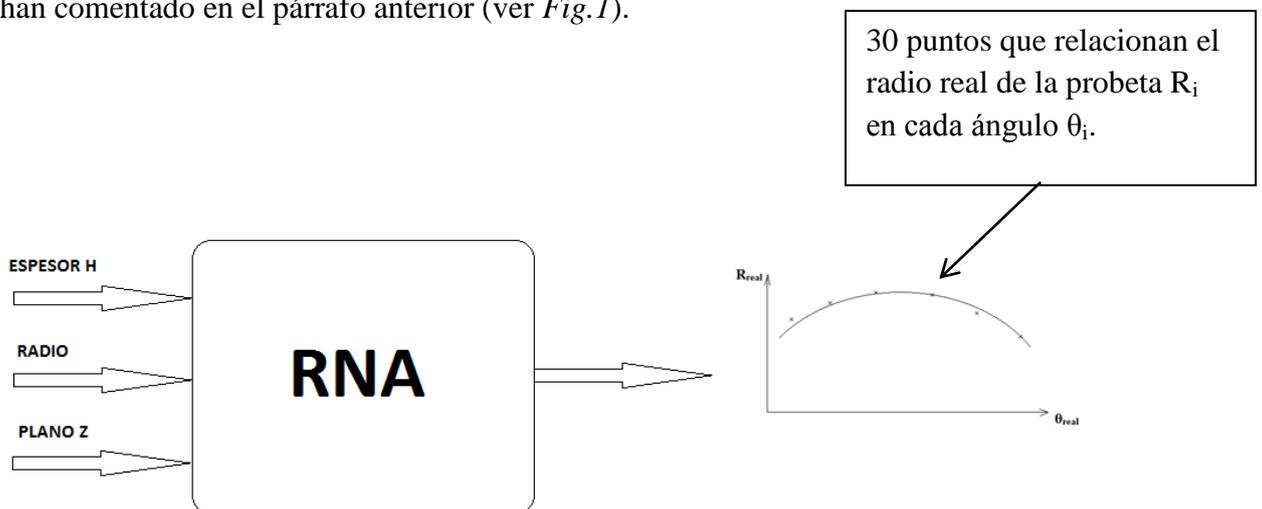


Figura 1. Esquema de entradas y salidas de la RNA utilizada.

Por ejemplo para la probeta de espesor 70 mm, radio 15 mm y plano de medición z-7 mm (entradas), se tiene una salida que serán sus coordenadas polares interpoladas (los 30 puntos (R, θ)).

RNA utilizada.

Para la predicción del error se ha utilizado el tipo de Red Neuronal Artificial denominado: “*Layer Recurrent Neural Network*”. Implementada con 2 capas, esta RNA contiene la peculiaridad de que la salida de la segunda capa retroalimenta a la función de transferencia de la primera capa, como se muestra en la *Figura 2*. Esto permite que esta red detecte y genere patrones que varían en el tiempo. Esto es, permite que la red tenga una respuesta dinámica infinita para introducir datos de series temporales, como sería el caso de este trabajo en el cual los resultados de las mediciones de las probetas son valores medidos en determinados momentos y ordenados cronológicamente (se palparon puntos con la MMC de manera secuencial en el tiempo).

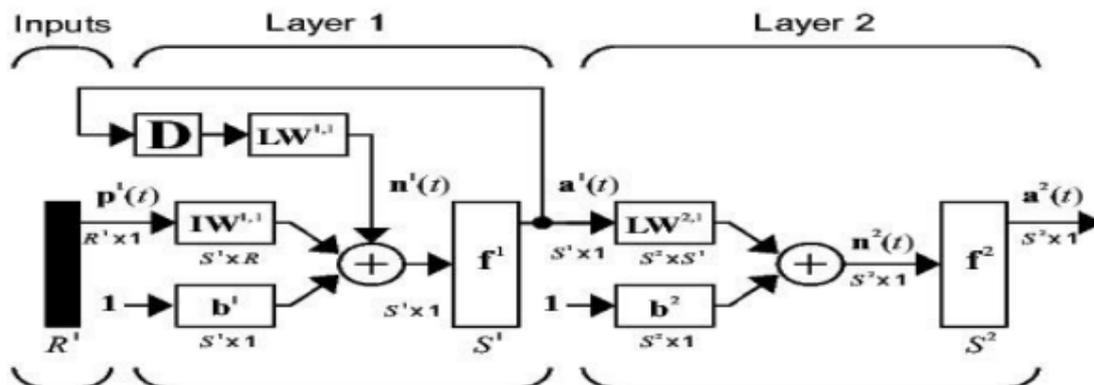


Figura 2. Esquema de RNA Layer Recurrent.

Diseño de la arquitectura

En esta fase se determina el número de neuronas que tendrá la red, así como su disposición en capas y la conectividad entre las mismas. A partir de un análisis de los datos del problema, se determinaron las entradas y salidas a la red (ver *Fig. 1*). Esta

etapa es crítica, puesto que la topología de la red determina la representatividad de la misma, y por tanto, la cantidad de conocimiento que puede albergar. La no existencia de métodos para determinar el número de neuronas y capas a utilizar hizo que se tuviese que recurrir a la técnica de *ensayo y error*, probando varias topologías diferentes variando la disposición de neuronas en cada capa, para finalmente conseguir una que se adaptase satisfactoriamente al problema. Y esta configuración resultó en una RNA del tipo, como ya se ha comentado, *Layer Recurrent Neural Network* con dos capas, una oculta y la capa de salida, la cual retroalimentaba a la oculta. El número de neuronas dispuestas en la capa oculta es de 5, y se utilizaron funciones tangente sigmooidal como funciones de activación para las neuronas de la capa oculta, y función identidad en la capa de salida.

Fase de Entrenamiento

Una vez diseñada la arquitectura de la red y las funciones que la rigen, se procedió a entrenar la red para que aprendiese el comportamiento que debía tener, es decir, para que aprendiese a dar la respuesta adecuada a la configuración de estímulos o patrones de entrada que se le presentasen. Por tanto lo que se pretende con el entrenamiento es presentándole a la red las entradas asociadas al espesor, radio y plano de medición de cada probeta y las salidas referidas al conjunto de los 30 puntos interpolados (R, θ) , ésta sea capaz de predecir los 30 puntos, para cualquier conjunto de entradas. Para ello se utilizaron en el entrenamiento todas las probetas menos las siguientes:

- H40 R3
- H70 R9
- H100 R15

Esto es así ya que, como se explicará en la siguiente fase (Fase de validación), para comprobar que el entrenamiento se ha realizado correctamente y ver que la red puede generalizar los resultados del entrenamiento, se ha comprobado para estas tres probetas las cuales no han formado parte del entrenamiento, que la red da las respuestas esperadas (una aproximación a los 30 puntos (R, θ) interpolados para esas entradas). Se han elegido esos valores de espesor y radio de tal manera que los tres espesores y radios fuesen diferentes y suficientemente espaciados.

En la vida de las redes con comportamiento aprendido se distinguen dos fases o periodos claramente diferenciados. Durante la fase de aprendizaje se entrena a la red para que vaya modificando sus pesos sinápticos, adaptándolos paulatinamente para que la respuesta de la red sea correcta. Después viene la fase de funcionamiento real o fase de ejecución, durante la cual la red ya es operativa y sus pesos sinápticos no volverán a ser modificados.

Existen distintos métodos de entrenamiento para redes neuronales los cuales hacen uso de diferentes métodos matemáticos de diversa complejidad. En el caso del presente estudio se utilizó el algoritmo de entrenamiento de “*Levenberg-Marquardt*”. Este algoritmo es una modificación del método de Newton, el que fue diseñado para minimizar funciones que sean la suma de los cuadrados de otras funciones no lineales; es por ello que el algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, tiene un excelente desempeño en el entrenamiento de redes neuronales donde el rendimiento de la red esté determinado por el error medio cuadrático (MSE), el cual se utilizó para seleccionar la topología de la red utilizada.

En cualquier caso, en líneas generales, en la fase de entrenamiento se hizo uso de un aprendizaje supervisado. Como ya se explicó en el apartado “3.6.1. Marco Teórico” con esta técnica de aprendizaje el entrenamiento consiste en presentarle a la red repetitivamente patrones de estímulos de entrada pertenecientes a un juego de ensayo. El juego de ensayo está formado por parejas “patrón de estímulos- respuesta correcta”, en este caso el patrón de estímulos han sido las entradas (espesor, radio y plano de medición) y la respuesta correcta, los 30 puntos (R, θ) interpolados. Cada pareja se denomina hecho. En el juego de ensayo debe estar representada equilibradamente toda la información que la red necesite aprender.

Al realizar el entrenamiento la respuesta que da la red a cada patrón se compara con la respuesta correcta ante dicho patrón, y en virtud de esa comparación se reajustan los pesos sinápticos. Este reajuste de los pesos sinápticos se realizó previa inicialización de los mismos mediante el método de inicialización de los pesos w_{ij} , de “*Nguyen-Widrow*”, que se utiliza cuando la función de activación de las neuronas ocultas es sigmoideal, y busca optimizar la velocidad de aprendizaje de las neuronas ocultas. La elección de los pesos iniciales influirá en si la red llega al óptimo global o no, y cómo de rápido converge.

Cuando ante un patrón de entrada la red de neuronas ya responde correctamente, se pasa al siguiente patrón de juego de ensayo y se procede de la misma manera.

Cuando se termina con el último patrón del juego de ensayo, se tiene que volver a empezar con el primero, ya que los pesos se han ido modificando. Al cabo de unos pocos pasos de entrenamiento completos, con todos los elementos del juego de ensayo, los pesos sinápticos de todas las neuronas se estabilizan en torno a unos valores óptimos. Se dice entonces que el algoritmo de aprendizaje converge. Es decir, después de sucesivas presentaciones de todos los patrones estimulares del juego de ensayo, la red, responderá correctamente a todos ellos y se puede considerar entrenada y dar por terminada la fase de aprendizaje.

En conclusión, cuando tras presentarle a la red los patrones de entradas (radio, espesor y plano), y las salidas (los 30 puntos interpolados (R, θ) obtenidos de las mediciones), la respuesta de la red se aproxime con el mínimo error posible a esos 30 puntos (los valores de radios y ángulos), se considerará que la red converge y finalizará el

entrenamiento de la misma. En el siguiente apartado “3.7. Resultados y conclusiones”, se mostrarán las gráficas comparativas de la respuesta esperada en cuanto a (R, θ) y la salida dada por la red finalmente para cada probeta, y se cuantificará el error.

En algunas aplicaciones se observa que las redes neuronales artificiales pueden caer en un problema conocido como sobre-entrenamiento, en donde la red no es capaz de responder adecuadamente ante datos de entrada diferentes a los datos que se utilizaron para el proceso de aprendizaje, pero que hacen parte del problema que se quiere solucionar. Visto de otra manera, la red se especializa o “memoriza” un conjunto de datos determinados con un error muy pequeño.

Este sobre-entrenamiento trae como consecuencia que el error de test o verificación de la red sea mucho mayor que el de entrenamiento lo cual es indeseable cuando la red está trabajando en la solución de una aplicación específica. Surge entonces esta técnica, denominada regularización, cuyo objetivo es minimizar el fenómeno del sobre-entrenamiento y por ende sus efectos. El fenómeno del sobre-entrenamiento se hace más evidente cuando los datos de entrada están contaminados con ruido (en este caso existe ruido al existir valores dispares en los radios reales de los puntos medidos de las probetas). El objetivo de la regularización es garantizar un adecuado aprendizaje evitando este problema.

En la red que concierne al presente estudio se utilizó para solventar este problema el método de *Regularización Bayesiana* que se trata de una técnica donde el entrenamiento de la red neuronal se aborda desde una perspectiva probabilística donde se considera una distribución de probabilidad en los valores de los pesos, de tal manera que se consiga el efecto de minimizar el sobre-entrenamiento.

Fase de validación o test

Tras la fase de entrenamiento viene la fase de ejecución, durante la cual se pide a la red que responda a estímulos diferentes a los presentados durante la fase de entrenamiento. Gracias a los ejemplos aprendidos del juego de ensayo, la red debe ser capaz de generalizar y dar respuestas correctas ante patrones de estímulos nuevos. En otras palabras, una vez terminado el entrenamiento, una red puede generalizar; es decir, ante entradas similares a las de su juego de ensayo, produce salidas correctas.

Para ello, como se ha explicado en el apartado anterior, se dejaron fuera del juego de ensayo de entrenamiento las siguientes probetas:

- H40 R3
- H70 R9
- H100 R15

Las cuales se presentaron como entradas a la red, solo que en el caso de la fase de validación no se realizó ningún ajuste en los pesos sinápticos. La red reconoce y evalúa y da una respuesta a partir de los pesos establecidos durante el entrenamiento. En el siguiente apartado 3.7. *Resultados y conclusiones*”, se mostrará como la validación resultó ser satisfactoria para los tres casos, siendo el error entre el valor de radio predicho por la red y el valor real medido por la MMC (de los 30 puntos interpolados) muy pequeño.

3.7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.7.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado del trabajo se presentarán los resultados de la Red Neuronal Artificial utilizada para predecir el error en trayectorias circulares en electroerosión por hilo (WEDM).

Para ello se incluyen tres subapartados en los que se va de lo general, que en este caso es el defecto de forma en las probetas cortadas, a lo particular, es decir, en el caso de este estudio, la presentación y discusión de los resultados de validación de la RNA para las probetas mencionadas en el apartado “3.6.2.7. *Entrenamiento de la RNA*”; para finalizar con la generalización de la red, demostrando que la misma es capaz de predecir el error en el corte para otros espesores y radios distintos a los cortados.

A continuación se presenta una tabla resumiendo la batería de ensayos realizada, en la cual se ha marcado con un “tic” el procedimiento al que se ha sometido cada radio de cada probeta:

Probeta	Radio	Cortada y medida	Entrenamiento RNA	Validación RNA	Generalización RNA
cirH40C_R_1_1.5_3	R1	✓			
	R1,5	✓			
	R3	✓		✓	
cirH40C_R_5_9_12	R5	✓	✓		
	R9	✓	✓		
	R12	✓	✓		
cirH40C_R_15	R15	✓	✓		
cirH40C_R_20	R20	✓	✓		
cirH70C_R_1_1.5_3	R1	✓	✓		
	R1,5	✓	✓		
	R3	✓	✓		
cirH70C_R_5_9_12	R5	✓	✓		
	R9	✓		✓	
	R12	✓	✓		
cirH70C_R_15	R15	✓	✓		
cirH70C_R_20	R20	✓	✓		
cirH100C_R_1_1.5_3	R1	✓	✓		

	R1,5	✓	✓		
	R3	✓	✓		
cirH100C_R_5_9_12	R5	✓	✓		
	R9	✓	✓		
	R12	✓	✓		
cirH100C_R_15	R15	✓		✓	
cirH100C_R_20	R20	✓	✓		
cirH50C_R_4	R20	✓	✓		✓
cirH80C_R_10	R20	✓	✓		✓

Tabla 1. Batería de ensayos realizados.

3.7.2. DEFECTO DE FORMA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES

El defecto de forma en trayectorias circulares se trata de la desviación de las medidas reales de las probetas circulares con respecto a su medida nominal o teórica.

Como ya se explicó en el apartado “3.4. Antecedentes”, la electroerosión por hilo (WEDM) se trata de un proceso de mecanizado de elevada precisión, y lo que persigue este proyecto a largo plazo es precisamente disminuir al máximo posible la pérdida de precisión (En el apartado “3.8. Valoraciones generales y Líneas Futuras”, se explicará cómo). En relación al objeto del presente estudio, la pérdida de precisión en el proceso de corte se da, entre otros factores por la pérdida de verticalidad del hilo, es decir por la deformación que presenta éste durante el proceso de corte (Ver Fig. 1).

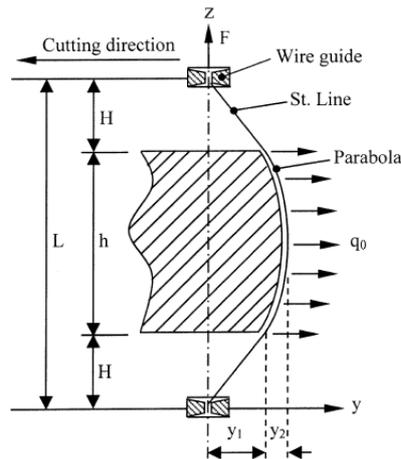
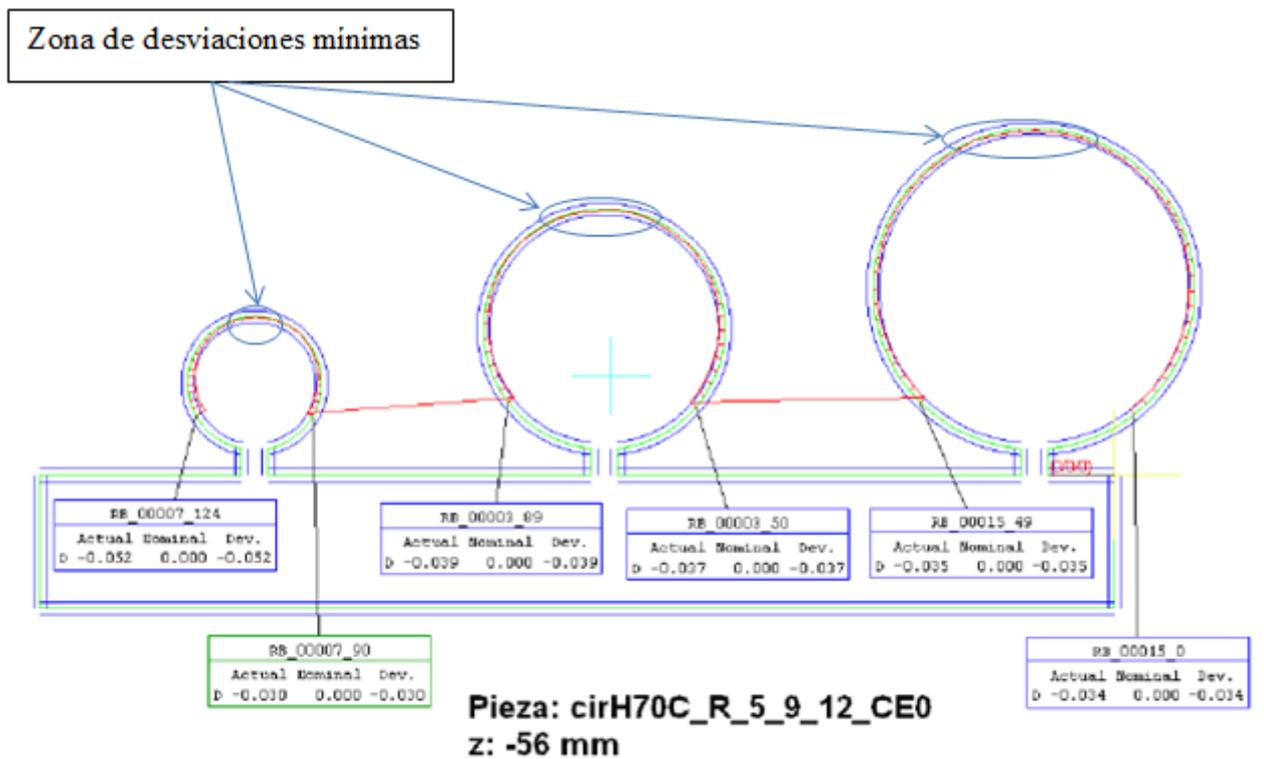
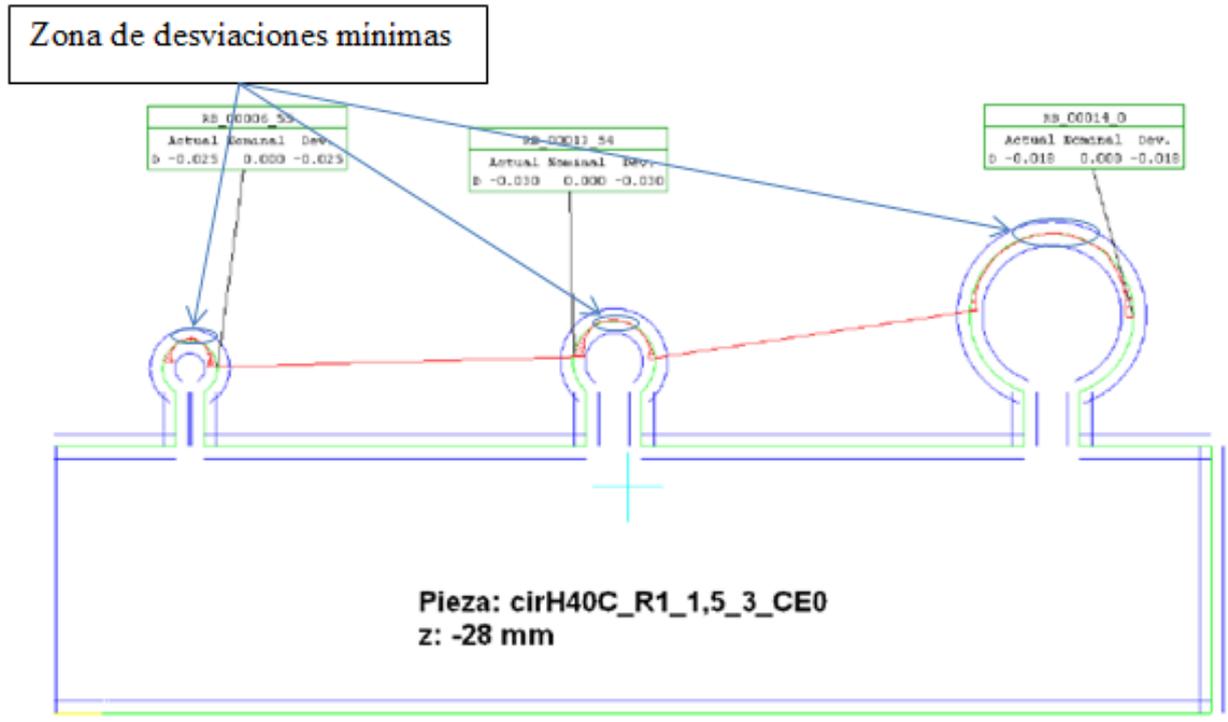


Figura 1. Flexión del hilo durante el corte.

En lo que respecta a la forma real de las probetas cortadas verificada tras la medición de las mismas, en todos los casos de las probetas que forman parte del estudio, es decir,

para todos los radios y todos los espesores, el defecto de forma sigue el mismo patrón tal y como se puede ver en los resultados de mediciones de la Fig. 2:



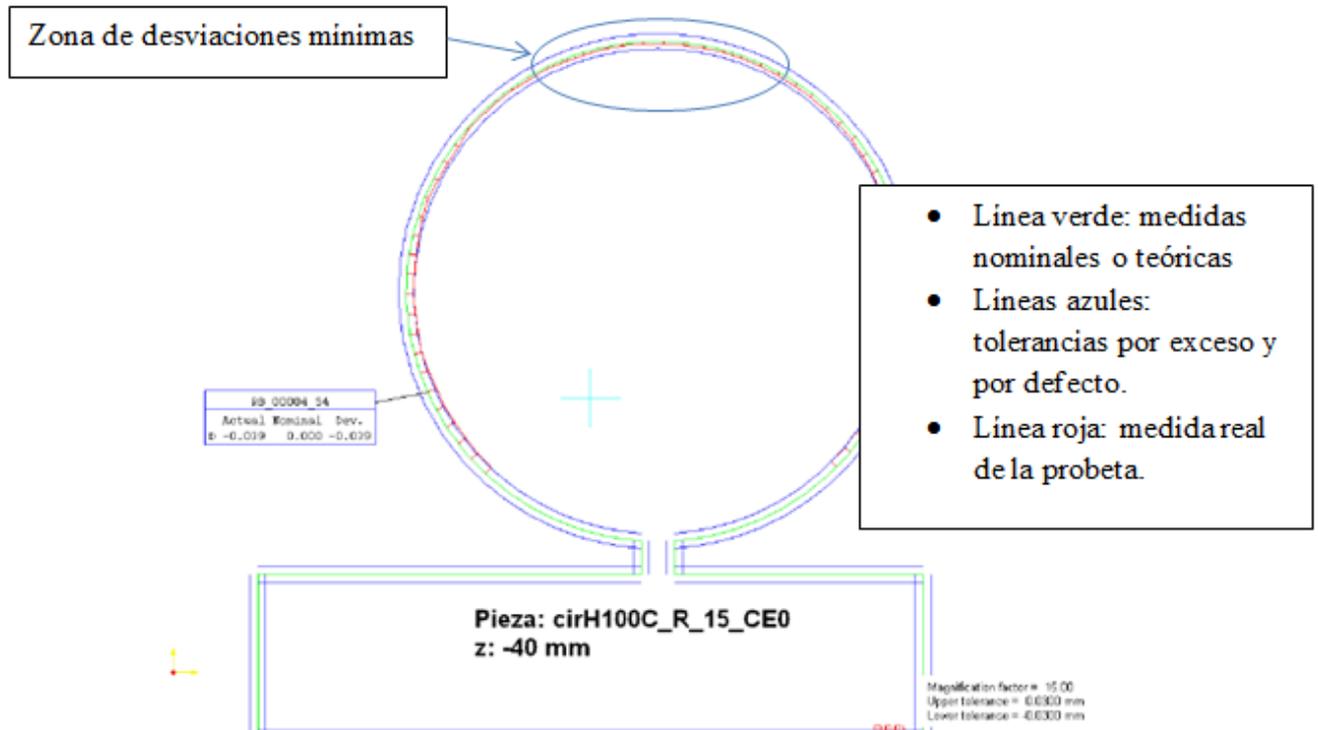


Figura 2. Imágenes pdf de las mediciones de distintas probetas de espesores y radios diferentes donde se aprecia el mismo patrón de defecto de forma.

El resto de imágenes de las mediciones de las probetas se incluyen en los Anexos, y se puede ver claramente que se repite un patrón de desviación en todas ellas y en todos los planos de medición, es decir, a lo largo de todo su espesor: las chispas arrancan más material al inicio y al final de la trayectoria circular (ver Fig. 2), estabilizándose el corte aproximadamente en el punto más alto de los círculos o dicho de otra forma la desviación se hace mínima a los 180° del inicio del corte (ver Fig. 2).

Como se comentó al principio del apartado “3.6.2. Marco metodológico” en el ámbito de la investigación en electroerosión por hilo habitualmente se han estudiado esquinas y radios de redondeo ($0.3 < R < 1$ mm), teniéndose olvidadas los radios mayores (los cuales se contemplan en el presente estudio). Es por ello que presenta gran interés estudiar el defecto de forma en estas geometrías, viéndose que, efectivamente, siguen un patrón de forma repetitivo, de ahí a que se quiera mejorar (En el apartado “3.8. Valoraciones Generales y Líneas futuras”, se explicará cómo).

Además de este patrón de defecto de forma repetitivo en todos los radios espesores y planos de medición, cabe resaltar otro aspecto importante en cuanto a la forma final de las probetas cortadas, y esta es la variación de desviaciones a lo largo del espesor de las probetas cortadas. Esto es, viendo los resultados de las mediciones por planos de las

distintas probetas, se ha llegado a otro aspecto en común en cuanto a la forma real de las mismas. Para ilustrar dicho aspecto se muestran las siguientes imágenes (Fig. 4 a, b y c) de resultados de desviaciones en varios planos de medición de la misma probeta. En el resto de casos (resto de probetas) sucede lo mismo y se pueden verificar en los Anexos.

A continuación se muestran las desviaciones máximas y el defecto de forma de una probeta de espesor 40 mm y radios 5, 9 y 12 mm y los planos de medición z-1.5 mm, z-24 mm y z- 38.5 mm, es decir, arriba, en medio y en la parte inferior de la probeta (ver Fig. 3)

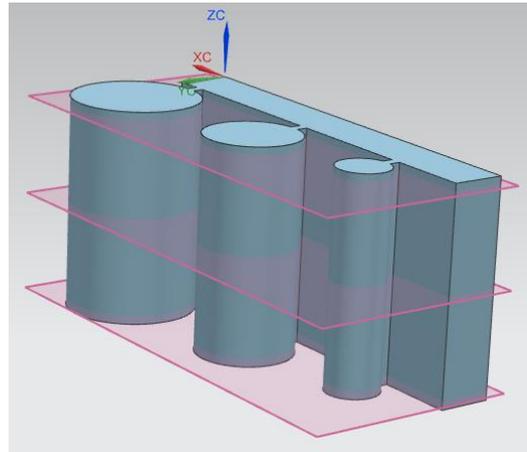


Figura 3. Planos z-1.5, z-24 y z- 38.5 mm de la probeta de espesor 40 mm y radios 5, 9 y 12 mm.

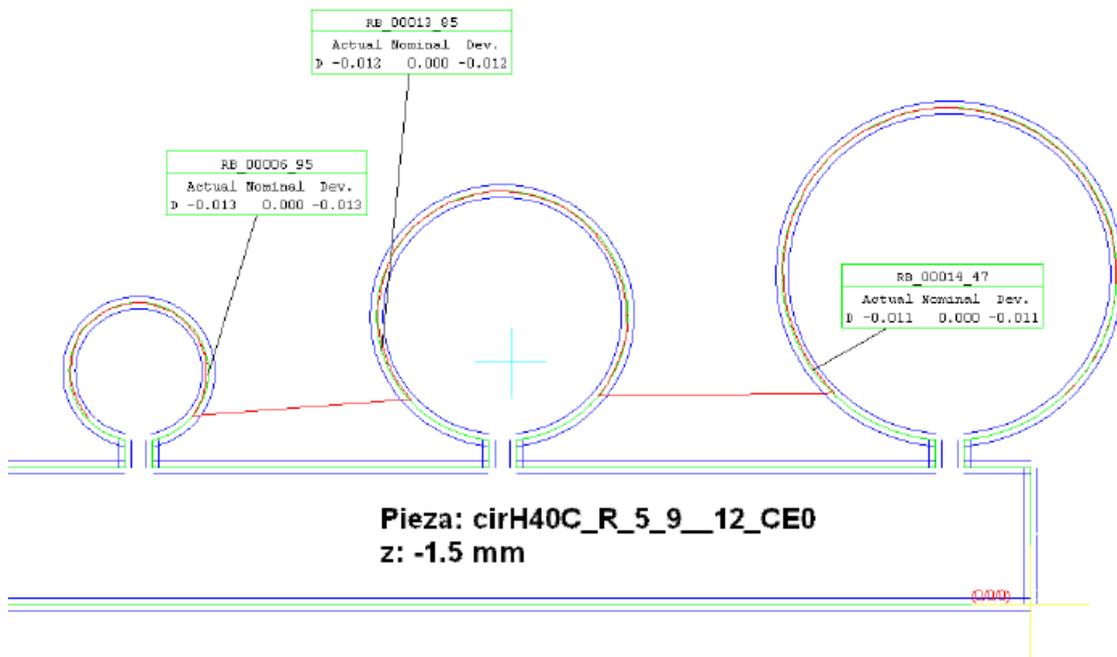


Figura 4. a) Desviaciones máximas en cada radio en el plano z-1.5 mm (parte superior de la probeta).

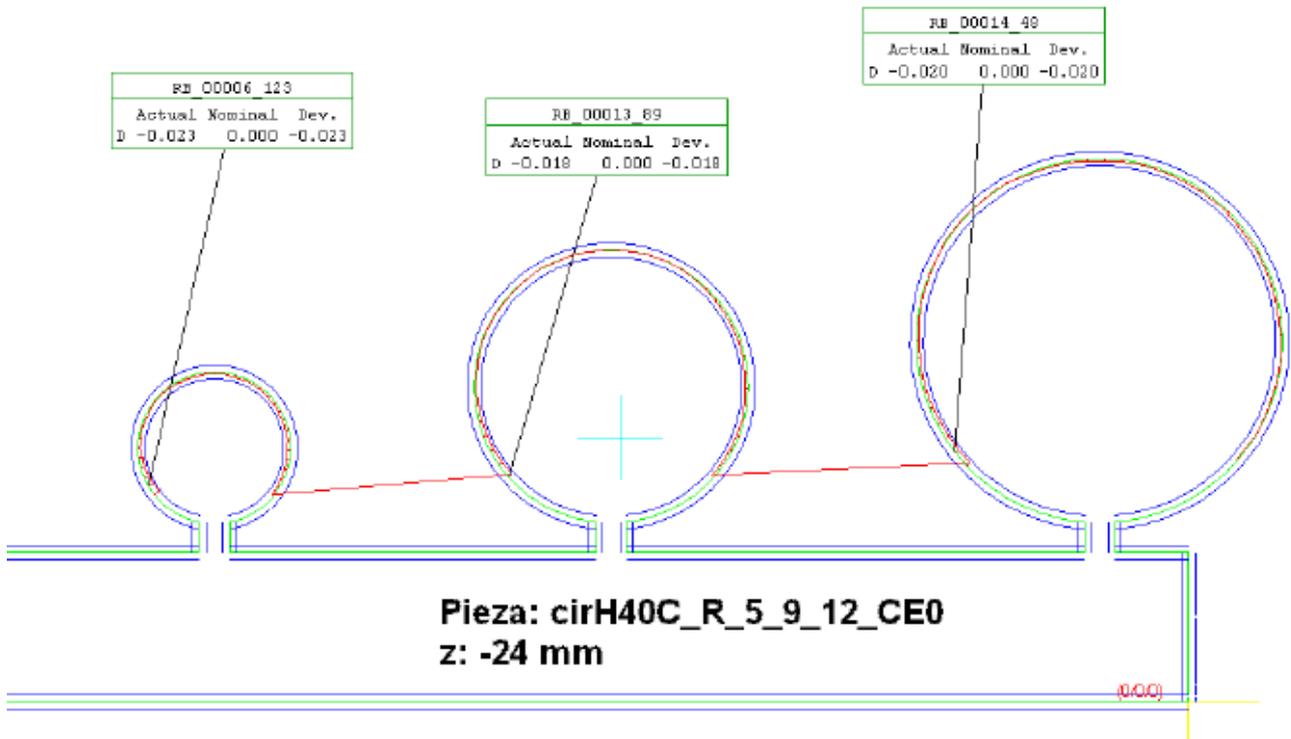


Figura 4. b) Desviaciones máximas en cada radio en el plano z-24 mm (medio de la probeta aprox.)

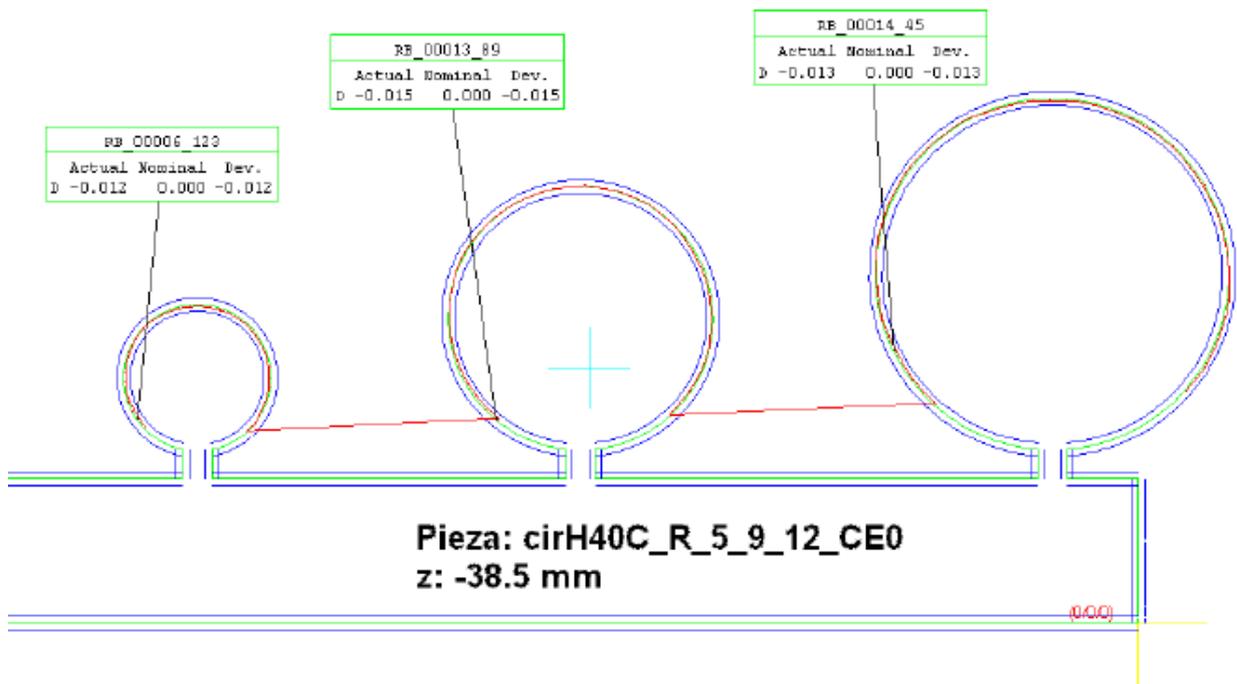


Figura 4. c) Desviaciones máximas en cada radio en el plano z-38.5 mm (parte inferior de la probeta)

Como puede verse en el grupo de imágenes de la *Fig. 4*, en las partes superior e inferior de la probeta ($z-1.5$ y $z-38.5$ mm) las desviaciones máximas con respecto a las medidas nominales son menores que en el medio de la probeta ($z-24$ mm), y por tanto se repite el siguiente patrón en todas las probetas: en el espesor de la probeta conforme nos vamos acercando a la parte media de la misma, las desviaciones son mayores, es decir, las chispas del hilo arrancan más material en esta parte. En la *Fig. 5* se muestra de manera exagerada la forma que presentan las probetas de geometría circular.

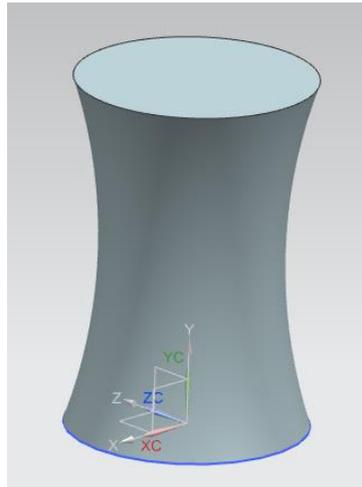


Figura 5. Representación exagerada del defecto de forma a lo largo del espesor de las probetas.

Este efecto es debido en gran parte, entre otros factores aún desconocidos, a la flexión del hilo durante el corte, el cual a su vez se da por las distintas fuerzas que actúan durante dicho proceso (ver apartado “3.4. Antecedentes”). El hecho de que las desviaciones sean menores en las partes superior e inferior es debido a que, como ya se ha explicado, las probetas se han cortado con las boquillas de la máquina de WEDM apretadas, es decir aproximadamente a $20 \mu\text{m}$ de distancia a las caras superior e inferior de los tochos de acero templado en los cuales se cortan las probetas. Por ello al estar las boquillas más cerca de las partes superior e inferior de las probetas, el fenómeno de flexión del hilo no se dará con tanta intensidad como en la parte central de las mismas.

Asimismo siguiendo esta justificación, parece evidente que las probetas de mayor espesor presentarán mayores desviaciones en sus partes centrales (ver *Fig. 6. a, b y c*). Las siguientes figuras que se corresponden con las tres probetas de radio 15 mm en los tres espesores cortados H40, H70 y H100 mm, y los planos de medición aproximadamente centrales de $z-16$ mm, $z-28$ mm y $z-40$ mm respectivamente. Como se puede ver conforme aumenta el espesor las desviaciones en general son mayores (los valores de desviación máxima para espesor 100 mm y 70 mm son mayores que para el espesor 40 mm en el mismo radio (R15 mm)).

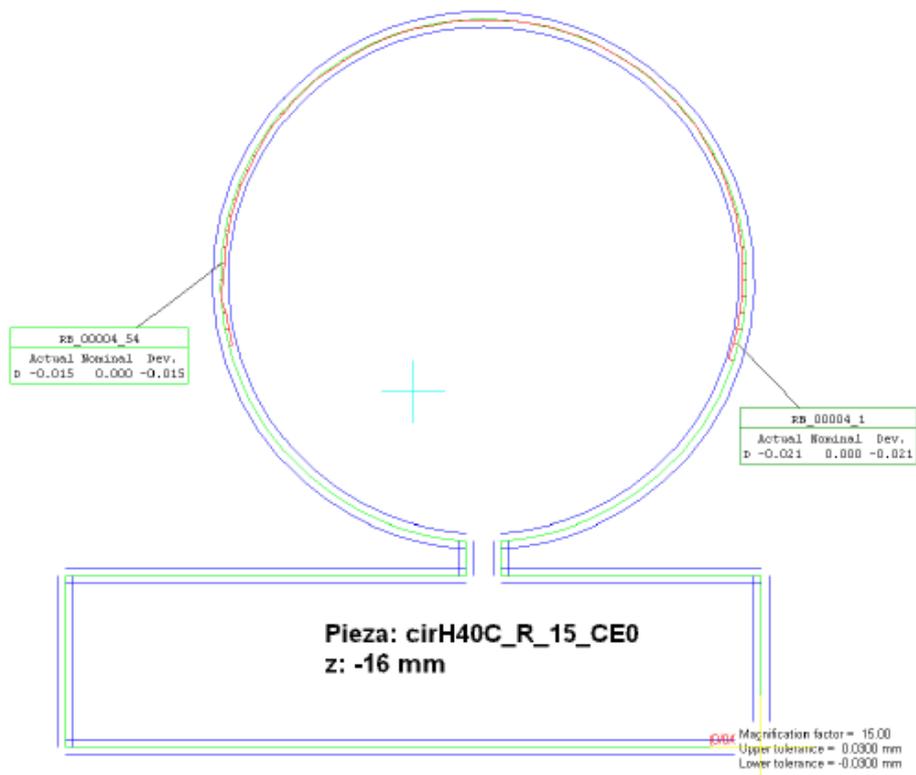


Figura 6. a) Desviaciones máximas para la probeta de Espesor 40 mm y radio 15 mm.

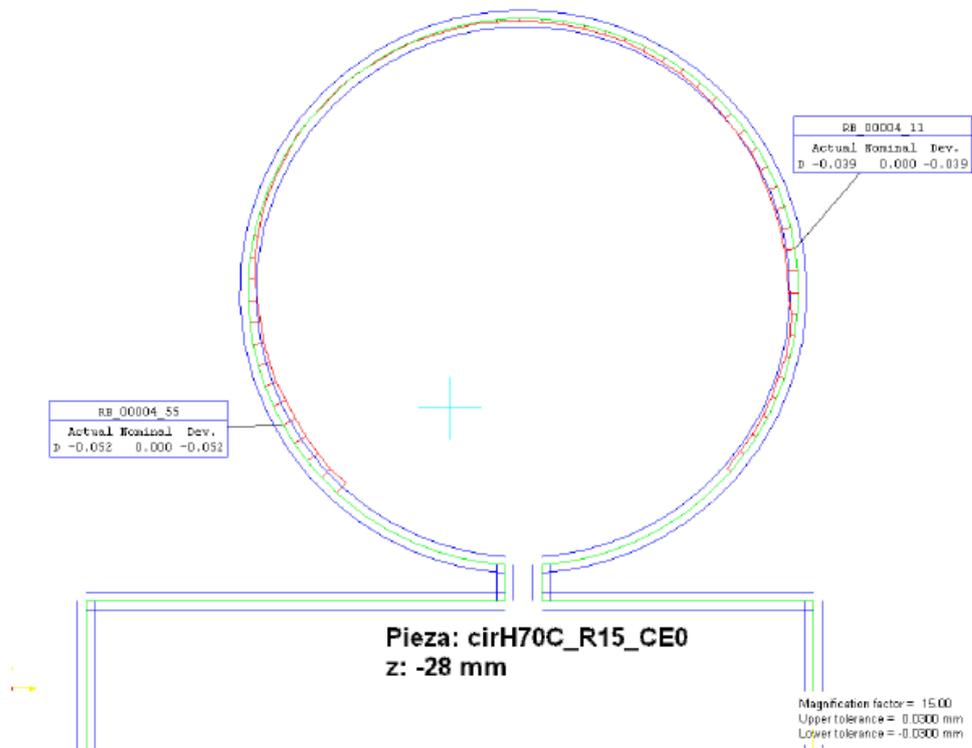


Figura 6. b) Desviaciones máximas para la probeta de Espesor 70 mm y radio 15 mm.

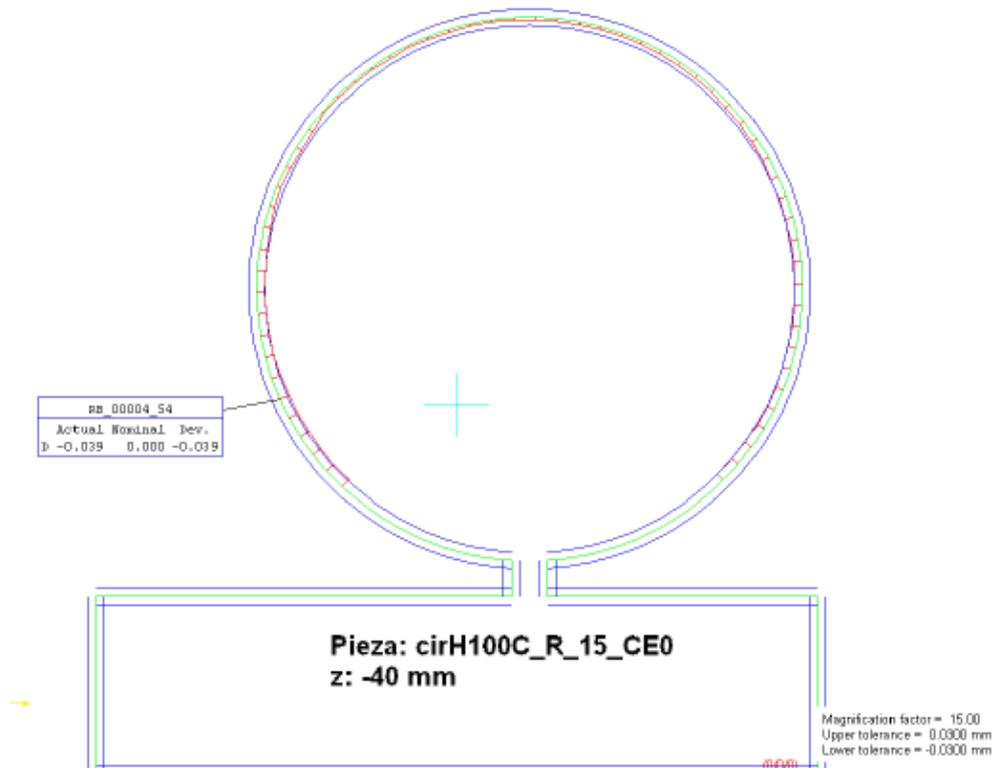


Figura 6. c) Desviaciones máximas para la probeta de Espesor 100 mm y radio 15 mm.

Otro aspecto que no se puede pasar por alto es la variación del defecto de forma en función del radio de la probeta. Como se puede observar en la Fig. 4. a, b y c, para un mismo espesor y plano de medición, aunque también para espesores y planos distintos, es decir, en general, las desviaciones disminuyen a medida que aumenta el radio de la trayectoria circular. En las probetas de mayores dimensiones, R15 y R20 mm, tal y como puede verse en las figuras de desviaciones máximas de los Anexos, las desviaciones casi son despreciables teniendo en cuenta el diámetro de la probeta llegándose a desviaciones máximas de unas 30 μm .

En conclusión, el mayor problema de defecto de forma existe en los radios pequeños y espesores grandes donde como se ha demostrado las desviaciones con respecto a las medidas teóricas resultan mayores que en el resto de casos.

3.7.3. VALIDACIÓN DE LA RNA

Como se explicó en el apartado “3.6.2.7. *Entrenamiento de la RNA*”, tras la fase de entrenamiento viene la fase de validación de la RNA, durante la cual se le pide a la red que responda a estímulos diferentes a los presentados en la fase de entrenamiento.

En este caso se presentaron a la red tres probetas de espesor y radio distintos, las cuales no se incluyeron en el entrenamiento:

- H40 R3
- H70 R9
- H100 R15

Estas probetas se presentaron como entradas sin variar los pesos sinápticos. La red debe ser capaz de reconocer éstas entradas, puesto que tienen radios y espesores utilizados en la fase de entrenamiento, y dar respuestas correctas en base a los ejemplos aprendidos en el juego de ensayo. En otras palabras con estas entradas similares a las utilizadas para entrenar la red, ésta debe ser capaz de emitir una salida en forma de conjunto de puntos ángulo de medición- radio real (θ , R), es decir, los 30 puntos interpolados (en algunos casos menos como ya se explicó), que se aproximen con el menor error posible a los 30 puntos interpolados medidos mediante la máquina de medir por coordenadas, es decir, los puntos de radio real de la probeta.

A continuación se presentan una serie de gráficas con los resultados de la RNA para las probetas arriba mencionadas. En todas ellas, en el eje de abscisas se disponen números del 0 al 30, que se corresponden con los 30 puntos, los cuales a su vez, como ya se ha explicado, representan los ángulos de medición, que son para todos los casos iguales por el hecho de haber elegido un ángulo mínimo y otro máximo de cara a la interpolación. Esto es, el ángulo θ_1 se corresponde con el punto 1, el θ_2 con el punto 2 y así sucesivamente hasta el punto 30. En el eje de ordenadas se disponen los valores de radio real de cada punto.

Como puede verse en las gráficas existen dos funciones de distinto color que relacionan cada punto con su radio real:

- **“Target” (color rojo):** representa la salida esperada para cada entrada, es decir el conjunto de puntos (θ , R) interpolados, medidos mediante la MMC. Se corresponden con las gráficas de radios y ángulos interpolados (ver Fig. 5 del apartado “3.6.2.6. *Acondicionamiento de datos*”)
- **“Output” (color azul):** representa la salida real que da la red para cada entrada en forma de punto- radio real o lo que es lo mismo (θ , R). Como puede verse, se trata de una función más suavizada y con menor ruido que en el caso de la “Target”.

3.7.3.1. H40 R3 (Espesor 40 mm y radio 3 mm)

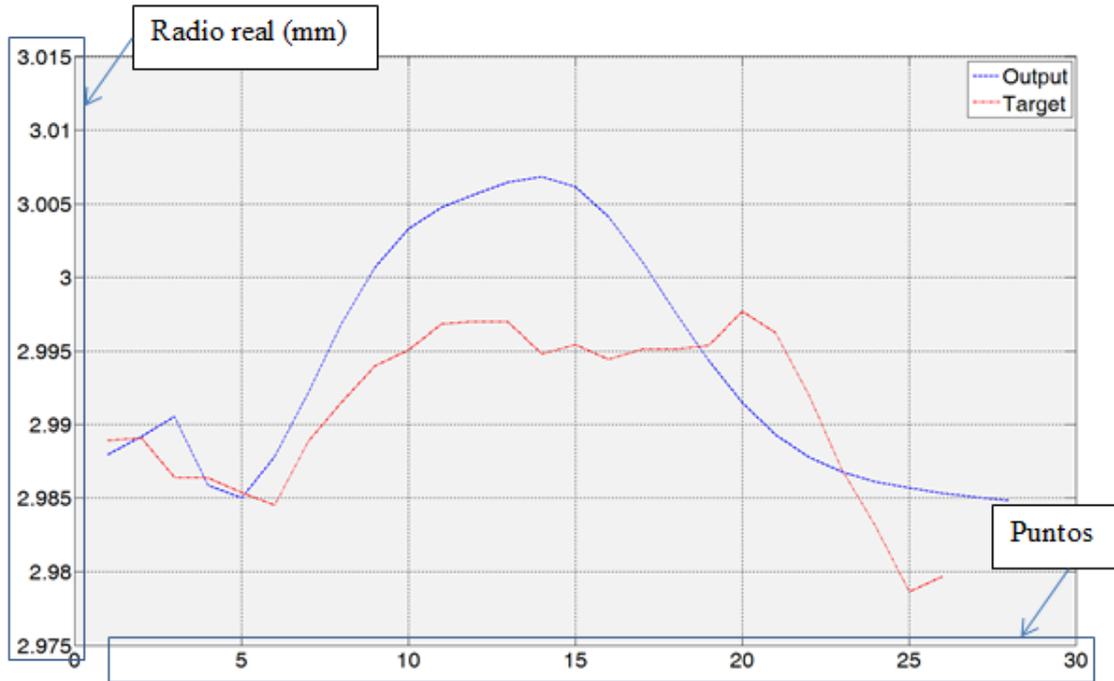


Figura 7 a) Gráfica para el plano de medición z-1.5 mm.

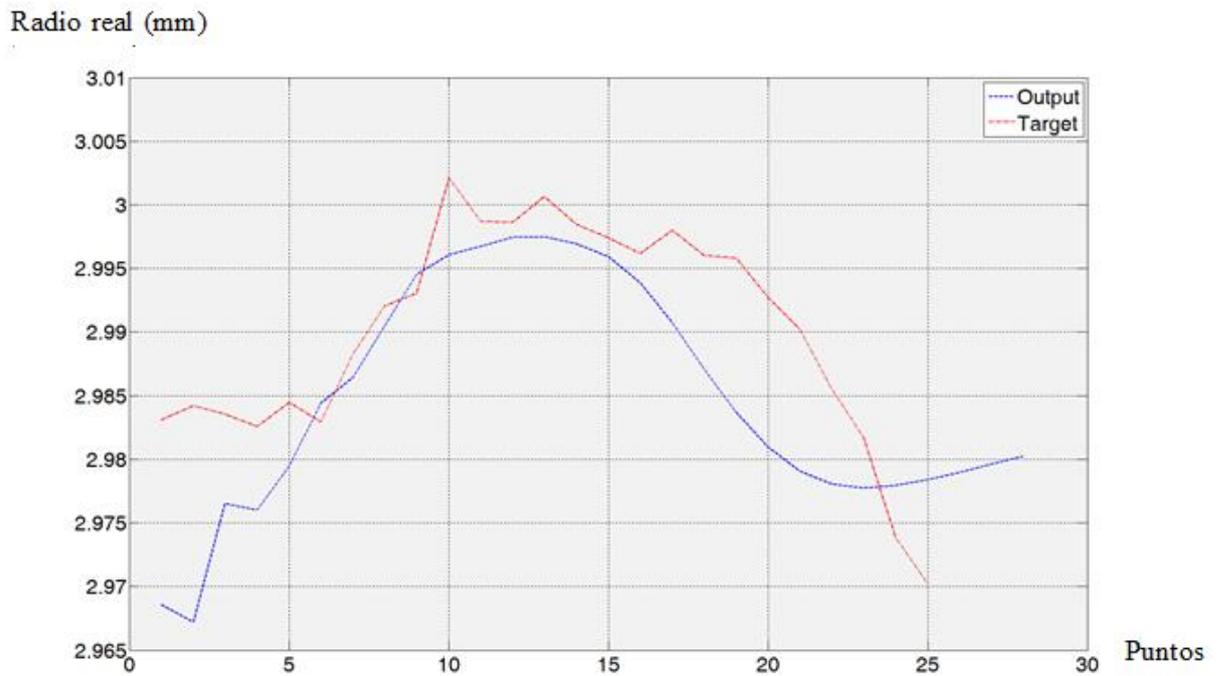


Figura 7 b) Gráfica para el plano de medición z-24 mm.

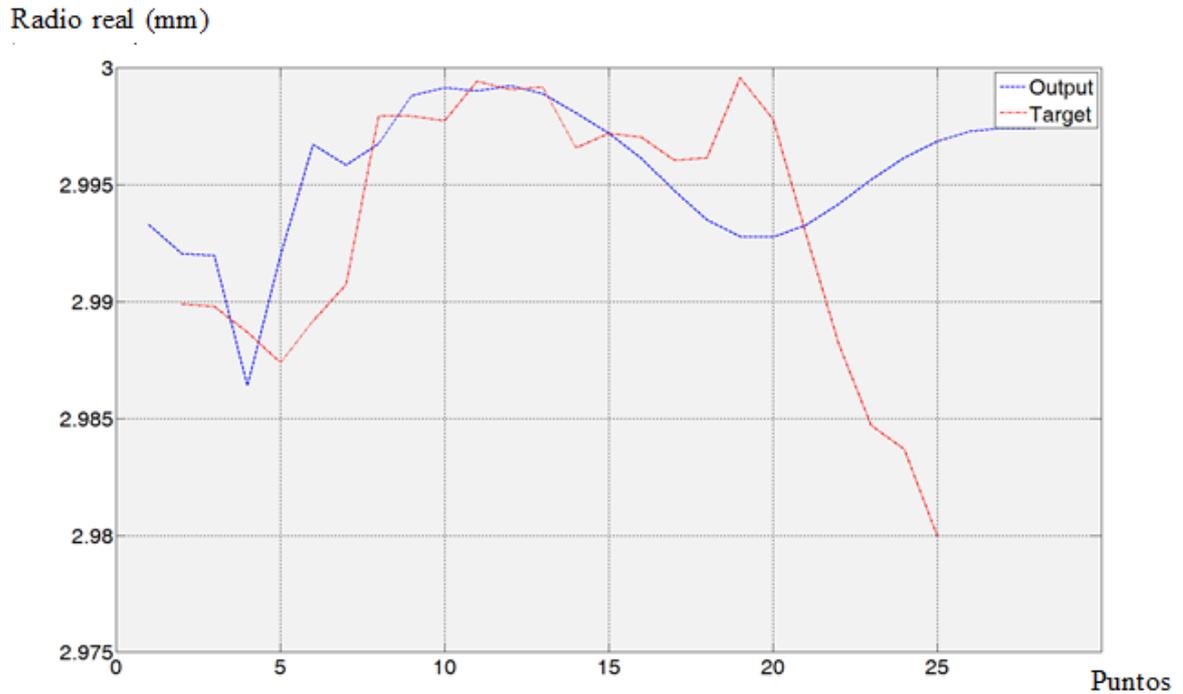


Figura 7 c) Gráfica para el plano de medición z-38.5 mm.

En el apartado “5.2.2.1.1. H40 R3 (Espesor 40 mm y radio 3mm)” incluido en los Anexos, se encuentran el resto de gráficas para los demás planos de medición, así como los puntos de radio real y radio predicho por la red mediante los cuales se han elaborado las gráficas, además del error o diferencia entre ambos valores. En este apartado se han escogido las gráficas más representativas y que pueden aportar más información.

A continuación se muestran a modo de ejemplo, los resultados tablados de radio real, radio predicho por la red y error para los planos de medición z-1.5, z-4 y z-8 mm.

z-1,5			z-4			z-8		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
2,984		2,984	2,983		2,983			0,000
2,987		2,987	2,985		2,985			0,000
2,989	2,988	-0,002	2,987	2,981	0,006	2,980	2,975	0,005
2,989	2,989	0,003	2,990	2,981	0,009	2,988	2,974	0,014
2,986	2,991	0,001	2,986	2,983	0,003	2,985	2,978	0,008
2,986	2,986	-0,001	2,985	2,980	0,005	2,981	2,977	0,005
2,985	2,985	-0,007	2,983	2,981	0,002	2,981	2,979	0,002
2,985	2,988	-0,012	2,986	2,985	0,001	2,985	2,983	0,001
2,989	2,992	-0,012	2,990	2,989	0,001	2,990	2,987	0,003
2,991	2,997	-0,012	2,995	2,995	0,000	2,993	2,993	0,001

2,994	3,001	-0,011	2,995	2,999	-0,005	2,996	2,998	-0,002
2,995	3,003	-0,011	2,998	3,002	-0,004	2,997	3,000	-0,003
2,997	3,005	-0,010	3,000	3,003	-0,003	2,997	3,001	-0,004
2,997	3,006	-0,010	2,998	3,004	-0,006	3,000	3,002	-0,002
2,997	3,006	-0,009	2,998	3,005	-0,007	3,000	3,002	-0,002
2,995	3,007	-0,009	2,997	3,005	-0,008	2,998	3,003	-0,005
2,995	3,006	-0,006	2,999	3,004	-0,005	2,999	3,002	-0,003
2,994	3,004	-0,003	2,999	3,002	-0,003	2,999	3,000	-0,001
2,995	3,001	0,001	2,998	2,999	-0,001	2,999	2,997	0,003
2,995	2,998	0,004	2,996	2,995	0,001	2,999	2,993	0,006
2,995	2,994	0,006	3,000	2,992	0,008	2,996	2,989	0,007
2,998	2,991	0,010	2,998	2,989	0,009	2,997	2,986	0,011
2,996	2,989	0,009	2,994	2,986	0,008	2,995	2,983	0,012
2,992	2,988	0,006	2,991	2,985	0,006	2,989	2,982	0,007
2,987	2,987	0,001	2,985	2,983	0,002	2,982	2,980	0,002
2,983	2,986	-0,002	2,980	2,983	-0,002	2,980	2,980	0,000
2,979	2,986	-0,006	2,976	2,982	-0,006	2,971	2,979	-0,008
2,980	2,985	-0,005	2,977	2,982	-0,005	2,971	2,979	-0,008
	2,985	-2,985	2,978	2,981	-0,003	2,970	2,978	-0,008
	2,985	-2,985	2,979	2,981	-0,002	2,970	2,978	-0,008

Tabla 2. Resultados para los planos z-1,5, z-4 y z-8 mm, de radio real, radio predicho por la red y diferencia entre ambos (error).

Como puede verse en las gráficas, la diferencia entre la salida dada por la red (output) y la respuesta esperada (target) es pequeña. Si se visualiza el apartado del error tabulado mencionado en el párrafo anterior, se puede ver que el error máximo en todos los planos de medición es de 19 μm , el cual se da para el plano z-36 mm. Sin embargo, como se puede comprobar en dicho apartado, el error medio aproximado en todos los planos es de unas 9 μm , y como ya se ha explicado en el apartado “3.6.2. Marco metodológico”, se ha de diferenciar entre error de forma y rugosidad. En electroerosión por hilo en el primer corte se considera que desviaciones menores de 30 μm , no se cuantifican como error de forma (que es lo que se está estudiando en este trabajo), sino como rugosidad, con lo cual, se puede decir que un error de 9 μm , algo más de un tercio menor que el máximo admisible (30 μm) se trata de un error prácticamente despreciable.

En conclusión se puede aseverar que la red predice el error de forma para la probeta de validación H40 R3, con un error muy pequeño.

3.7.3.2. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm)

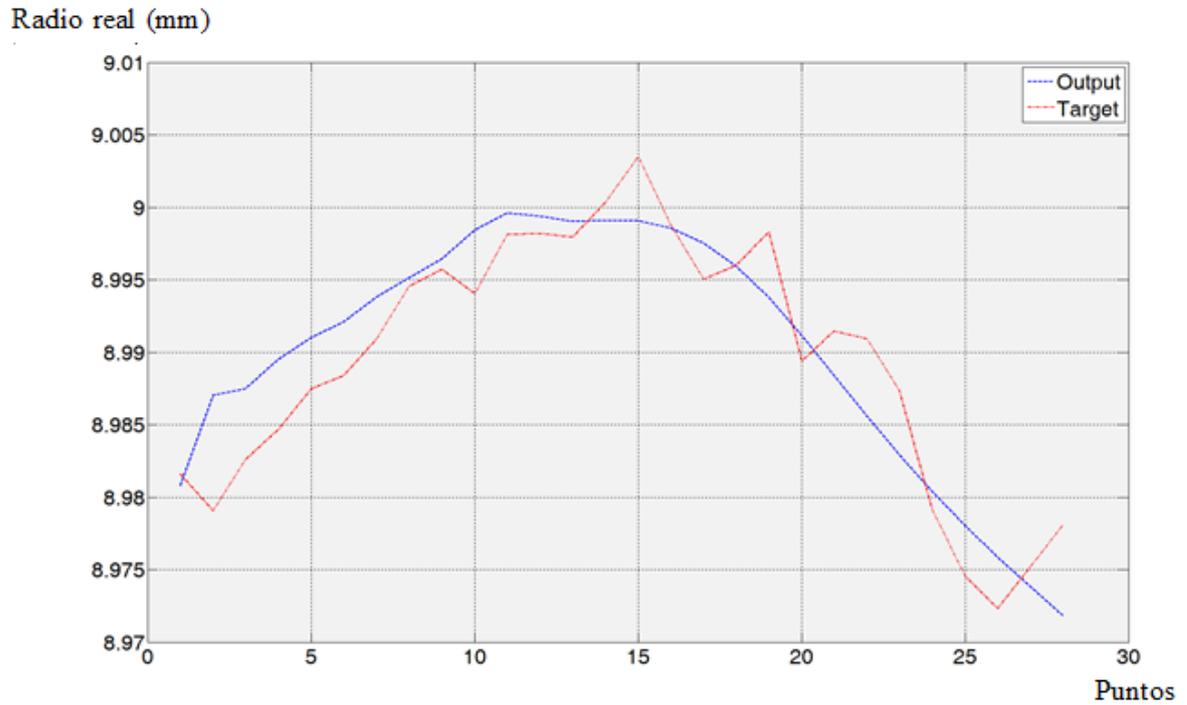


Figura 8 a) Gráfica para el plano de medición z-1.5 mm.

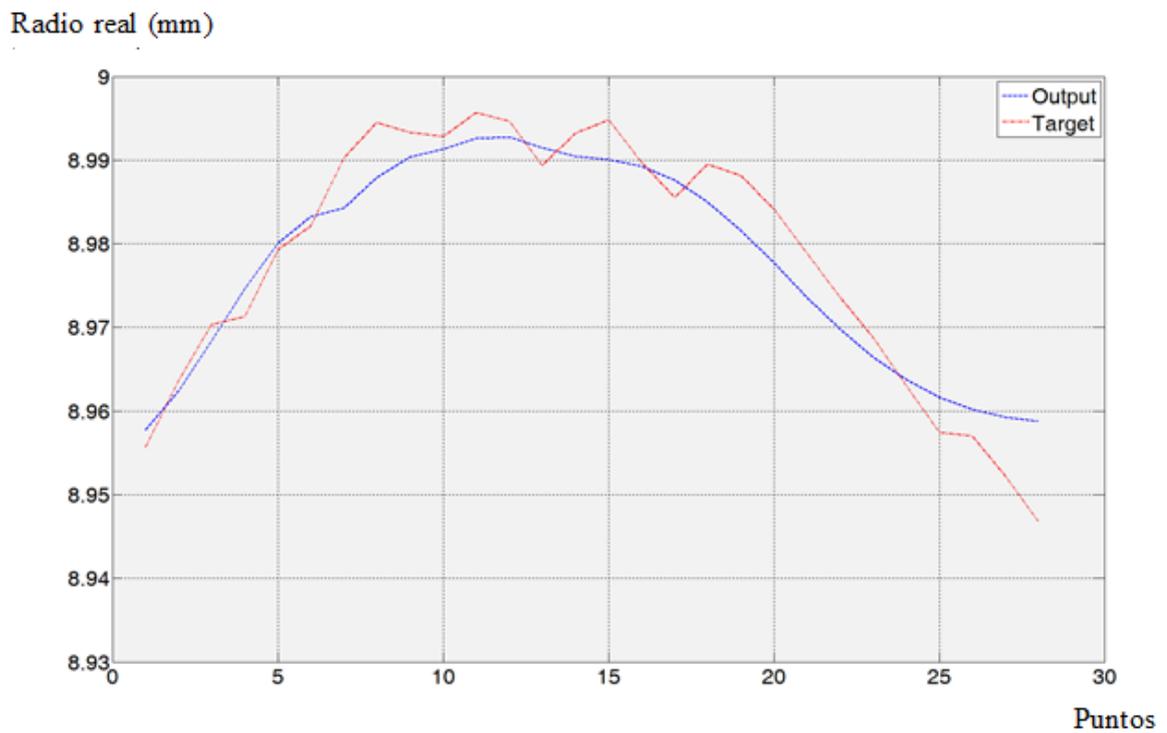


Figura 8 b) Gráfica para el plano de medición z-42 mm.

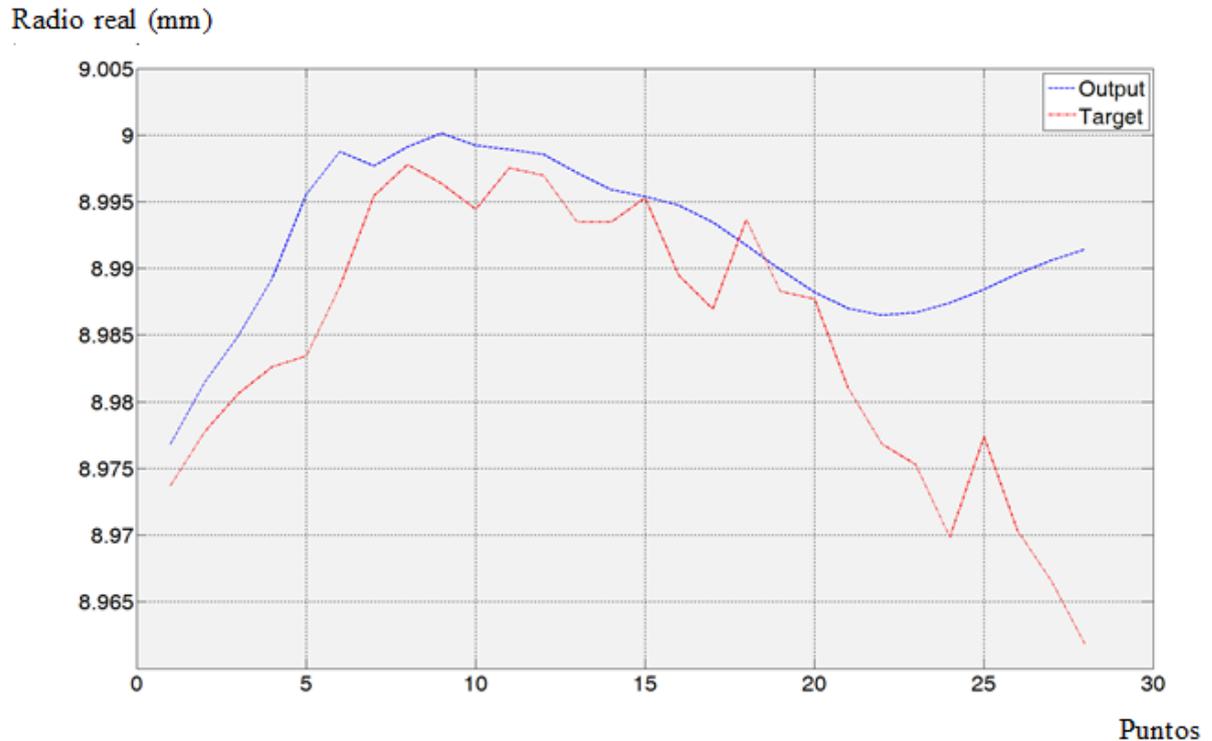


Figura 8 c) Gráfica para el plano de medición $z=68.5$ mm.

En el apartado “5.2.2.1.2. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm)” incluido en los Anexos, se encuentran el resto de gráficas para los demás planos de medición, así como los puntos de radio real y radio predicho por la red mediante los cuales se han elaborado las mismas, y el error o diferencia entre ambos valores.

En este caso los resultados son aún mejores que en la probeta anterior, puesto que, pese a que algunos puntos en algunas gráficas presentan errores algo más elevados ($17 \mu\text{m}$) la media del mismo para todos los planos de medición es de unas $6 \mu\text{m}$, es decir una quinta parte del error máximo admisible para que se pudiese empezar a considerar error de forma y no rugosidad inherente al primer corte.

Por lo tanto se puede decir con rotundidad que para el caso de esta probeta, la red neuronal utilizada emite una salida (“output”) muy próxima a la salida esperada o “target”, o lo que es lo mismo, la diferencia entre los radios reales medidos de los distintos puntos que conforman las gráficas, y los radios predichos por la red se considera muy pequeña.

Concluyendo se puede asegurar que la red predice el error de forma para la probeta de validación H70 R9, con un error prácticamente despreciable.

3.7.3.3. H100 R15 (Espesor 100 mm y radio 15 mm)

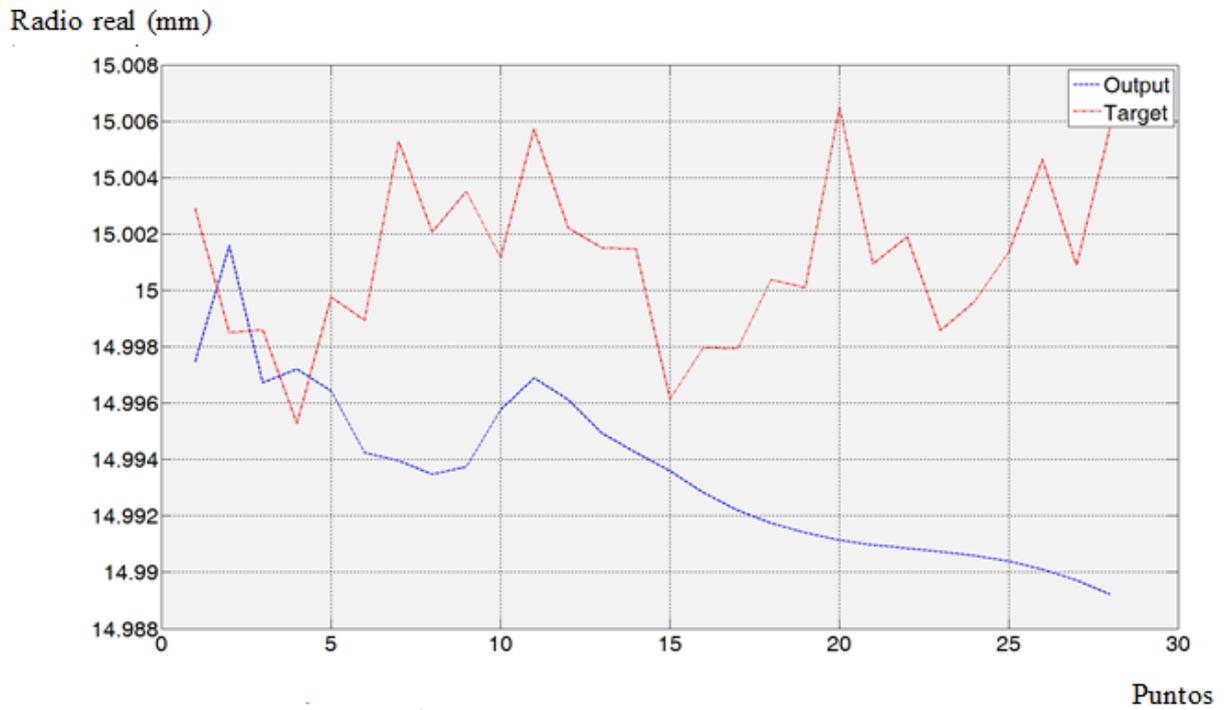


Figura 9 a) Gráfica para el plano de medición z-1.5 mm.

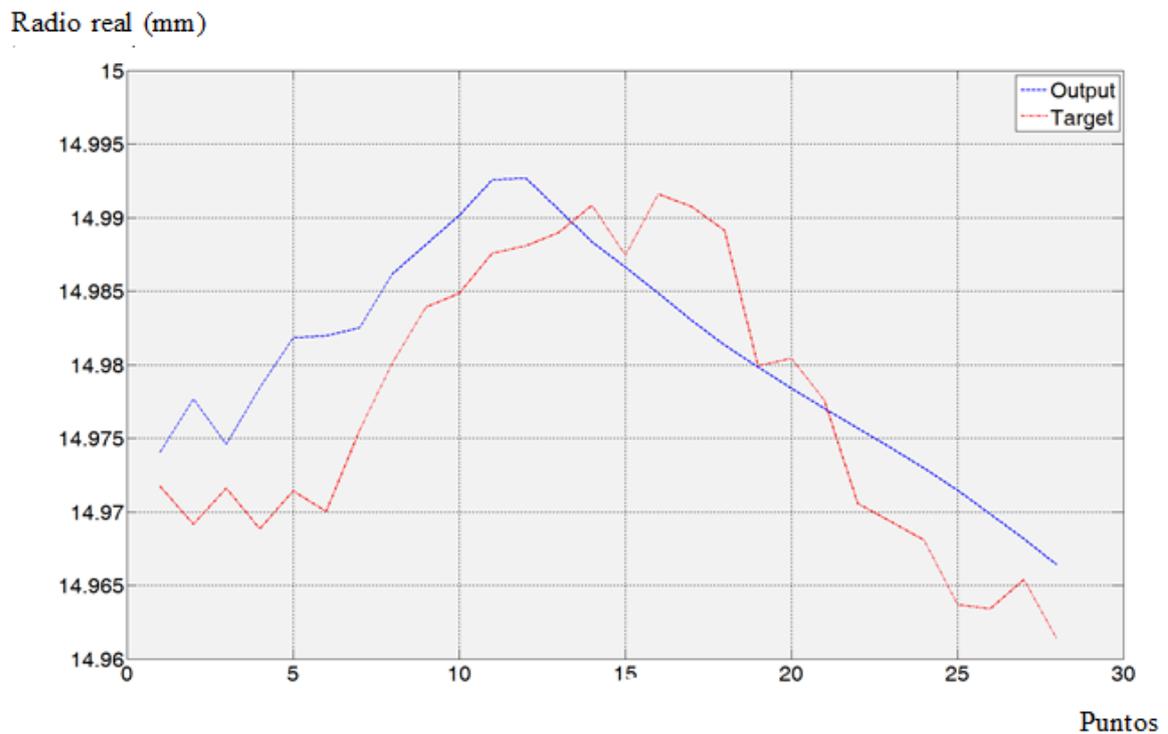


Figura 9 b) Gráfica para el plano de medición z-40 mm.

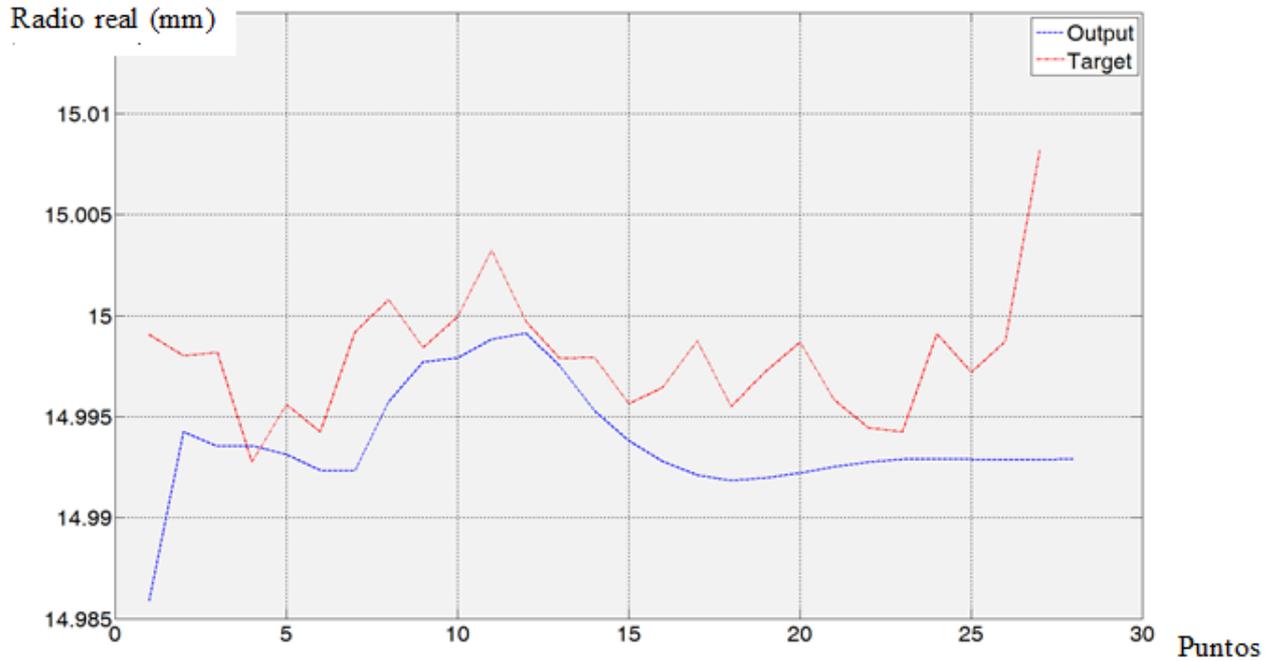


Figura 9 c) Gráfica para el plano de medición $z=98.5$ mm.

Como en el resto de probetas de validación, en el apartado “5.2.2.1.3. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm)” incluido en los Anexos, se encuentran el resto de gráficas para los demás planos de medición, así como los puntos de radio real y radio predicho por la red mediante los cuales se han elaborado las mismas, así como el error o diferencia entre ambos valores.

Pudiera parecer que, viendo la gráfica de la Fig. 9 a para el plano de medición $z=1.5$ mm, la salida dada por la red (“output”) difiere bastante de la salida esperada (“target”) puesto que ambas funciones tienen una separación nada despreciable. Sin embargo esto es debido a la separación de las divisiones de radio real en el eje de ordenadas, la cual va de dos en dos micras. El error máximo para este plano es de $17 \mu m$, siendo el máximo para todos los planos de medición. No obstante, al igual que en las demás probetas de validación de la red, la media del error o diferencia entre los radios reales medidos de los distintos puntos que conforman las gráficas, y los radios predichos por la red, es más pequeña, siendo en este caso de unas $6 \mu m$, o como en el caso de la probeta anterior, una quinta parte del error máximo admisible para que se pudiese empezar a considerar error de forma y no rugosidad inherente al primer corte ($30 \mu m$).

Para finalizar, a la vista de los resultados para todas las probetas de validación, se puede asegurar que la red predice el error de forma satisfactoriamente para todas ellas, con un error muy pequeño, lo que significa que la red ha sido entrenada de manera exitosa y debe ser capaz de generalizar.

3.7.4. GENERALIZACIÓN DE LA RNA

La generalización de la red neuronal artificial se trata de la última fase del proyecto y la más decisiva puesto que es en la que se determina la capacidad de generalización de la red, es decir, con entradas completamente diferentes a las presentadas a la red durante la fase de entrenamiento y validación, se ve si ésta puede dar salidas similares a las esperadas.

En definitiva, presentándole a la red entradas que sean espesores y radios de probetas distintos a los ensayados, ésta sea capaz de emitir salidas en forma de punto-radio real, o lo que es lo mismo (θ , R), cuya diferencia con respecto a los puntos medidos mediante la máquina de medir por coordenadas (MMC) sea mínima, o tenga un error muy pequeño.

Por tanto la diferencia de ésta fase con la anterior, es decir, con la fase de validación, es que en esta última, aunque la red neuronal no supiese la salida real que tenía que dar para las entradas presentadas, éstas si eran “conocidas” de alguna manera por ella puesto que, aunque con una combinación de espesor y radio diferente, sí habían formado parte del entrenamiento de la red. En cambio las probetas que se cortaron para verificar la capacidad de generalización de la red, que fueron:

- H50 R4 (espesor 50 mm y radio 4 mm)
- H80 R10 (espesor 80 mm y radio 10 mm)

Son de espesor y radio “desconocidos” por la red, puesto que ni los espesores ni los radios formaron parte del entrenamiento.

A continuación se presentan una serie de gráficas para cada plano de medición con los resultados de la RNA para las probetas arriba mencionadas. Como puede verse son iguales que las presentadas en el apartado de validación de la red, pudiendo distinguirse dos funciones de distinto color en cada una de ellas:

- **“Target” (color rojo):** representa la salida esperada para cada entrada, es decir el conjunto de puntos (θ , R) interpolados, medidos mediante la MMC.
- **“Output” (color azul):** representa la salida real que da la red para cada entrada en forma de punto- radio real o lo que es lo mismo (θ , R). Como puede verse, se trata de una función más suavizada y con menor ruido que en el caso de la “Target”.

3.7.4.1. H50 R4 (Espesor 50 mm y radio 4 mm)

Radio real (mm)

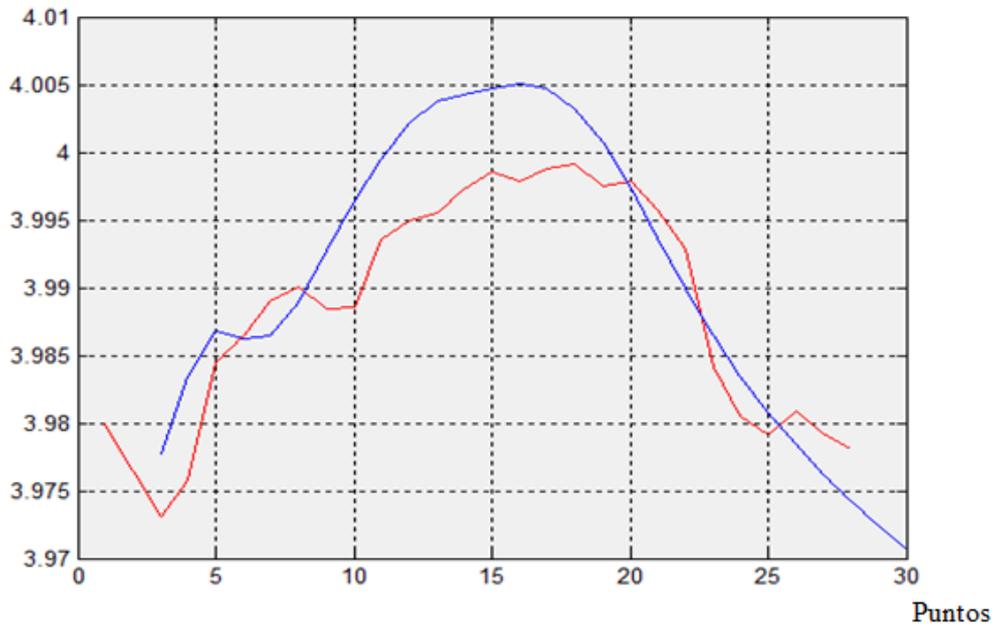


Figura 10 a) Gráfica para el plano de medición z-1.5 mm.

Radio real (mm)

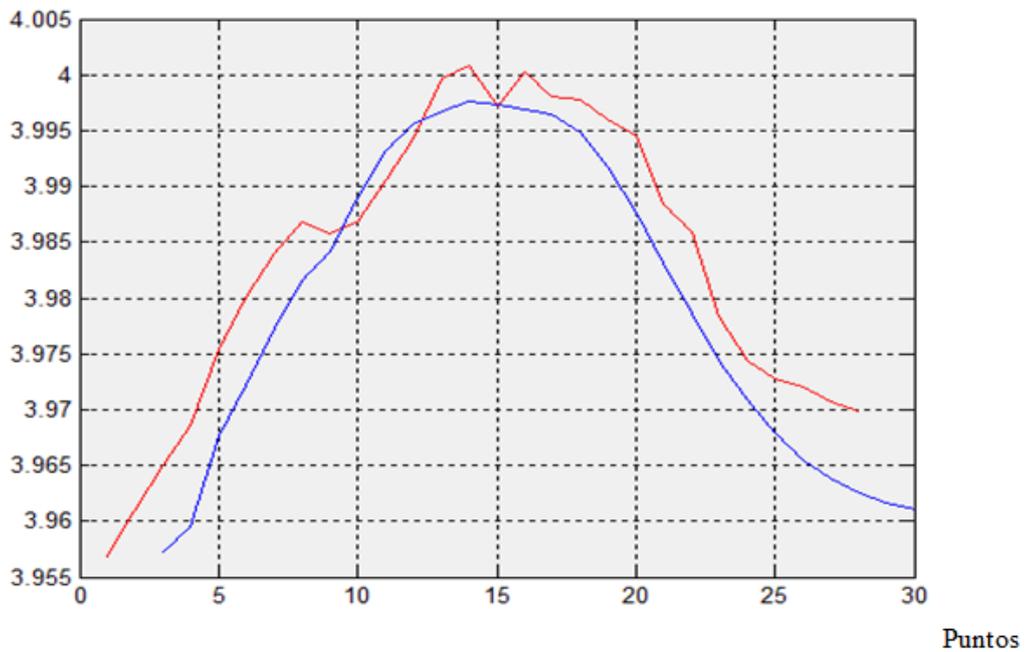


Figura 10 b) Gráfica para el plano de medición z-20 mm.

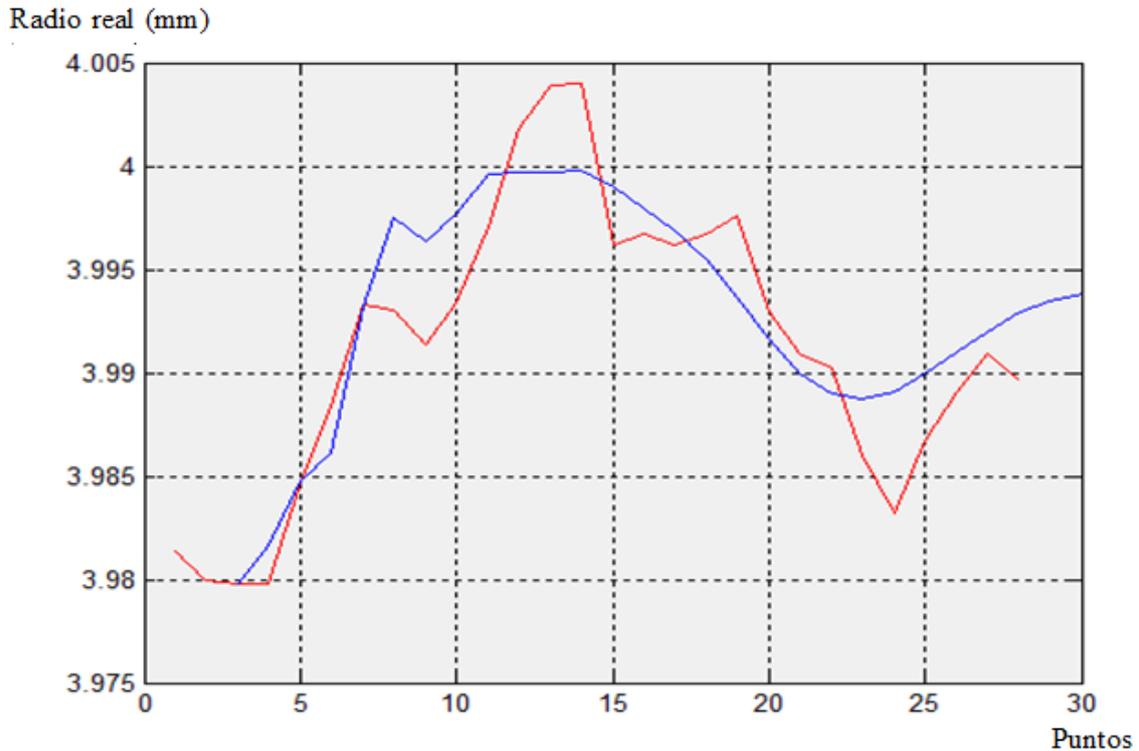


Figura 10 c) Gráfica para el plano de medición $z=48.5$ mm.

En el apartado “5.2.2.2.1. H50 R4 (Espesor 50 mm y radio 4 mm)” incluido en los Anexos, se encuentran el resto de gráficas para los demás planos de medición, así como los puntos de radio real y radio predicho por la red mediante los cuales se han elaborado las gráficas, así como el error o diferencia entre ambos valores. En este apartado se han escogido las gráficas más representativas y que pueden aportar más información.

Como puede verse en las mismas la diferencia entre la salida dada por la red (azul) y la respuesta esperada (rojo) es pequeña. Visualizando el apartado del error tabulado mencionado en el párrafo anterior, se puede ver que el error máximo en todos los planos de medición es de $12 \mu\text{m}$. Sin embargo, como se puede comprobar en dicho apartado, el error medio aproximado en todos los planos es de unas $5 \mu\text{m}$, y como ya se ha explicado en el apartado de validación de la red, se ha de diferenciar entre error de forma y rugosidad. En electroerosión por hilo en el primer corte se considera que desviaciones menores de $30 \mu\text{m}$, no se cuantifican como error de forma, sino como rugosidad, con lo cual, se puede decir que un error de $5 \mu\text{m}$, un sexto menor que el máximo admisible ($30 \mu\text{m}$) se trata de un error prácticamente despreciable.

En conclusión se puede aseverar que la red predice el error de forma para la probeta de generalización H50 R4, con un error muy pequeño.

3.7.4.2. H80 R10 (Espesor 80 mm y radio 10 mm)

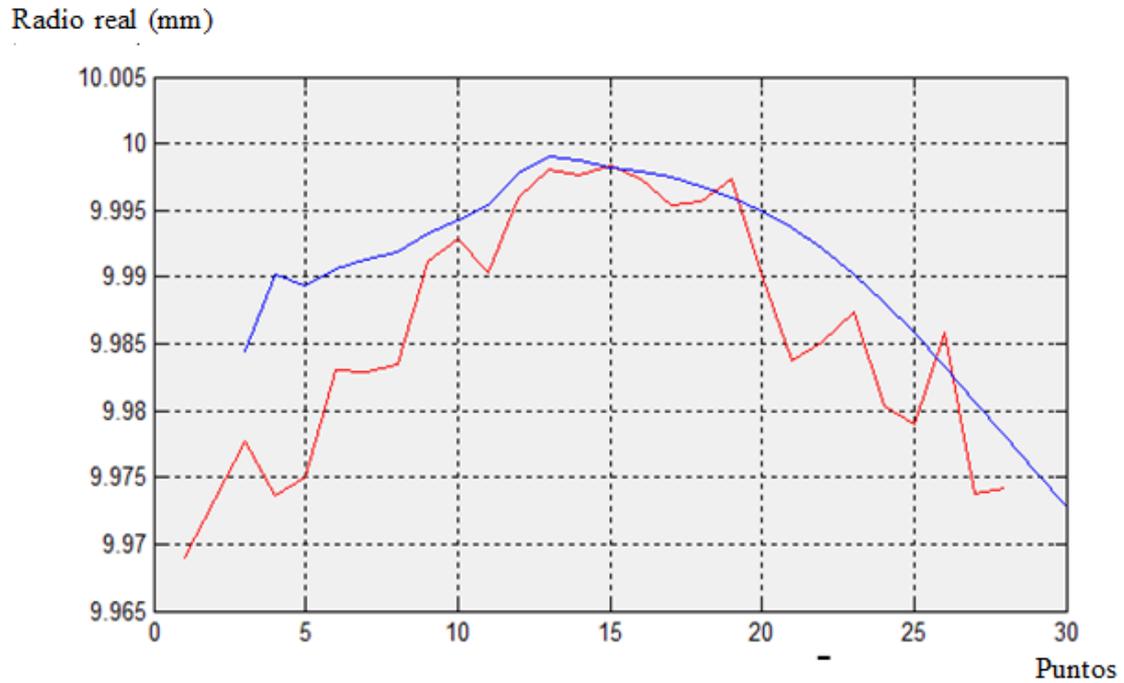


Figura 11 a) Gráfica para el plano de medición z-1.5 mm.

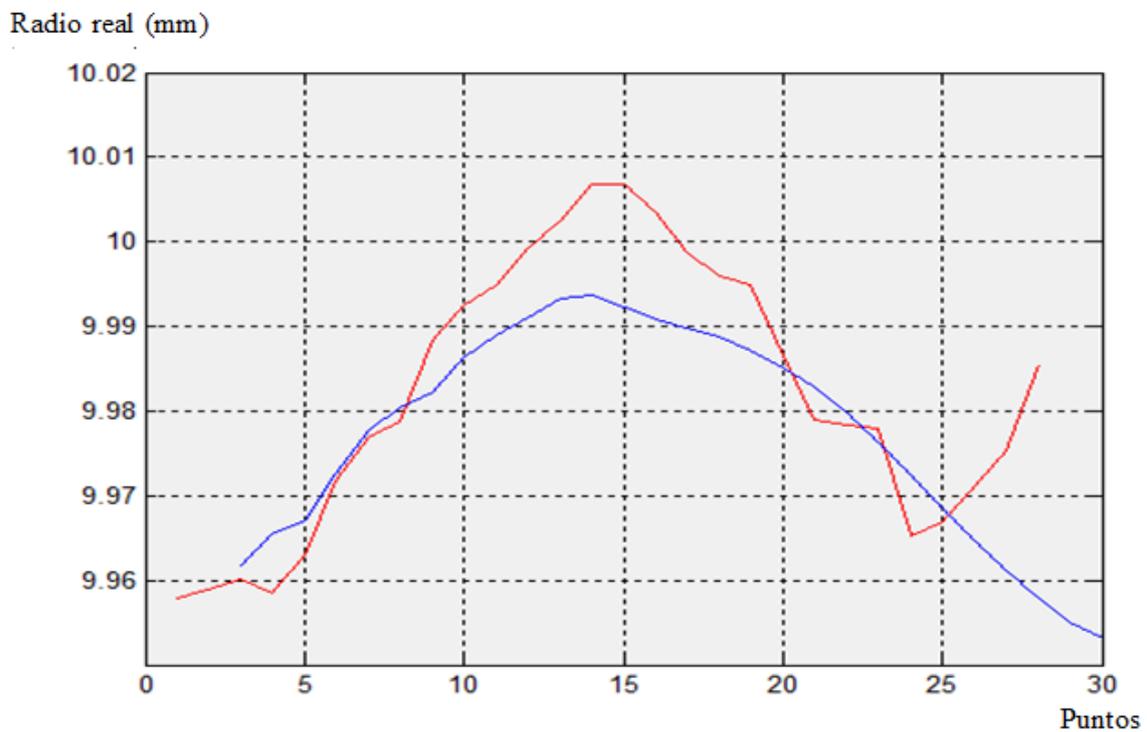


Figura 11 b) Gráfica para el plano de medición z-32 mm.

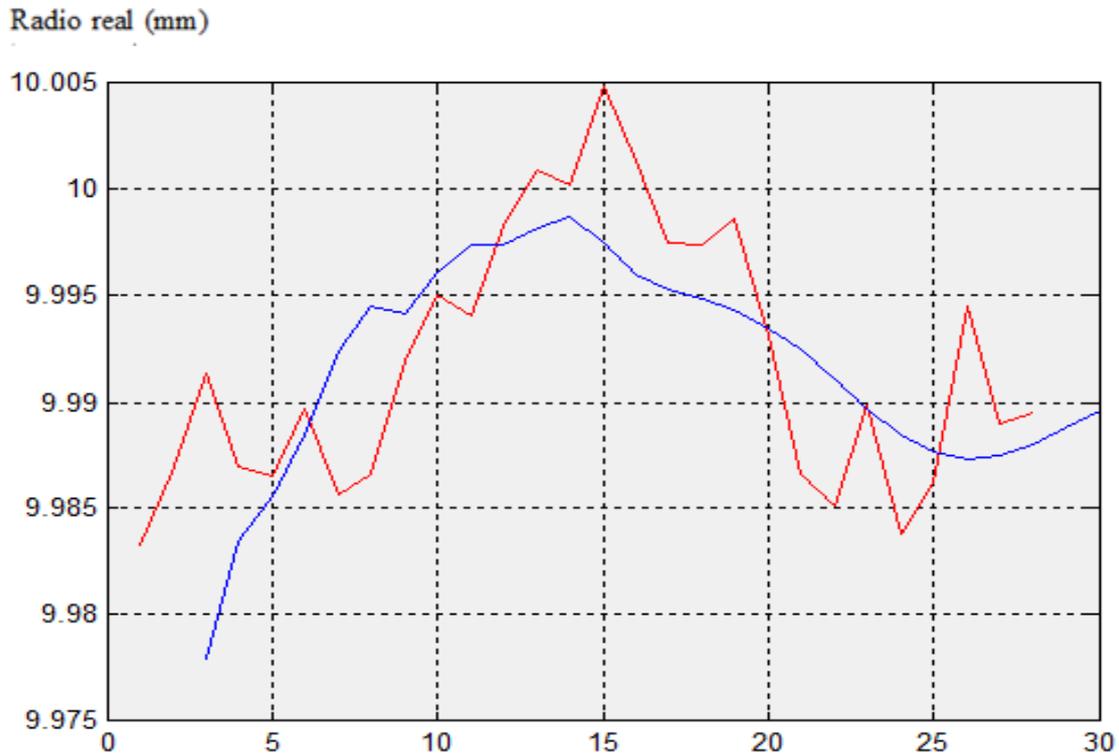


Figura 11 c) Gráfica para el plano de medición $z=78.5$ mm.

En el apartado “5.2.2.2.2. *H80 R10 (Espesor 80 mm y radio 10 mm)*” de los Anexos, se presentan ordenadamente el resto de gráficas para los demás planos de medición, así como los puntos de radio real y radio predicho por la red mediante los cuales se han elaborado las mismas, y el error o diferencia entre ambos valores.

En este caso los resultados son algo peores que en la probeta anterior, puesto que, aunque la media aproximada del error se mantiene en torno a las $9 \mu\text{m}$, es decir, un valor pequeño teniendo en cuenta que el máximo admisible son $30 \mu\text{m}$ para que considere rugosidad y no error de forma, en los resultados tabulados, así como en las gráficas, puede verse como existen mayores picos de diferencia entre los valores del radio real medido mediante la MMC, y el valor predicho por la red para cada punto. De todas formas, como ya se ha dicho un error de $9 \mu\text{m}$, puede considerarse despreciable a efectos de estudio de defecto de forma.

A la vista de los resultados para las dos probetas de generalización cortadas tras la validación de la red neuronal, y la comprobación de que el entrenamiento había sido exitoso, se puede afirmar con rotundidad que la red neuronal ha adquirido la capacidad

de generalizar y por tanto es capaz de predecir el defecto de forma de cualquier combinación d espesor y radio que se le presente como entrada.

3.7.5. CONCLUSIONES

Tras la presentación de los resultados representativos en este apartado y en el apartado “5.4. Resultados” de los ANEXOS, se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- En lo que respecta a la caracterización del error o defecto de forma en trayectorias circulares cortadas mediante WEDM, se puede concluir que tras el corte y medición de las probetas que han formado parte de la batería de ensayos (ver *Tabla 1*), las desviaciones son mayores conforme aumenta el espesor y disminuye el radio de la trayectoria. Además se puede decir que el error de forma es menor en la parte superior e inferior rectificadas de las probetas cortadas, que en la parte central de las mismas, puesto que el corte ha sido llevado a cabo con las boquillas apretadas.
- La red ha sido entrenada con éxito puesto que, para las probetas de validación, se ha conseguido que las salidas que da la RNA para cada probeta, se aproximen con el mínimo error posible a las salidas esperadas u objetivo.
- La RNA ha logrado adquirir la capacidad de generalización, prediciendo de manera satisfactoria el defecto de forma para las probetas cortadas para ello.
- Para finalizar, se puede aseverar que se ha alcanzado el objetivo del proyecto, es decir, se ha logrado caracterizar el error en trayectorias circulares en electroerosión por hilo, mediante el uso de una RNA, consiguiendo predecir el error de forma en cualquier trayectoria y espesor de probeta (R y H).

3.8. VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS

3.8.1. VALORACIONES GENERALES

A continuación se realizará una valoración personal del enfoque utilizado en el estudio y se emitirá la opinión personal del contenido y forma de trabajo a lo largo del mismo.

El presente estudio, se ha tratado de un proyecto de investigación en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao y el departamento de I+D de la empresa ONA ELECTROEROSIÓN, el cual se ha desarrollado aproximadamente desde Noviembre de 2014 hasta Mayo de 2015, en el Taller Mecánico de la misma escuela, dentro del grupo de Fabricación de Alto Rendimiento.

Durante el desarrollo del presente proyecto el autor ha adquirido diferentes competencias relativas al desarrollo de actividades de I+D+i. Se han trabajado aspectos como la definición de baterías de ensayos, la selección de las herramientas más adecuadas para la realización de las medidas o el tratamiento de datos. Por otra parte, el autor ha aprendido a llevar a cabo un trabajo experimental de forma sistemática y a extraer conclusiones a partir del análisis de resultados experimentales.

Además, el autor ha ido aprendiendo como utilizar diversas máquinas como la máquina corte por hilo (WEDM) *ONA AX3*, mediante la cual se cortaron las probetas que forman parte de este estudio, o la Máquina de Medir por Coordenadas *Zeiss* (y su software específico). También ha adquirido competencias en el manejo de programas de CAD/CAM, como *Siemens Unigraphics NX 9.0* y *Solid Edge*, y mejorado habilidades en torno a programas de elaboración de hojas de cálculo (*Microsoft Excel*).

El autor considera que todo ello puede contribuir de manera muy positiva en el desarrollo de futuras competencias y habilidades de cara a desarrollar una profesión en el ámbito de la Ingeniería Mecánica.

Asimismo se considera que el estudio realizado tiene un componente innovador, puesto que se ha caracterizado el error en trayectorias circulares de radios mayores de 1 mm, lo cual hasta la fecha no había sido objeto de investigación en el ámbito de la electroerosión por hilo. Añadido a esto, cabe destacar el otro componente innovador en el proyecto, el hecho de utilizar como herramienta predictiva del defecto de forma en dichas trayectorias, una Red Neuronal Artificial añade si cabe mayor interés al estudio, puesto que últimamente se habla mucho de Inteligencia Artificial y el desarrollo de tecnologías en ese ámbito, con lo cual la aplicación de redes neuronales a la fabricación se considera de elevado interés en investigación.

3.8.2. LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA

A la vista de los resultados y conclusiones presentados en el apartado “3.7. Resultados y conclusiones”, en los que se ha demostrado que la utilización de los sistemas de redes neuronales son viables para la determinación y generalización de los errores en el corte de interpolaciones circulares mediante electroerosión por hilo, en un amplio abanico tanto de radios como espesores, se puede profundizar en el trabajo de la siguiente forma:

Una vez generados los resultados de la red neuronal y comprobar que el patrón observado en las pruebas se reproduce por el sistema, se puede programar dicho sistema de forma que prediga cuál debe ser la trayectoria de las guías que mueven el hilo para que la erosión sea correcta. Esto deberá hacerse en base a un error definido previamente, cuyo criterio deberá acordarse.

En definitiva, la principal línea futura a desarrollar consistiría en “darle la vuelta” a la red neuronal utilizada: teniendo los resultados presentados en los Anexos, y cuantificando el error entre el radio real y radio predicho por la red, conseguir que ésta sea capaz de predecir cuál será la trayectoria que deban seguir las guías de la máquina de electroerosión por hilo, con el fin de reducir al máximo posible el defecto de forma, el cuál ha sido caracterizado en el presente estudio.

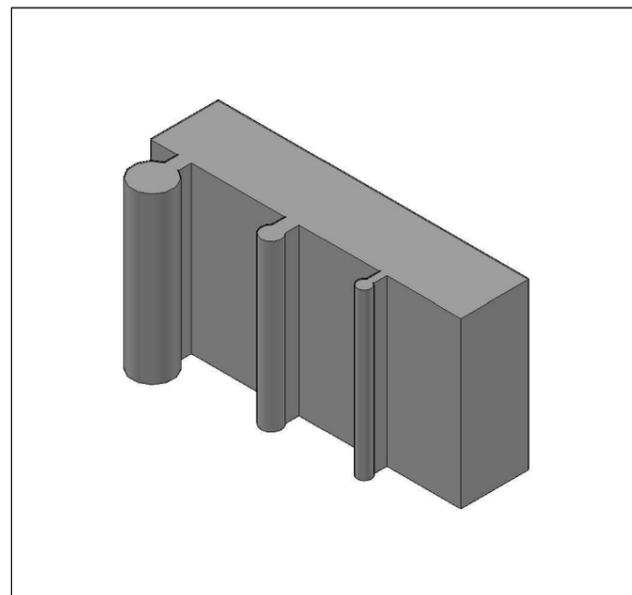
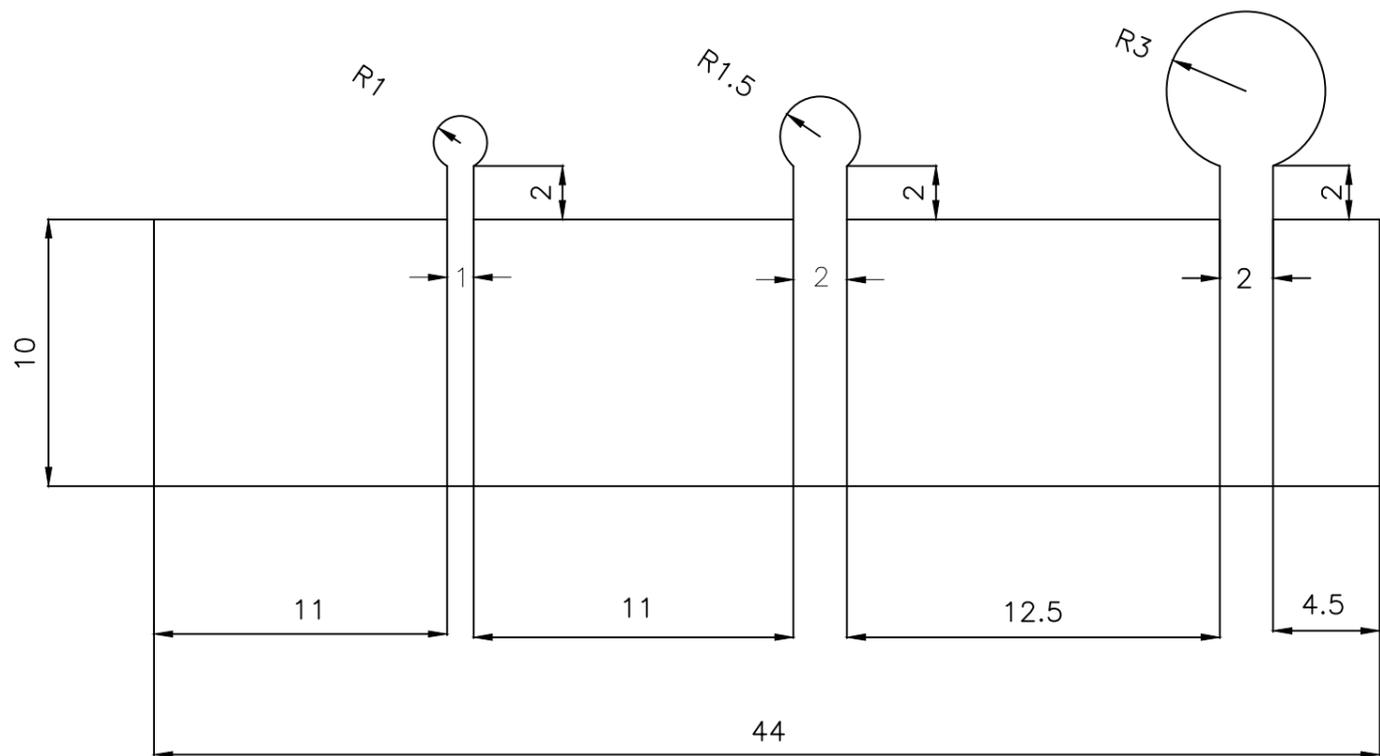
Todo el trabajo que en este estudio se recoge, junto con la ejecución de las líneas futuras aquí expuestas, puede dar lugar a una propuesta técnica que lleve a mejorar la precisión de la electroerosión en trayectorias complejas. Lo que ha comenzado siendo una herramienta predictiva del error mediante la aplicación de las redes neuronales, acabaría generando trayectorias idóneas de forma autónoma para conseguir las tolerancias exigidas, cada vez más ajustadas, por parte de los usuarios de esa técnica en un solo corte (desbaste).

Esto, evidentemente, supondrá un avance importante en lo que se refiere al corte de trayectorias complejas puesto que se reducirán el número de repasos con el consiguiente ahorro económico.

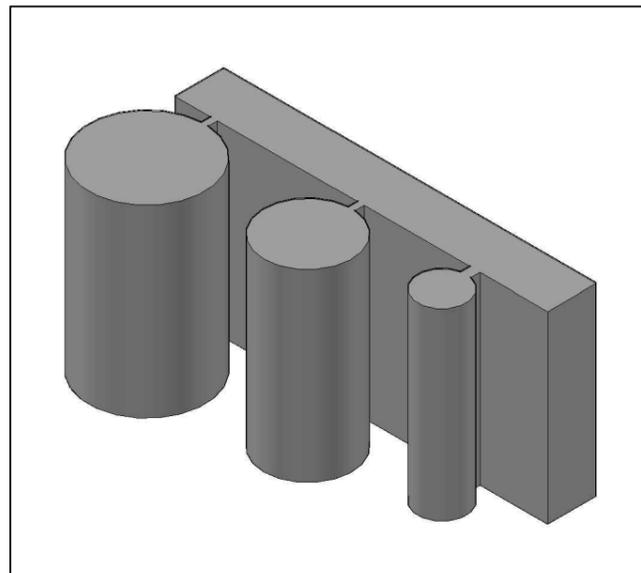
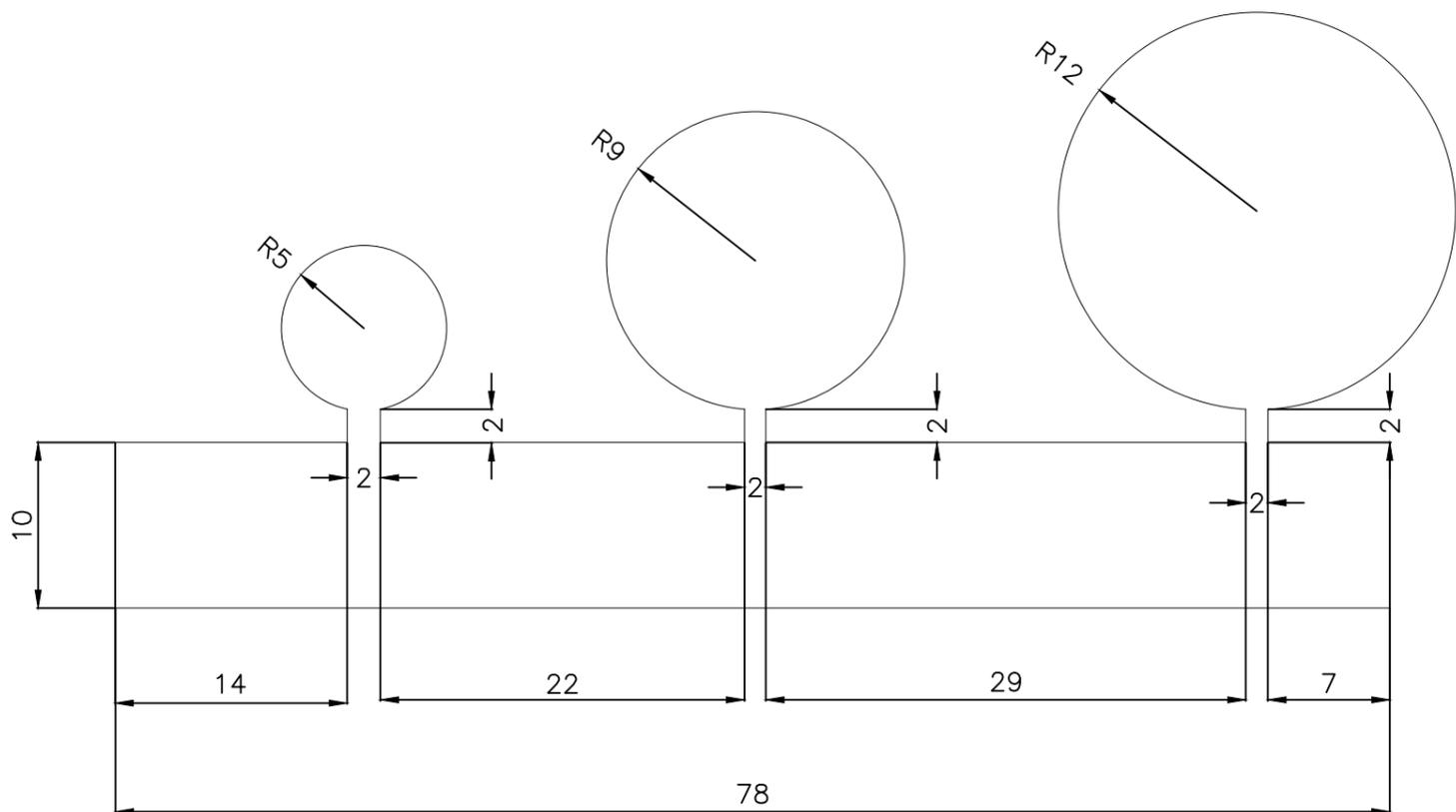
BIBLIOGRAFÍA

- **Basogain** Olabe, Xabier. “*Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones*”. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. ETSI-Bilbao.
- **[Cai, 2012]**: “*Application of Neural Network in the Process Modeling of WEDM*”; Communications in Computer and Information Science, vol. 288, pp 285-293, 2012.
- **[Chen, 2015]**: “*Three-dimensional characteristics analysis of the wire-tool vibration considering spatial temperature field and electromagnetic field in WEDM*”; Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 141, pp.85-96, 2015.
- **[Davim, 2007]**: “*Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models*”; Advances in Production Engineering & Management, vol. 8, número 4, pp 231–241, 2013.
- **Gestal** Pose, Marcos. “*Introducción a las Redes Neuronales Artificiales.*” Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidade da Coruña.
- **[Ho, 2004]**: “*State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, pp 1247–1259, 2004.
- **[Liao, 2004]**: “*On-line workpiece height estimation and its application in servo feed control of WEDM process*”; The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP, vol.6, pp 226 – 231, 2013.
- **[Puri, 2003]**: “*Modelling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM*”; Journal of Materials Processing Technology, vol. 141, pp 295–301, 2003.

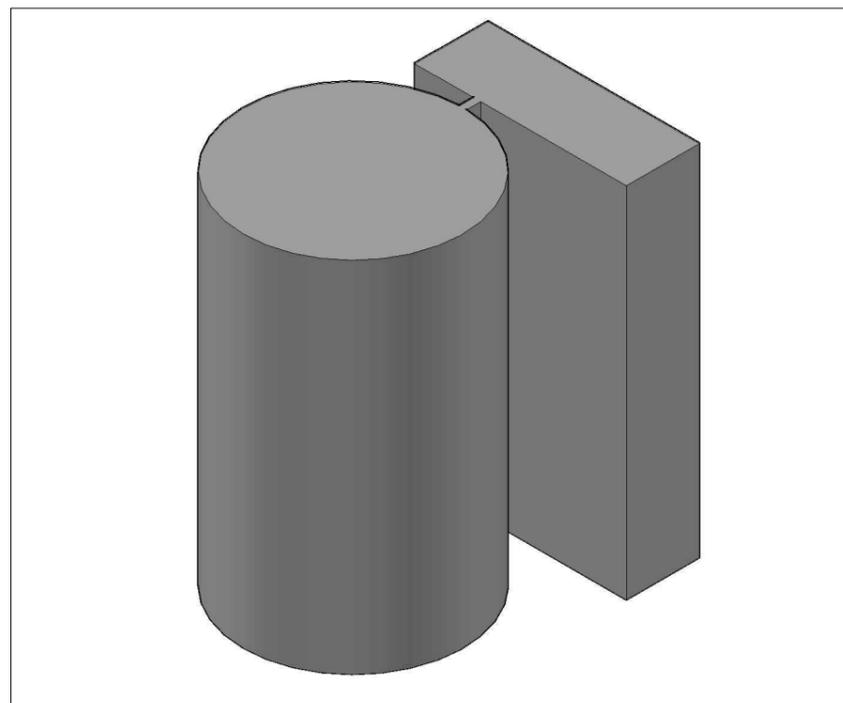
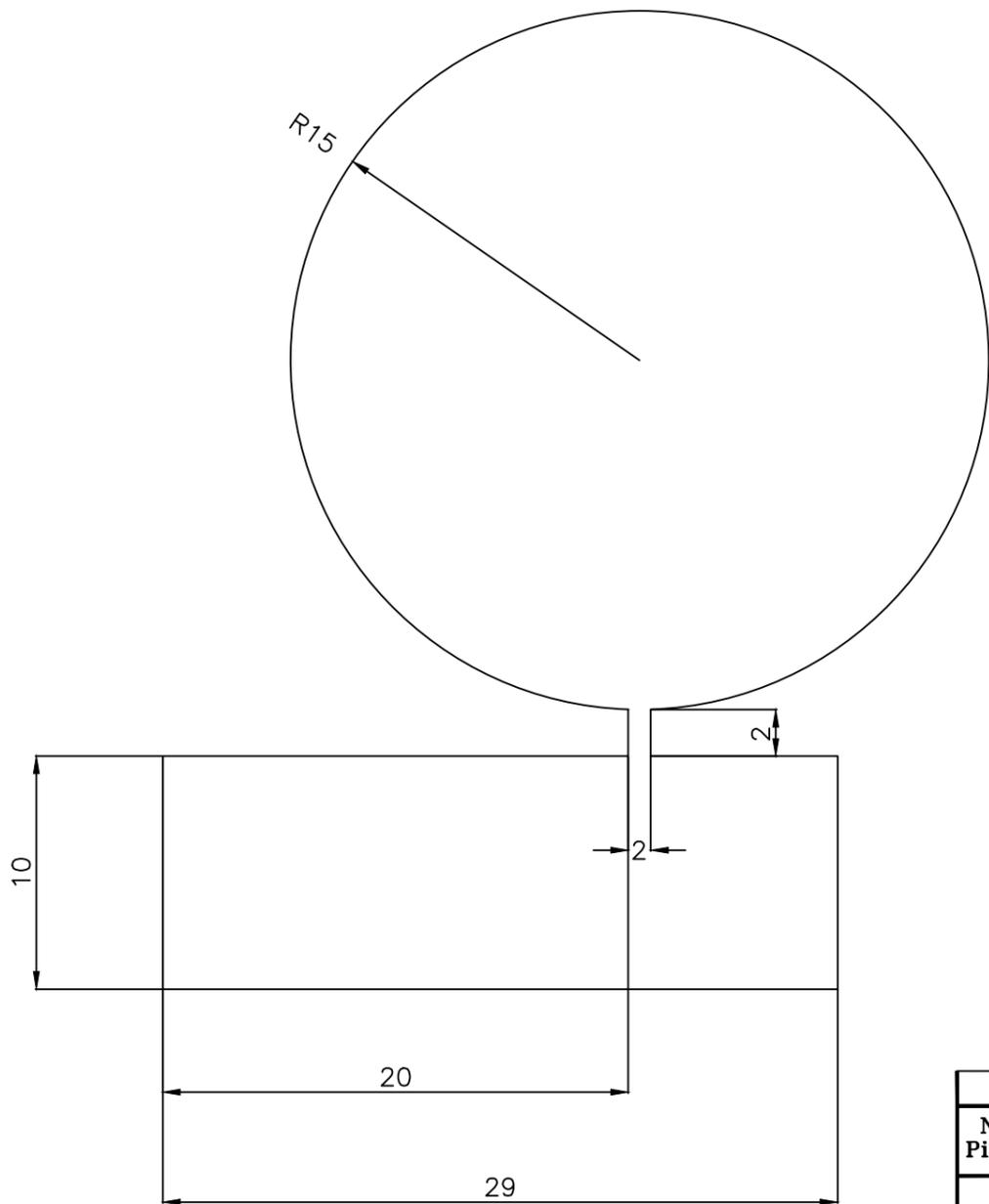
- [Puri, 2003]: “*An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM*”; International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43, pp 151–159, 2003.
- [Sánchez, 2007]: “*On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting*”; Journal of Materials Processing Technology, vol. 182, pp 574–579, 2007.
- Sánchez Galíndez, José Antonio; López de Lacalle, Luis N.; Lamikiz Mentxaka, Aitzol. “*Electroerosión: proceso, máquinas y aplicaciones*” .Departamento de Ingeniería Mecánica, ETSI-Bilbao.
- [Shandilya, 2013]: “*RSM and ANN modeling approaches for predicting average cutting speed During WEDM of SiCp/6061 Al MMC*”; International Conference On DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM 2013, Procedia Engineering, vol. 64, pp 767 – 774, 2013.
- [Zain, 2011]: “*Estimation of the minimum machining performance in the abrasive waterjet machining using integrated ANN-SA*”; Expert Systems with Applications, vol. 38, pp 8316 – 8326, 2011.
- [Zhao, 2013]: “*A novel trajectory interpolation algorithm for WEDM. Unit Generalized Arc Length Increment Method*”; The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP, vol.6, pp 255 – 260, 2013.



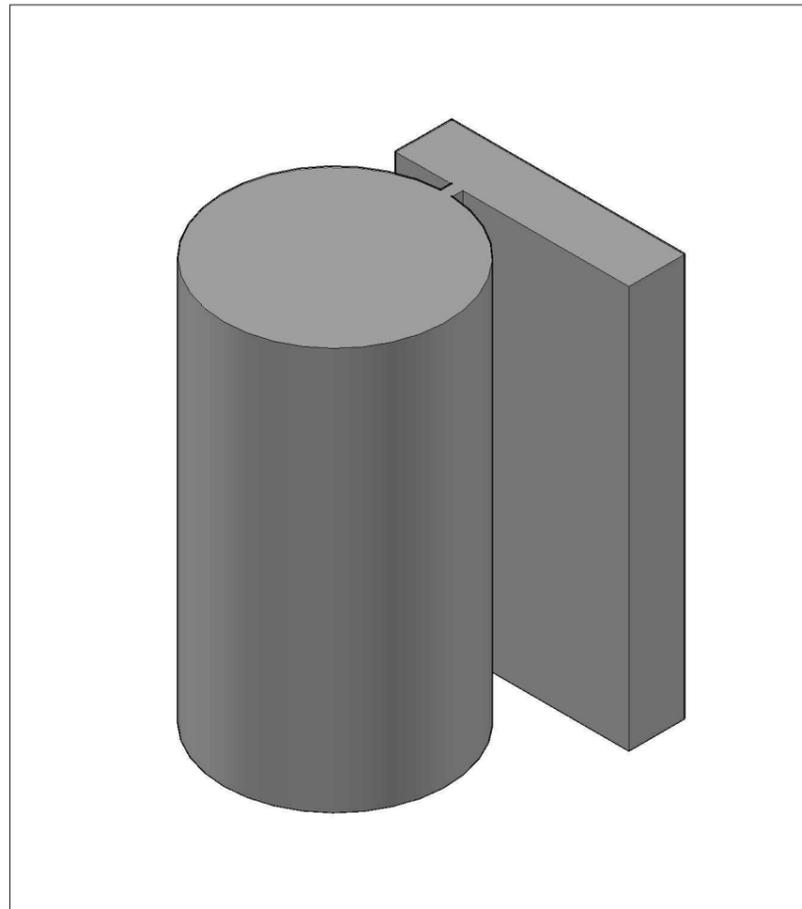
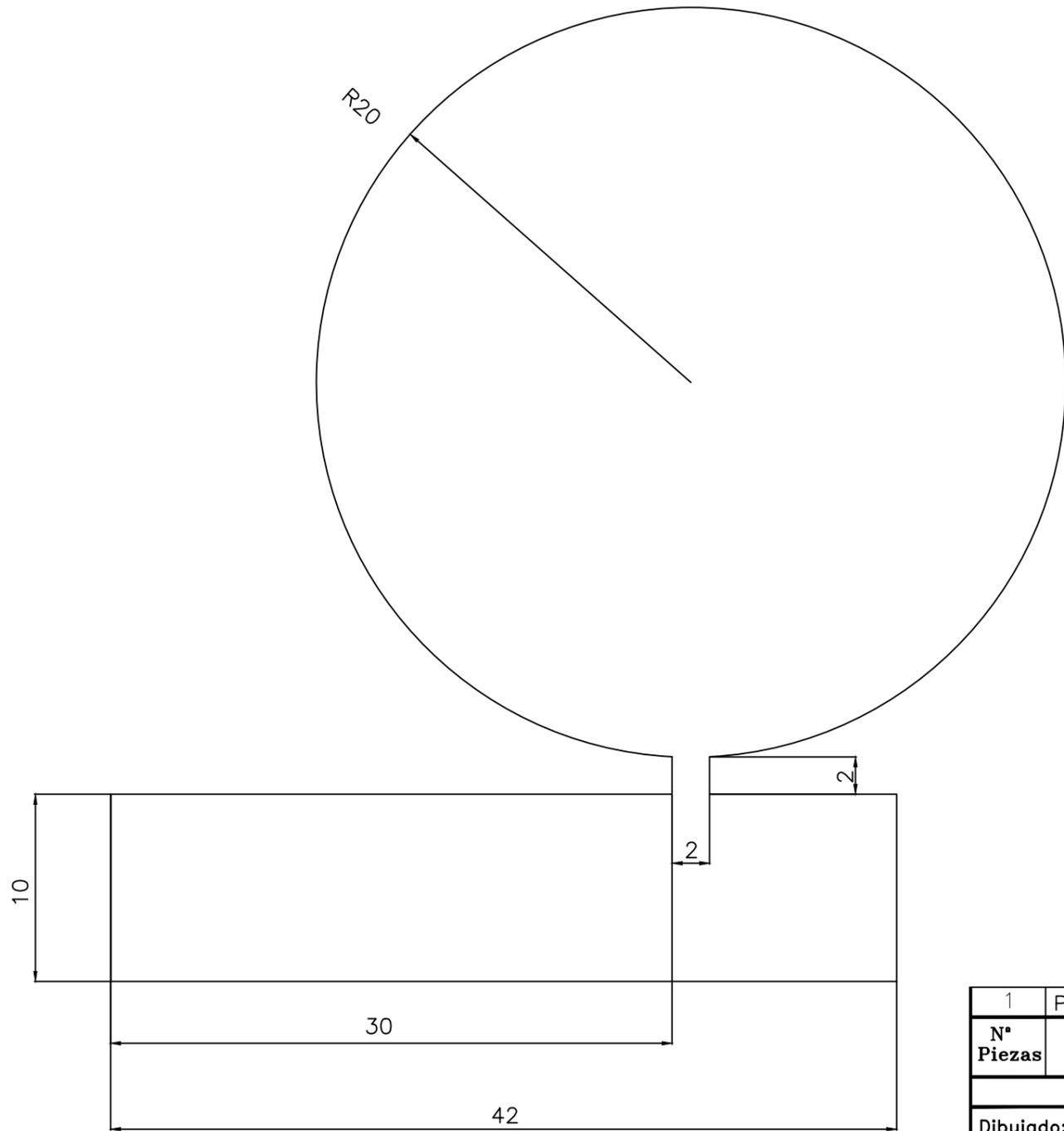
1	Probeta de radios 1, 1.5 y 3 mm			Acero		
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	
		Fecha	Nombre			
Dibujado:				UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL BILBAO		
Comprobado:						
	Escala	cirC_R_1_1.5_3_CEO			Aplicación de RNAs para la caracterización del error en trayectorias circulares por WEDM	
Tol. gen.	4:1				Plano N°.	1
		N° Planos.	4			



1	Probeta de radios 5, 9 y 12 mm			Acero		
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	
	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO			
Dibujado:						
Comprobado:						
Escala Tol. gen.	3:1	cirC_R_5_9_12_CEO			Aplicación de RNAs para la caracterización del error en trayectorias circulares por WEDM	
					Plano N°.	2
					N° Planos.	4



1	Probeta de radio 15 mm			Acero		
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	
		Fecha	Nombre	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 		
	Dibujado:					
	Comprobado:					
	Escala	cirC_R_15_CEO		Aplicación de RNAs para la caracterización del error en trayectorias circulares por WEDM		
Tol. gen.	4:1					
				Plano N°.	3	
				N° Planos.	4	



1	Probeta de radio 20 mm			Acero		
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	
		Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL BILBAO		
Dibujado:						
Comprobado:						
	Escala	cirC_R_20_CEO			Aplicación de RNAs para la caracterización del error en trayectorias circulares por WEDM	
Tol. gen.	15:4				Plano N°.	4
				N° Planos.	4	

DOCUMENTO 5.2. RESULTADOS

5.2.1. RESULTADOS DE MEDICIONES

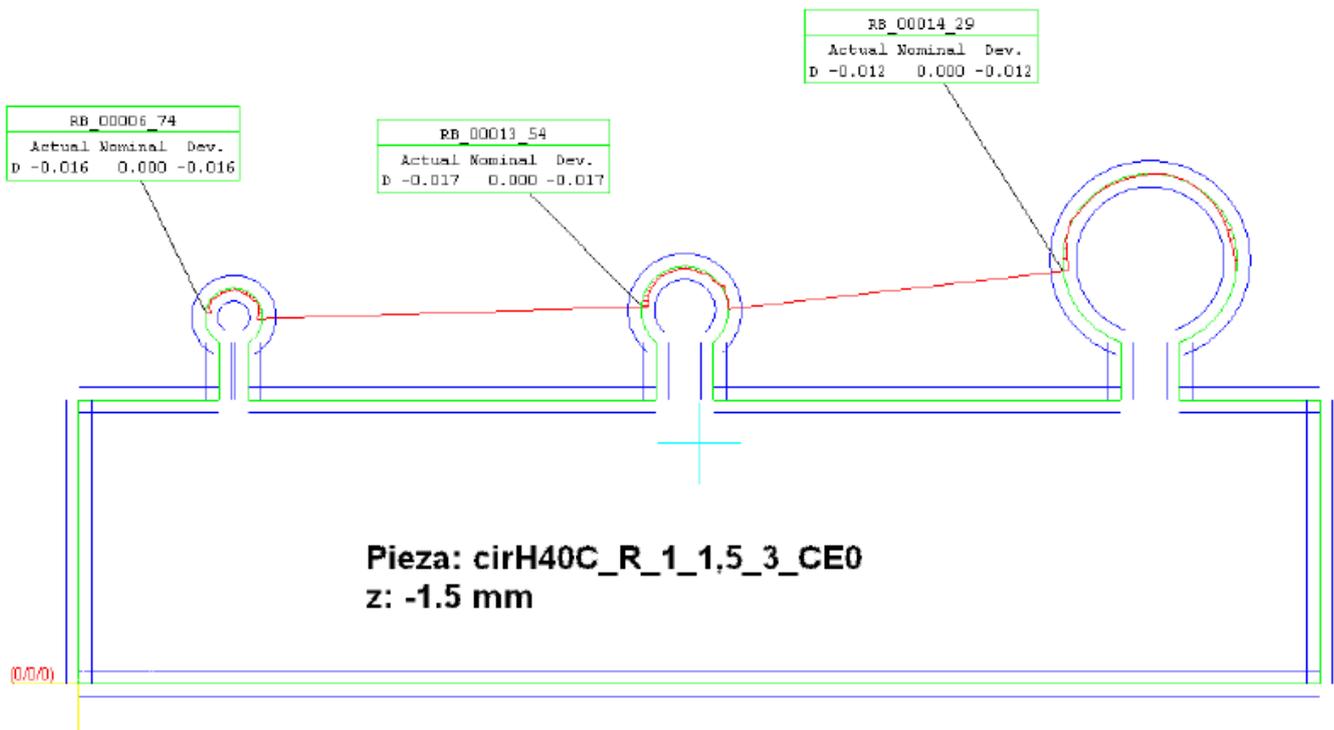
5.2.1.1. IMÁGENES PROBETAS CON DESVIACIONES MÁXIMAS.

A continuación se presentará ordenadamente por espesores, radios y planos de medición, el defecto de forma y las desviaciones máximas en cada círculo.

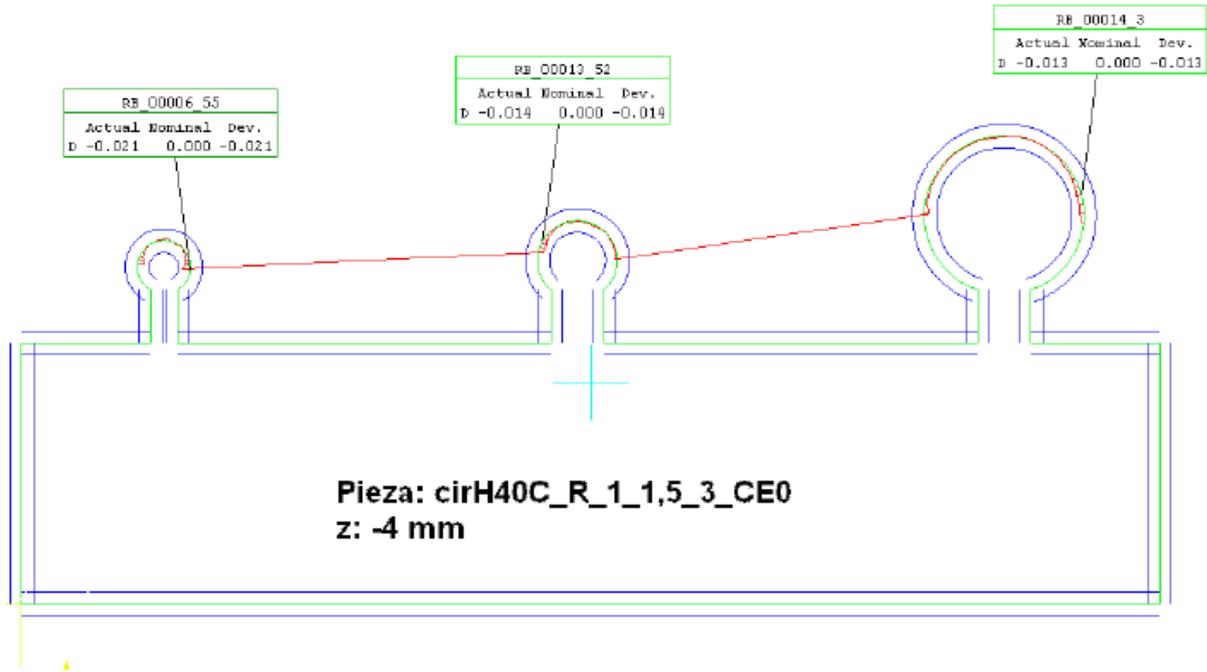
5.2.1.1.1. H40 (Espesor 40 mm)

H40 R1 1.5 3 (Radios 1, 1.5 y 3 mm)

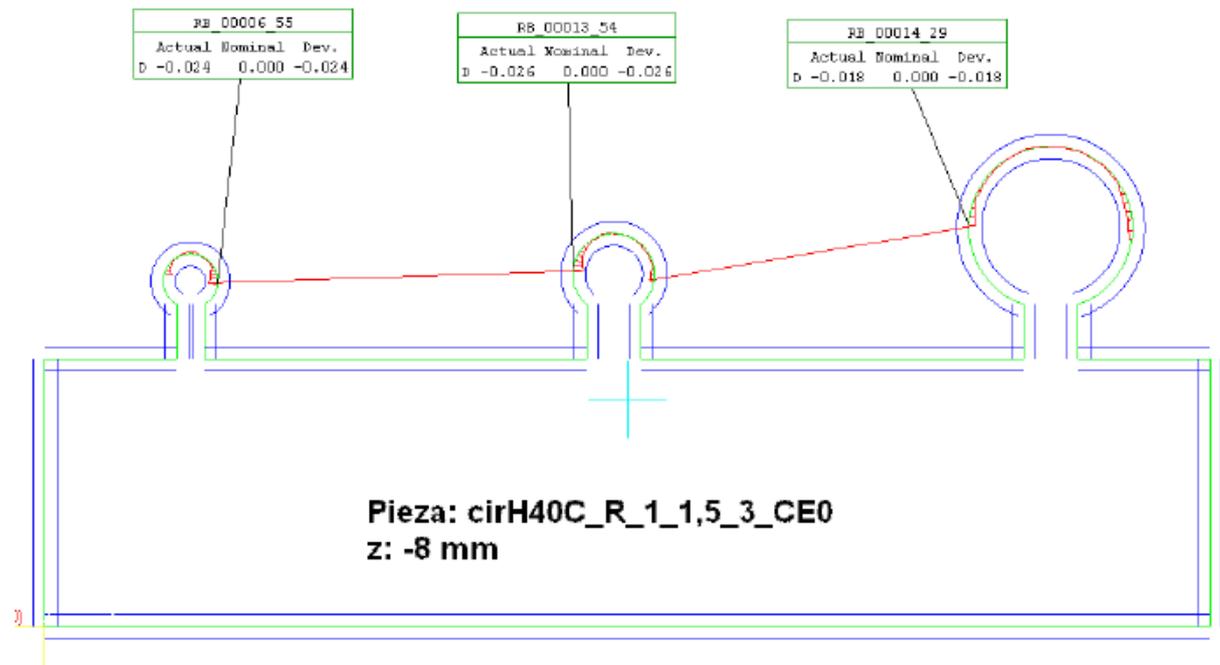
Z-1.5 mm



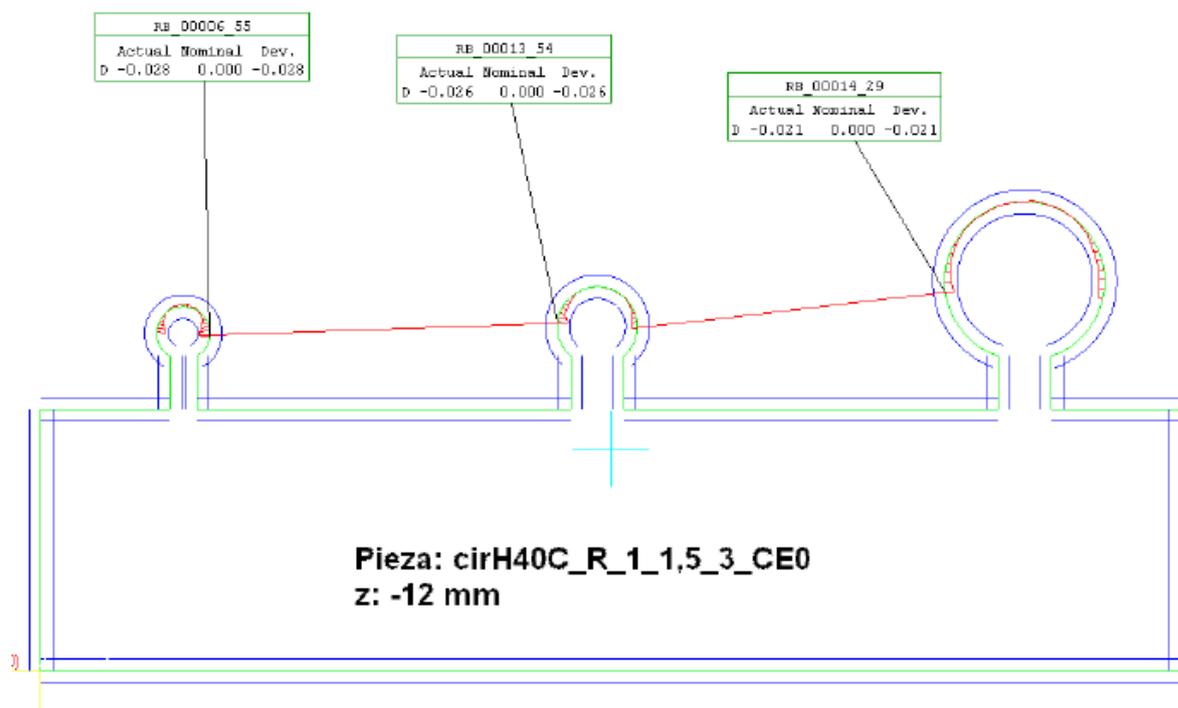
Z-4 mm



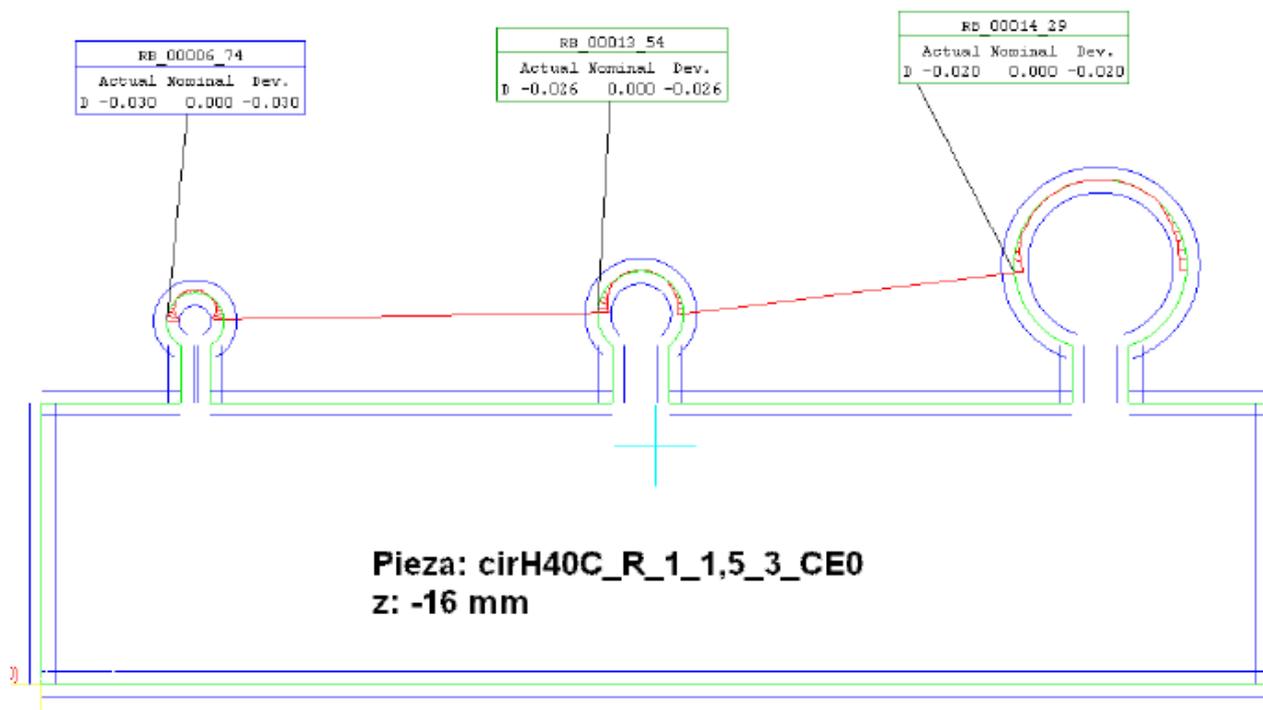
Z-8 mm



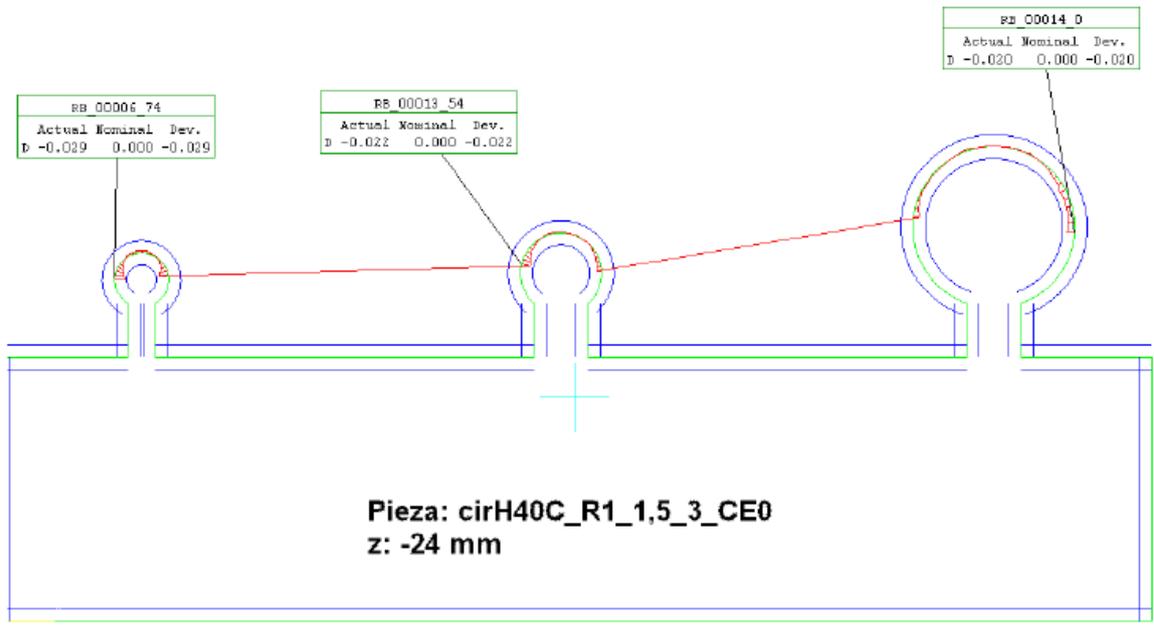
Z-12 mm



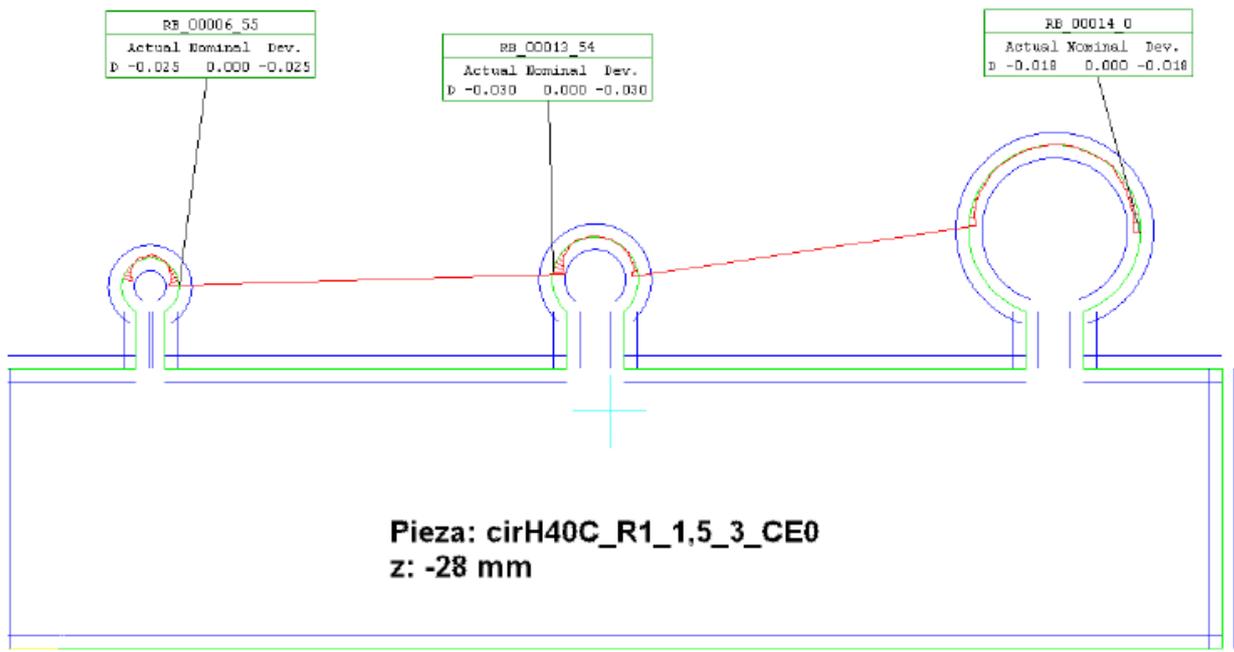
Z-16 mm



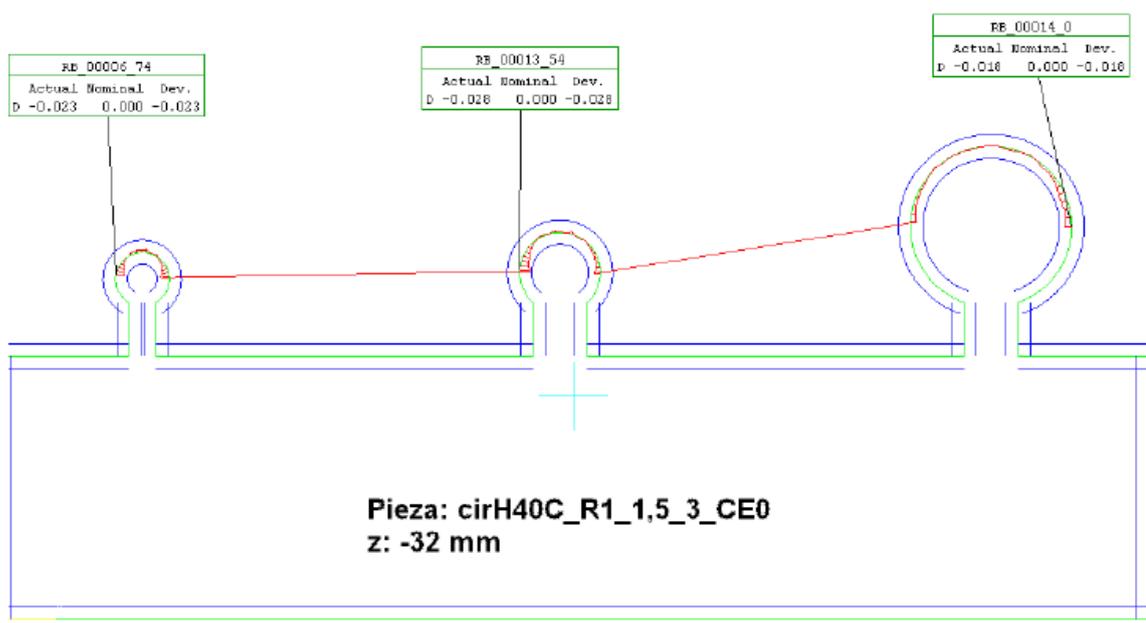
Z-24 mm



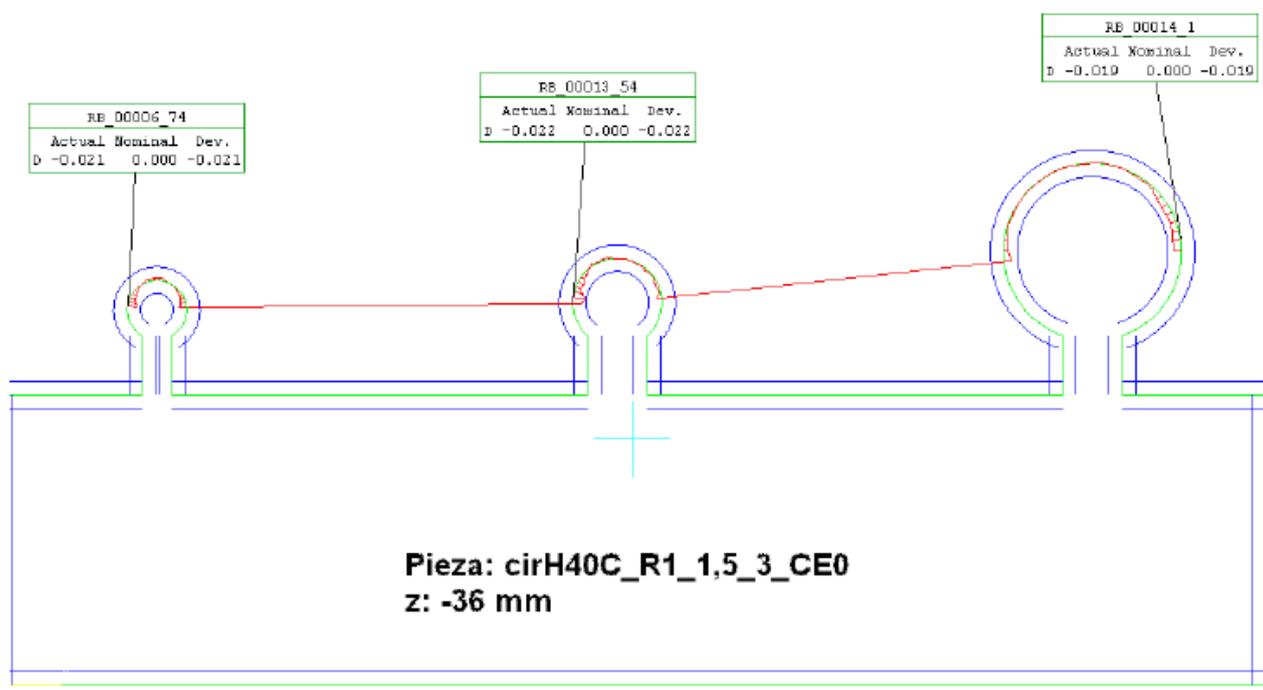
Z-28 mm



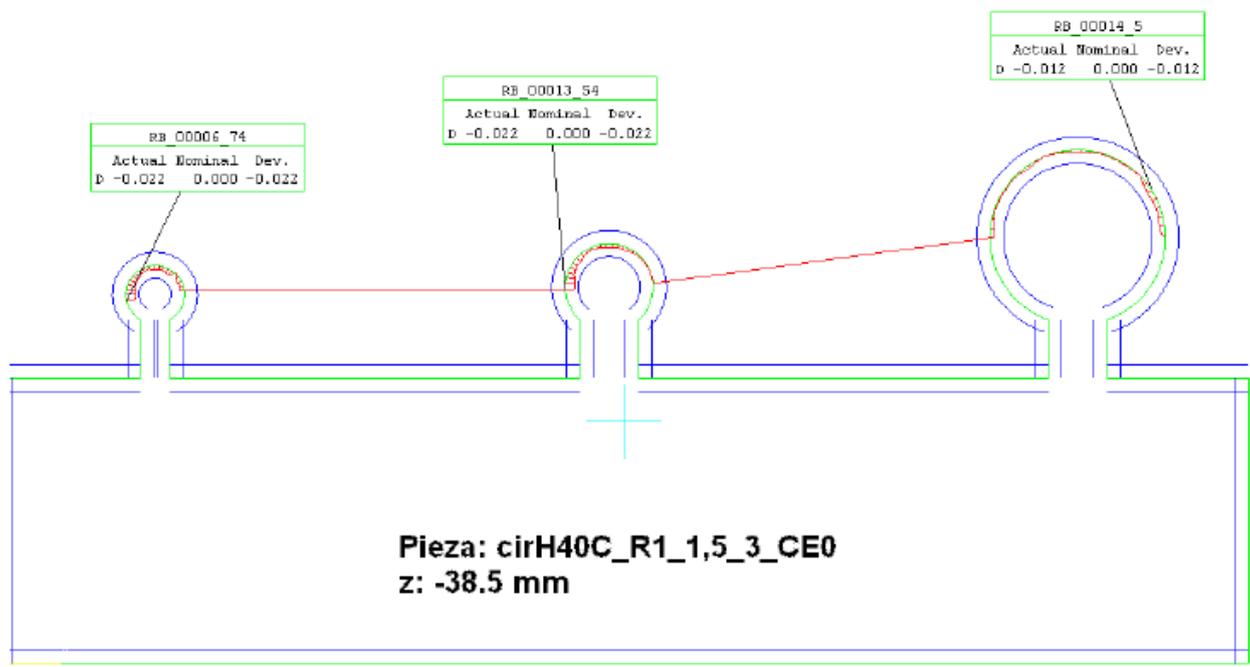
Z-32 mm



Z-36 mm

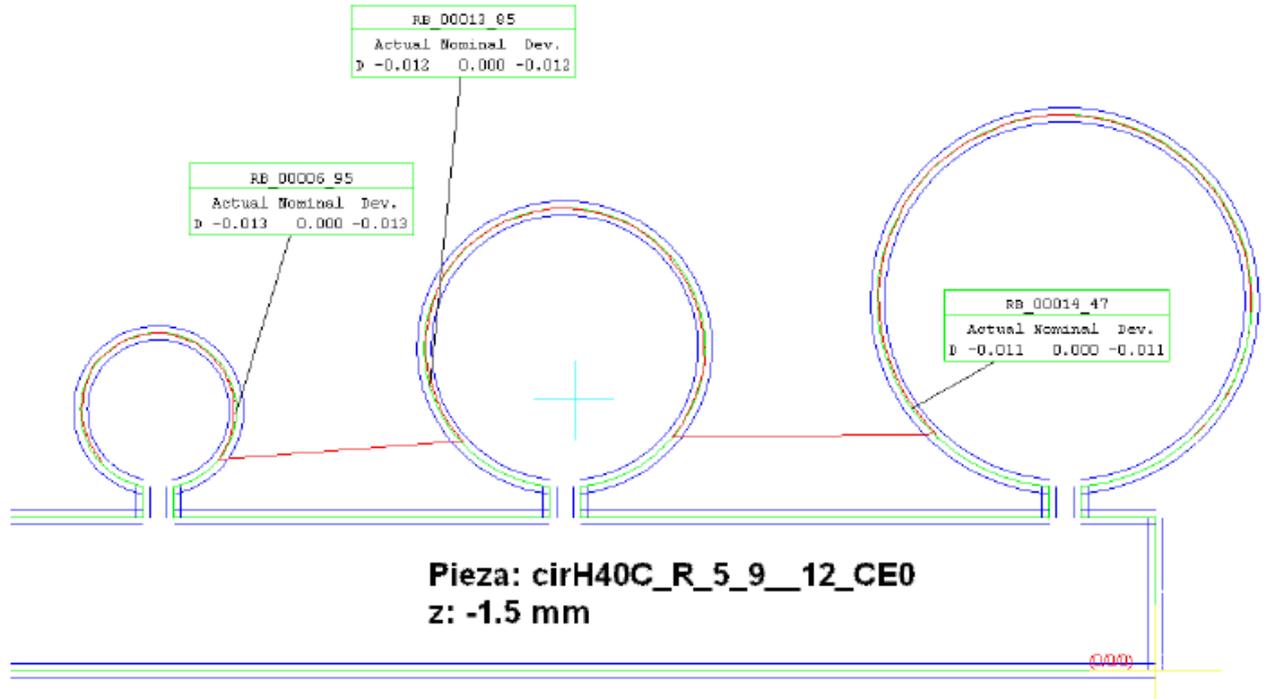


Z-38.5 mm

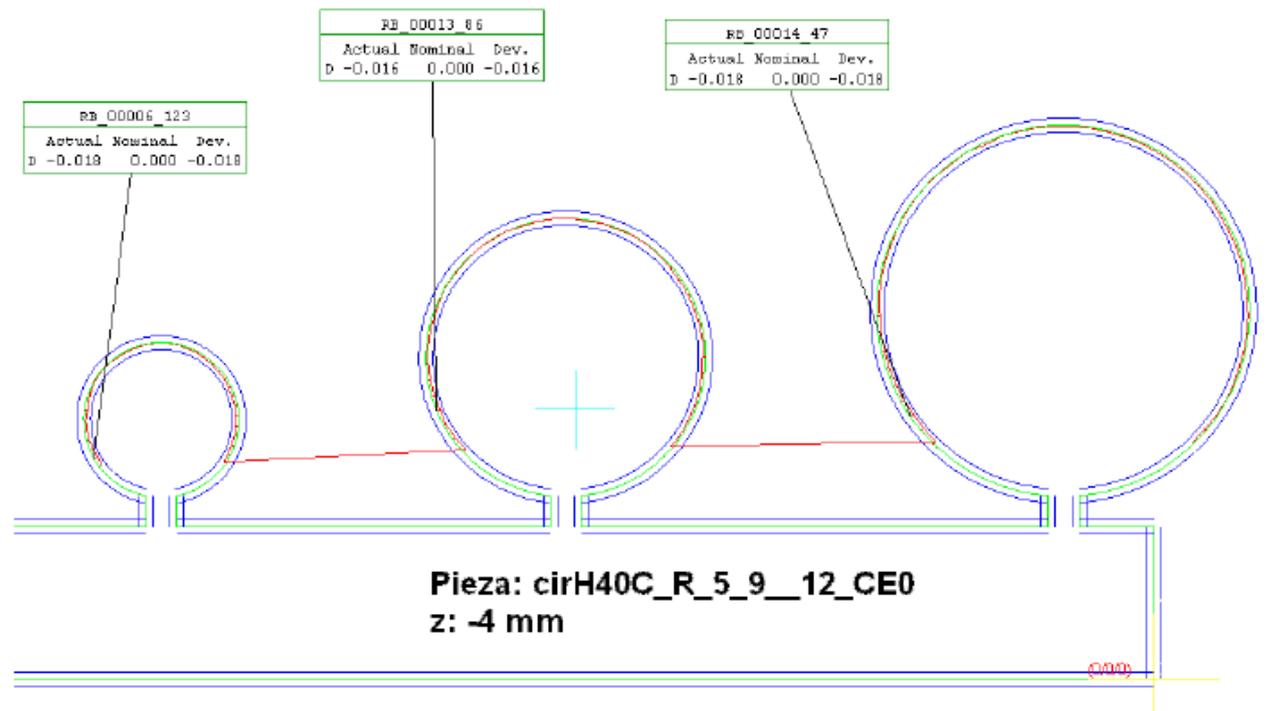


H40 R5 9 12 (Radios 5, 9 y 12 mm)

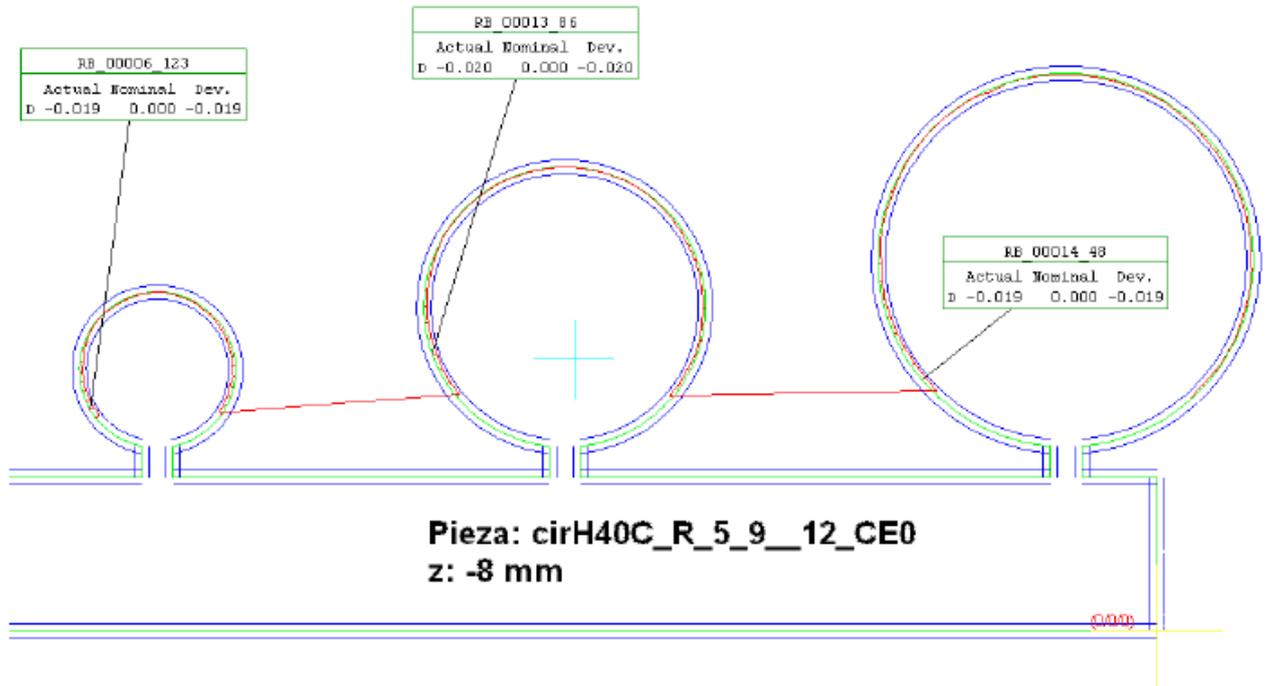
Z-1.5 mm



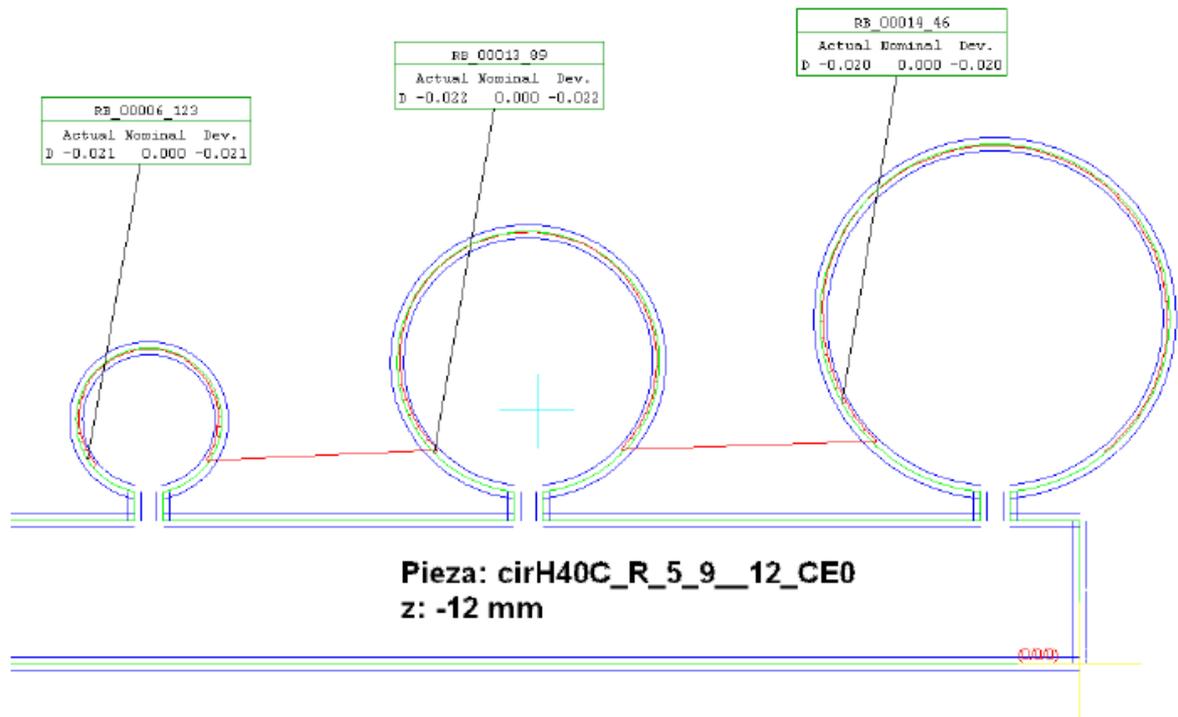
Z-4 mm



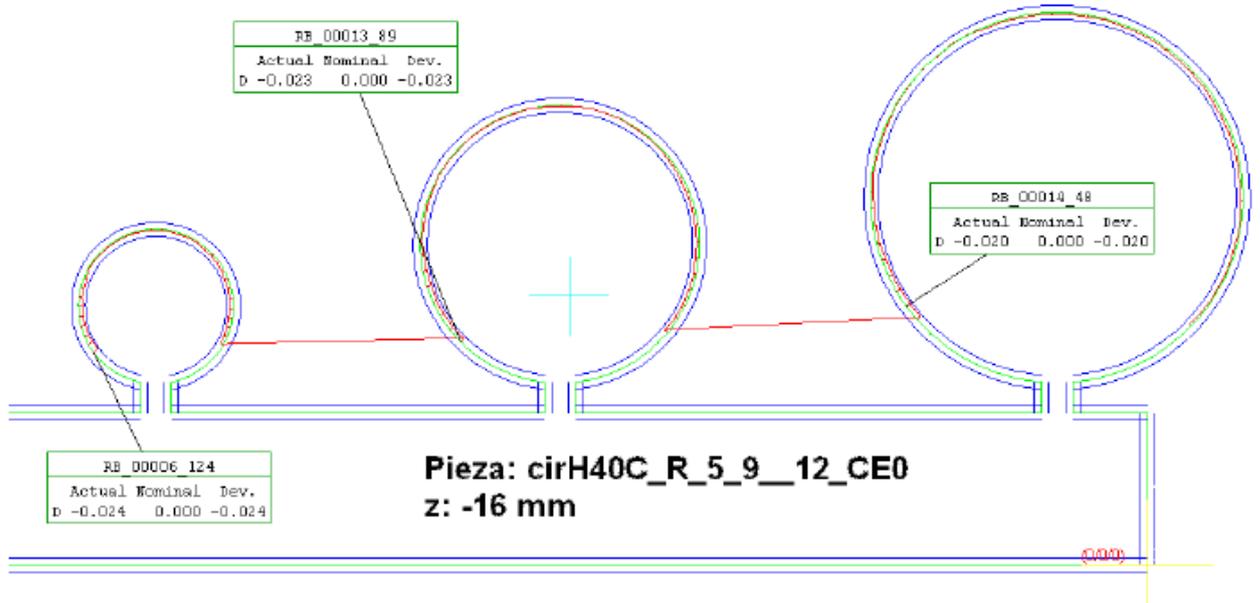
Z-8 mm



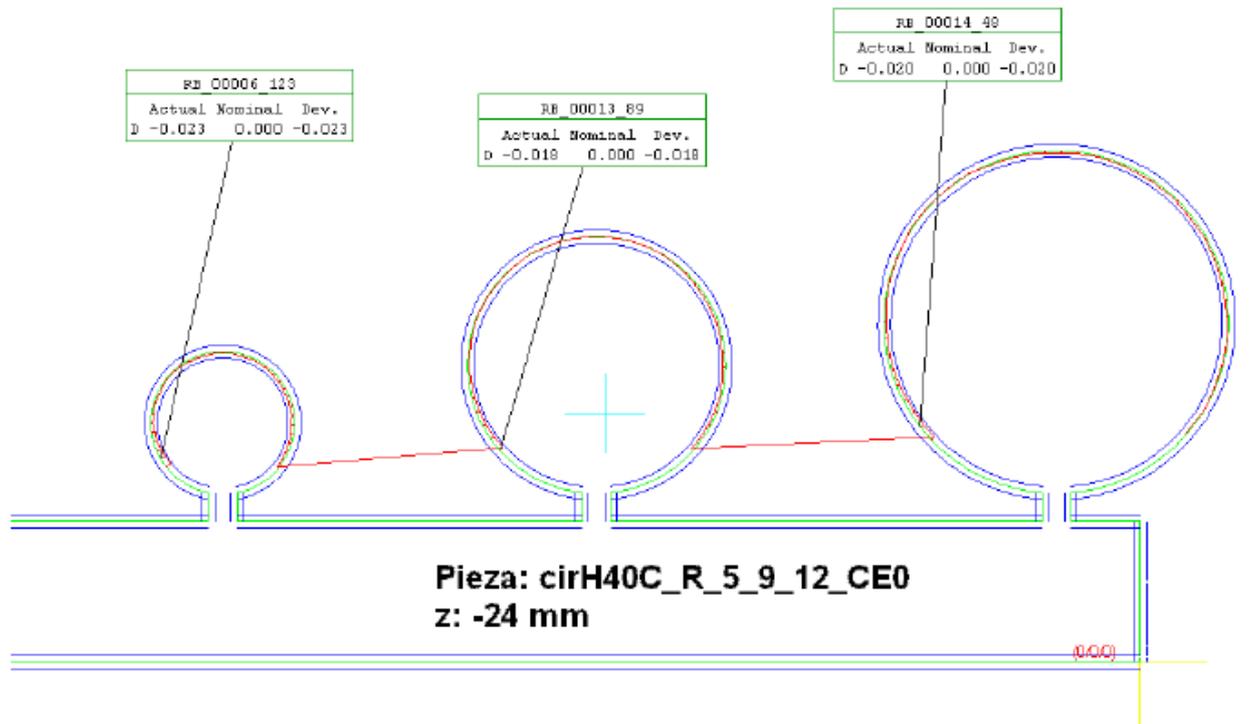
Z-12 mm



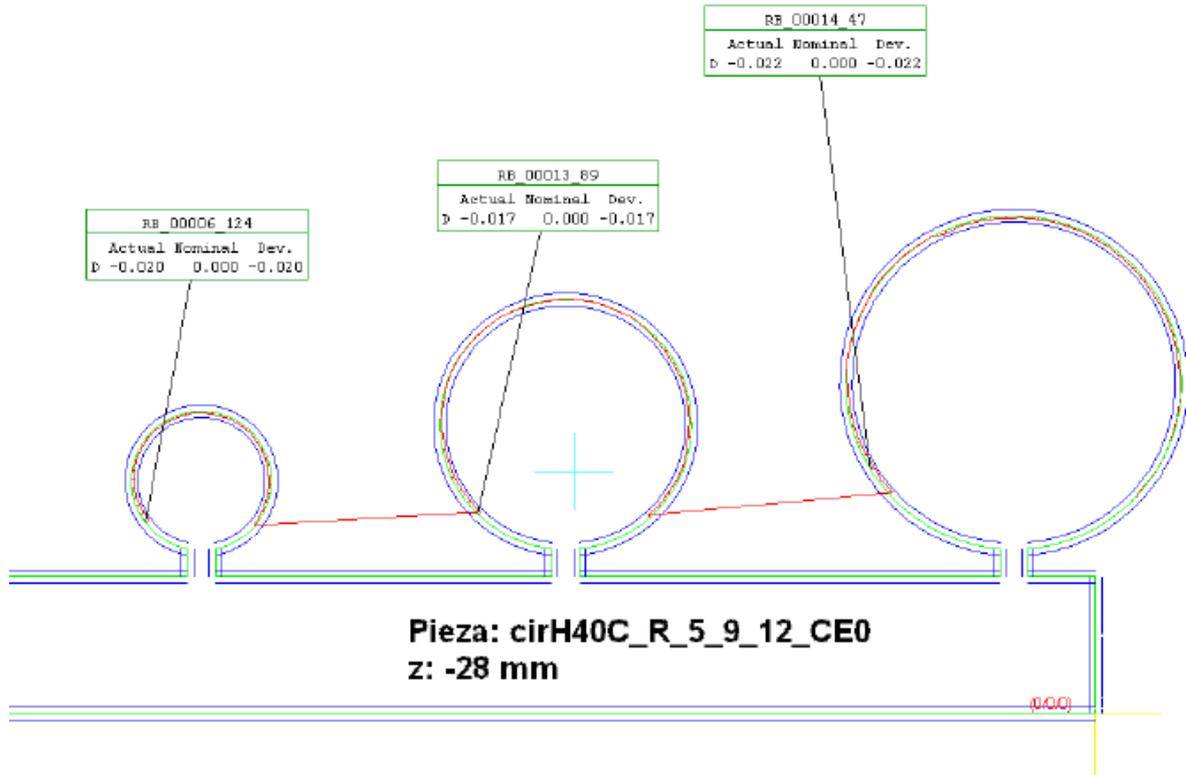
Z-16 mm



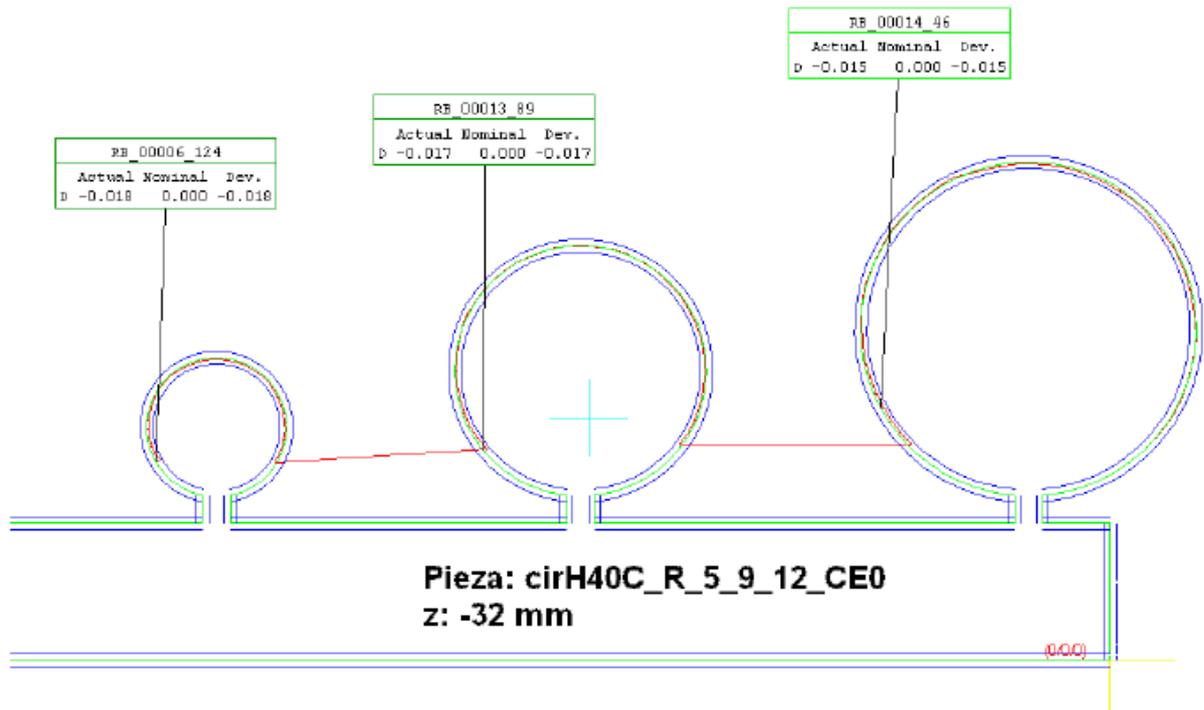
Z-24 mm



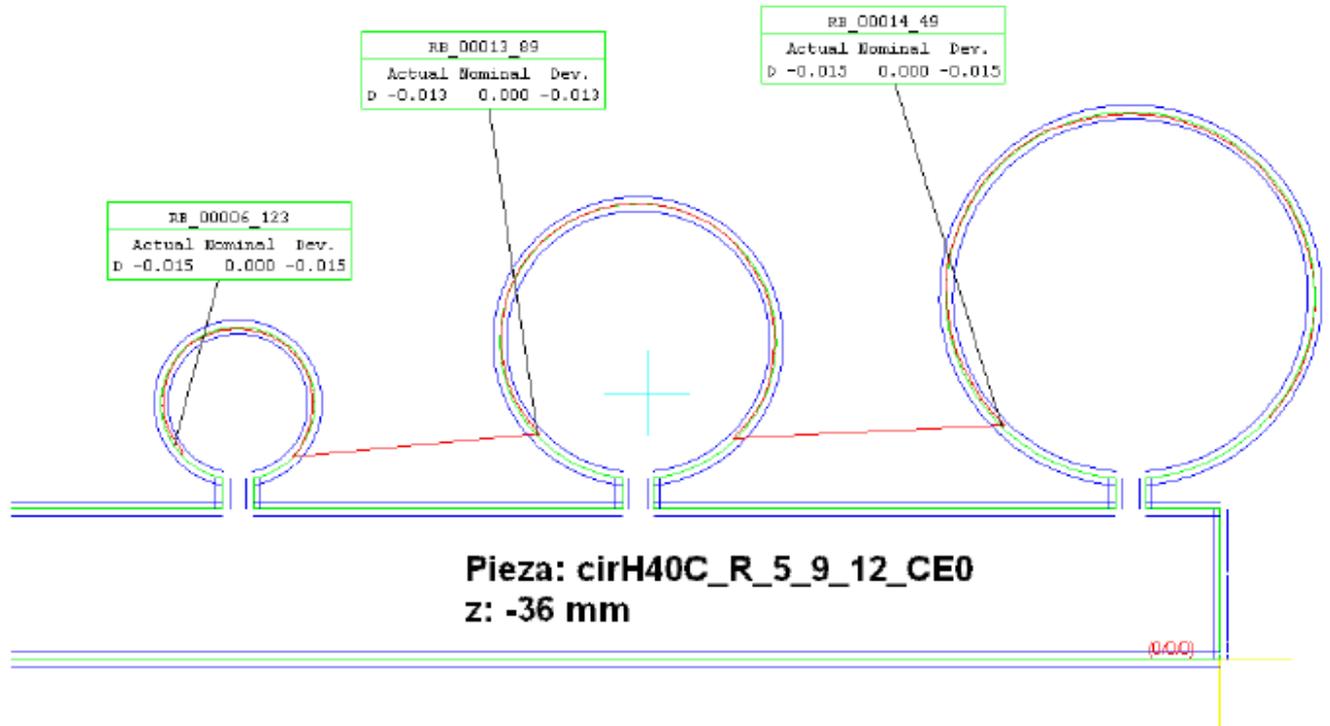
Z-28 mm



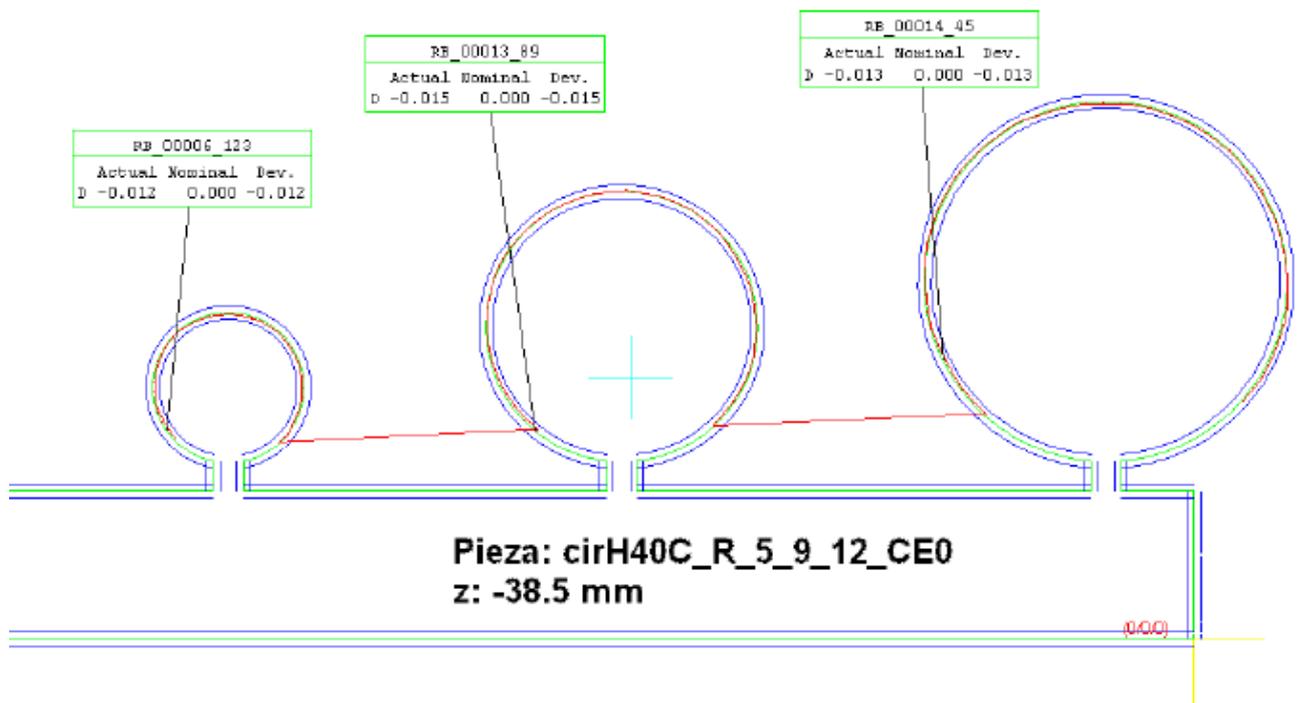
Z-32 mm



Z-36 mm

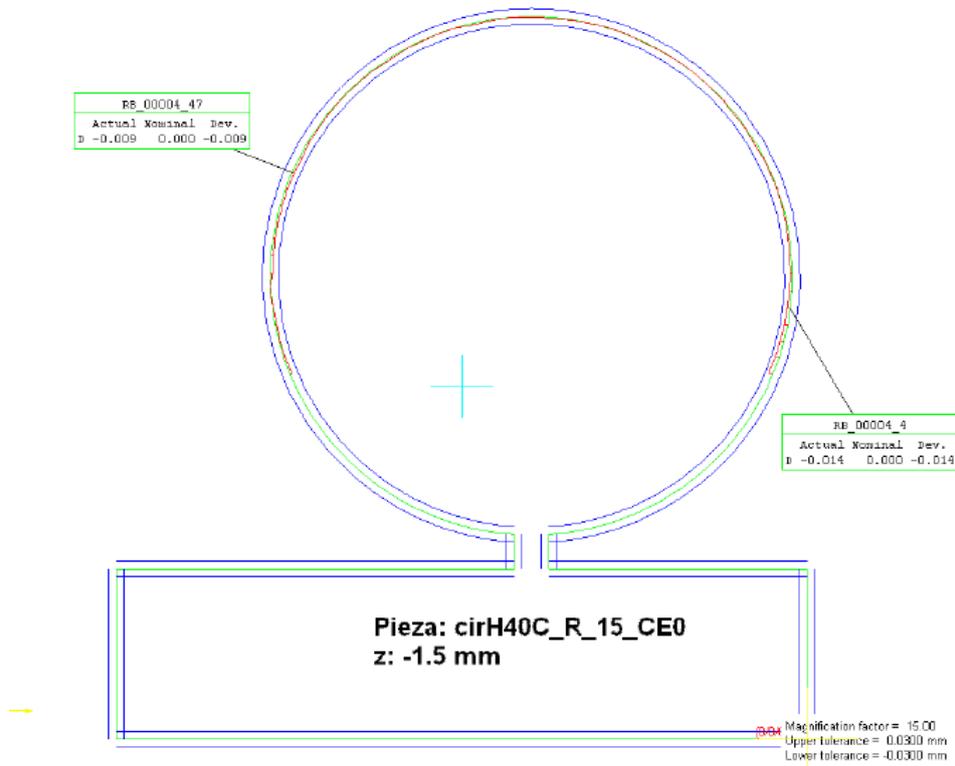


Z-38.5 mm

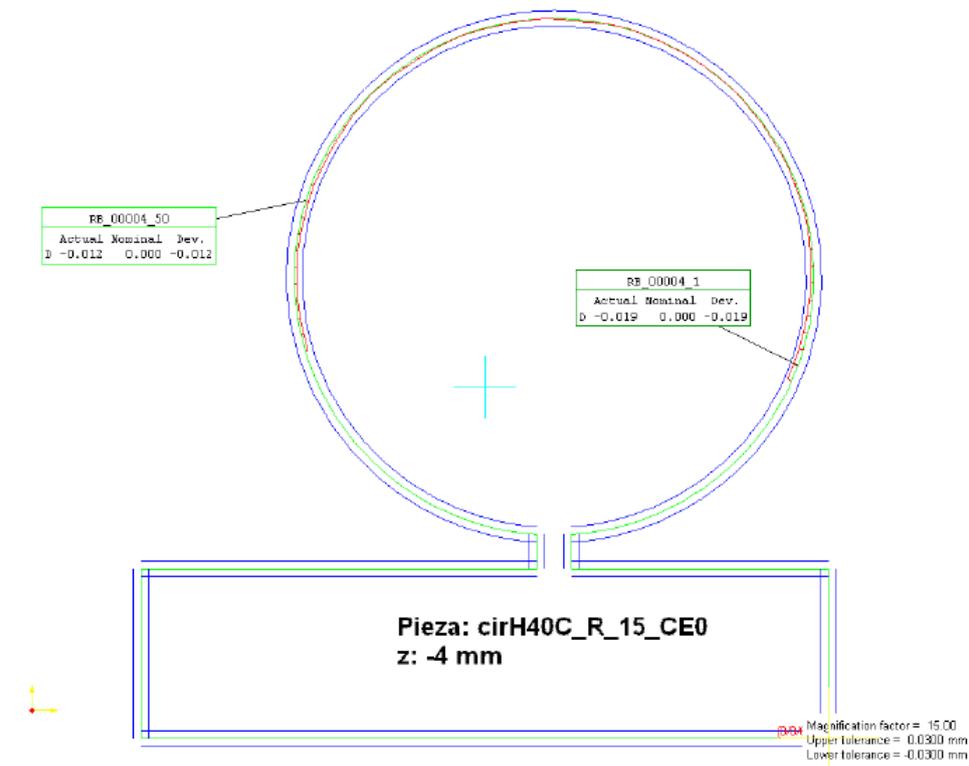


H40 R15 (Radio 15 mm)

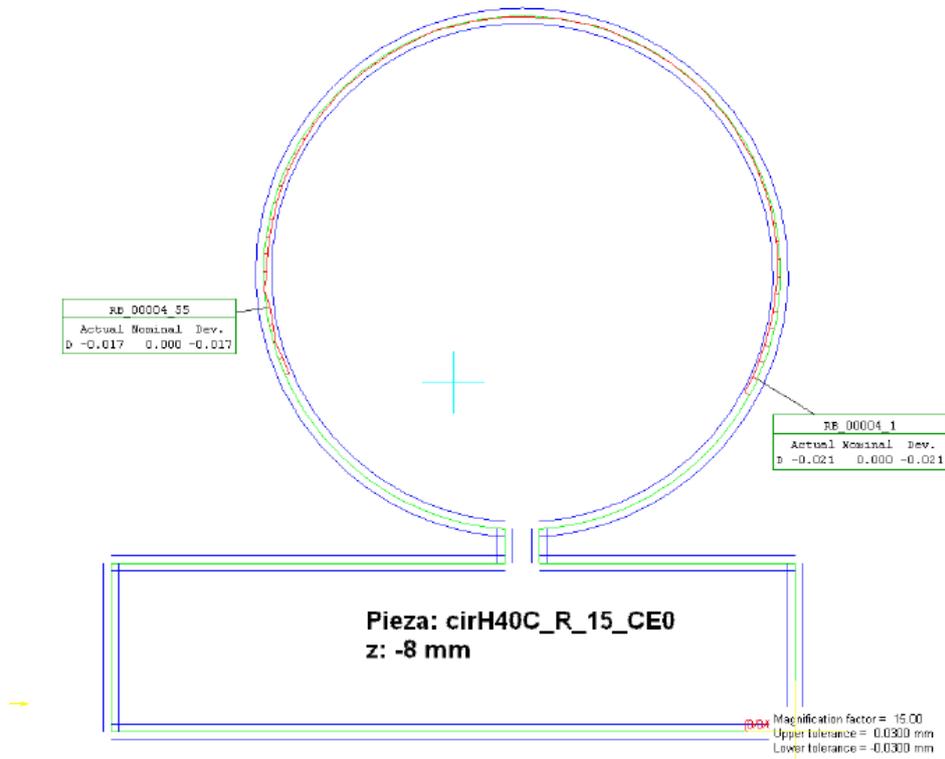
Z-1.5 mm



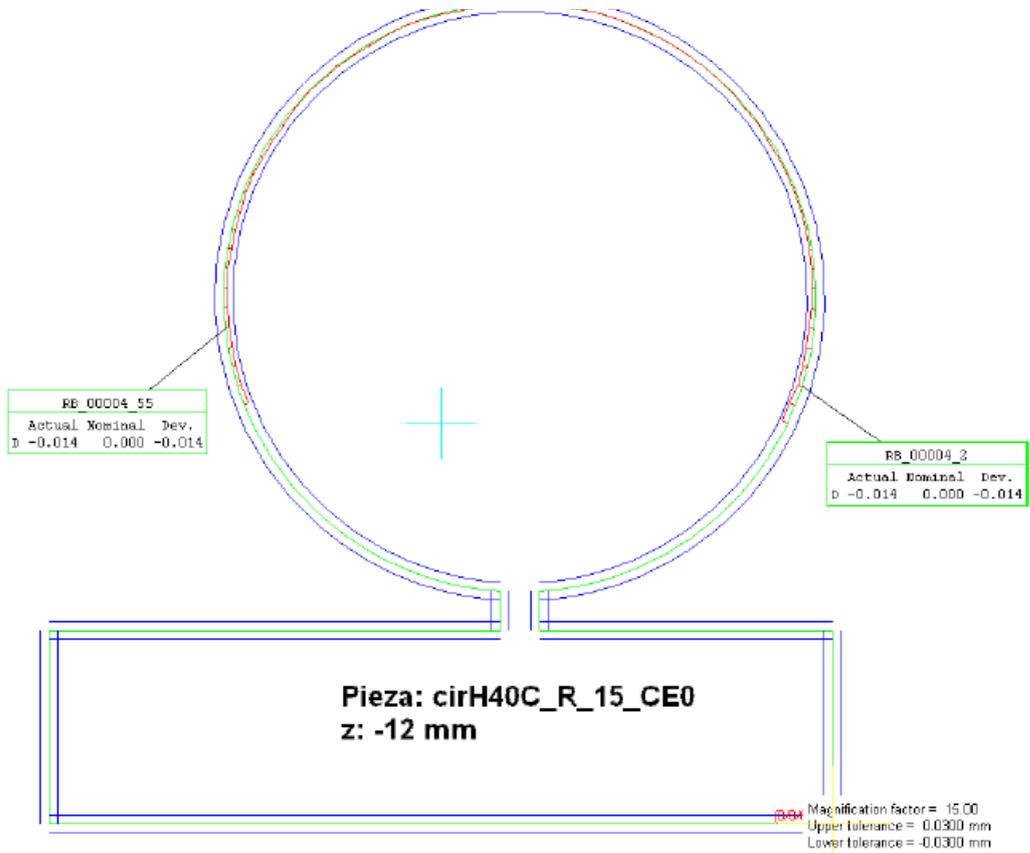
Z-4 mm



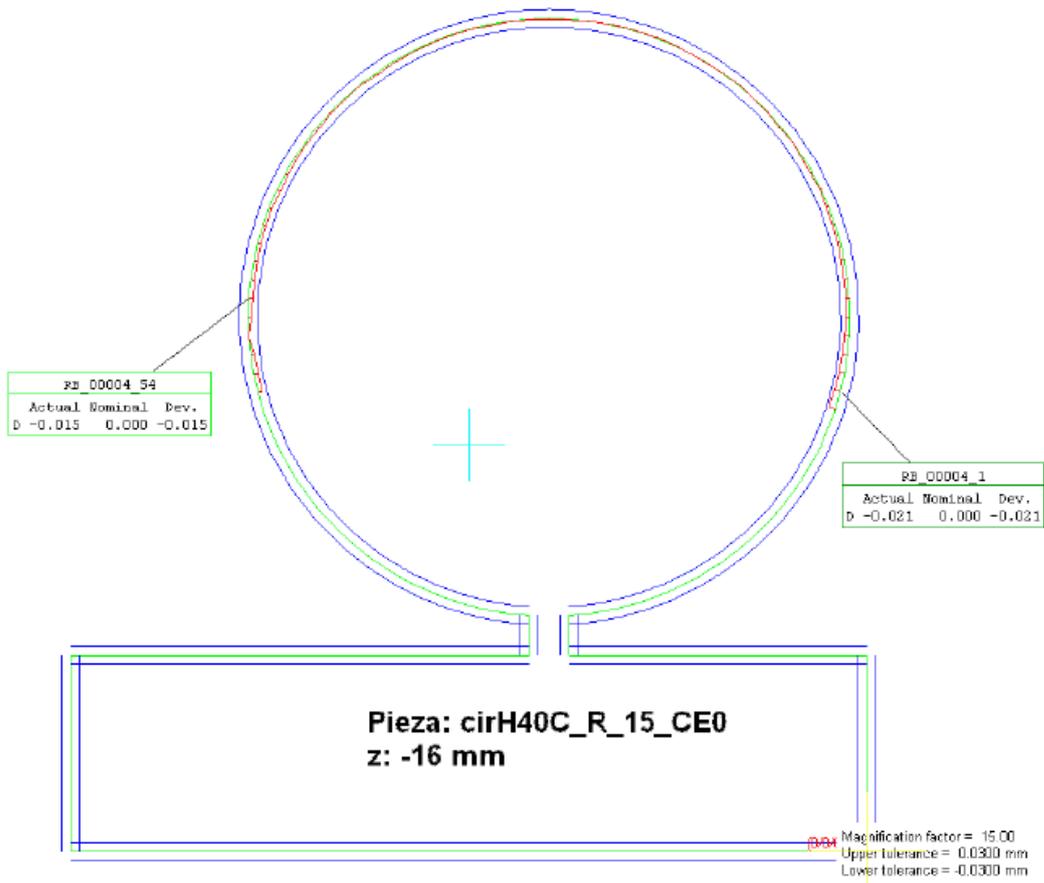
Z-8 mm



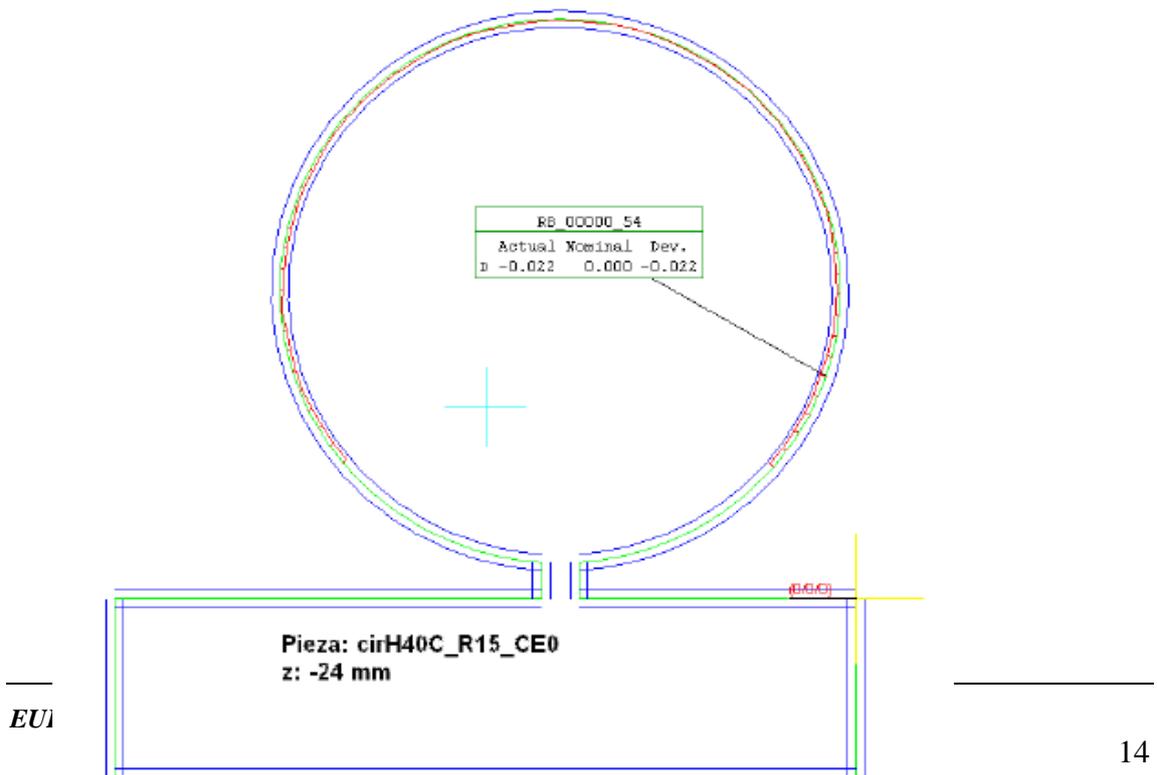
Z-12 mm



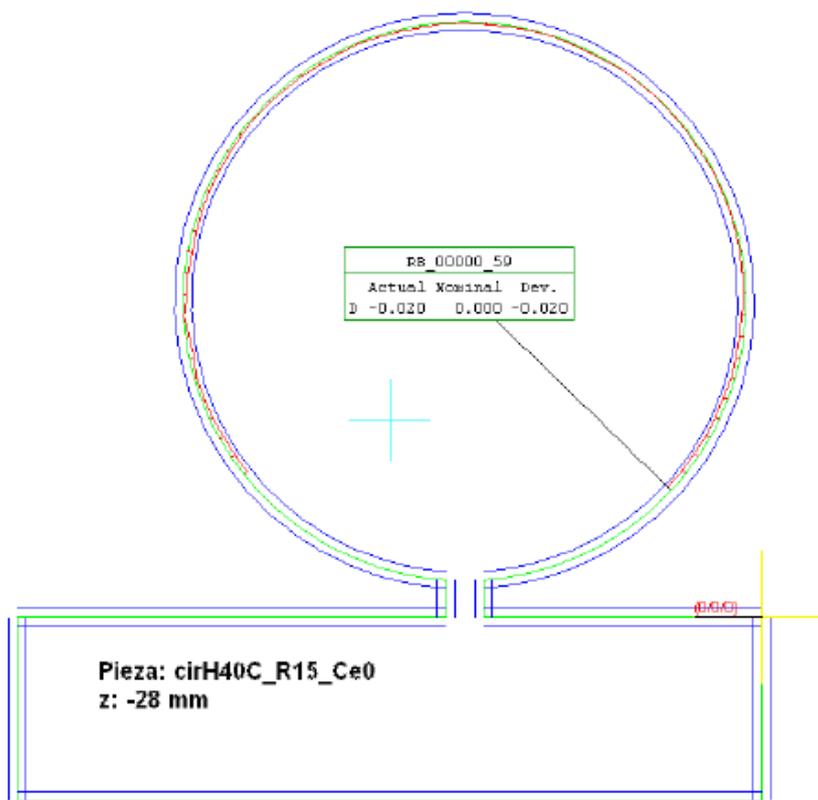
Z-16 mm



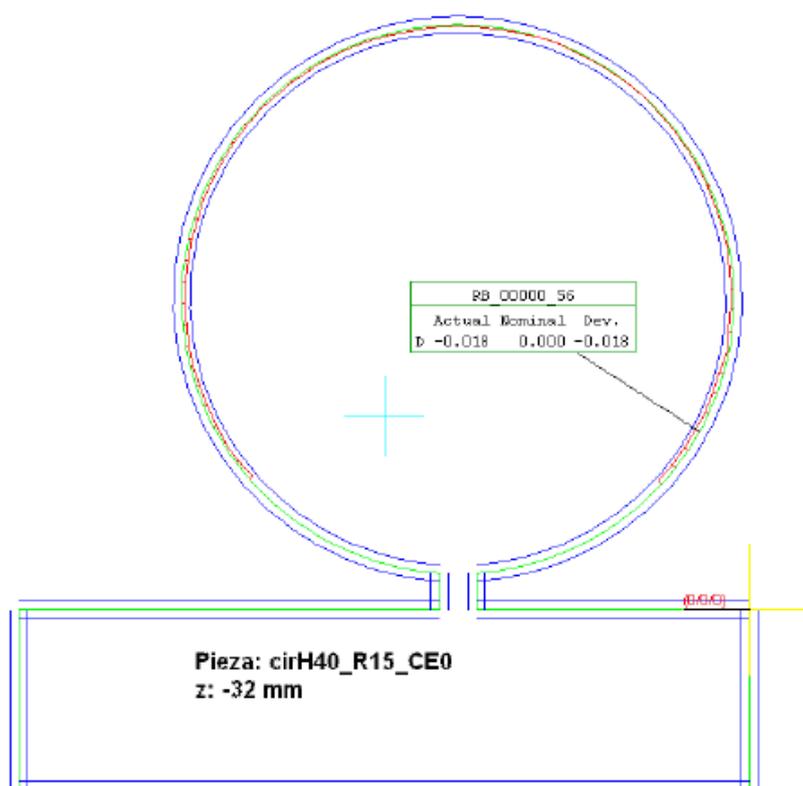
Z-24 mm



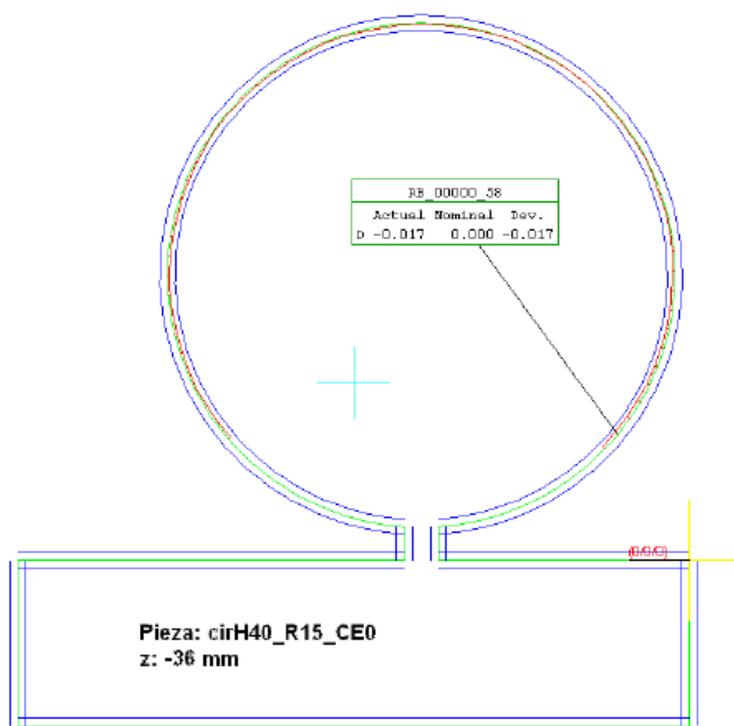
Z-28 mm



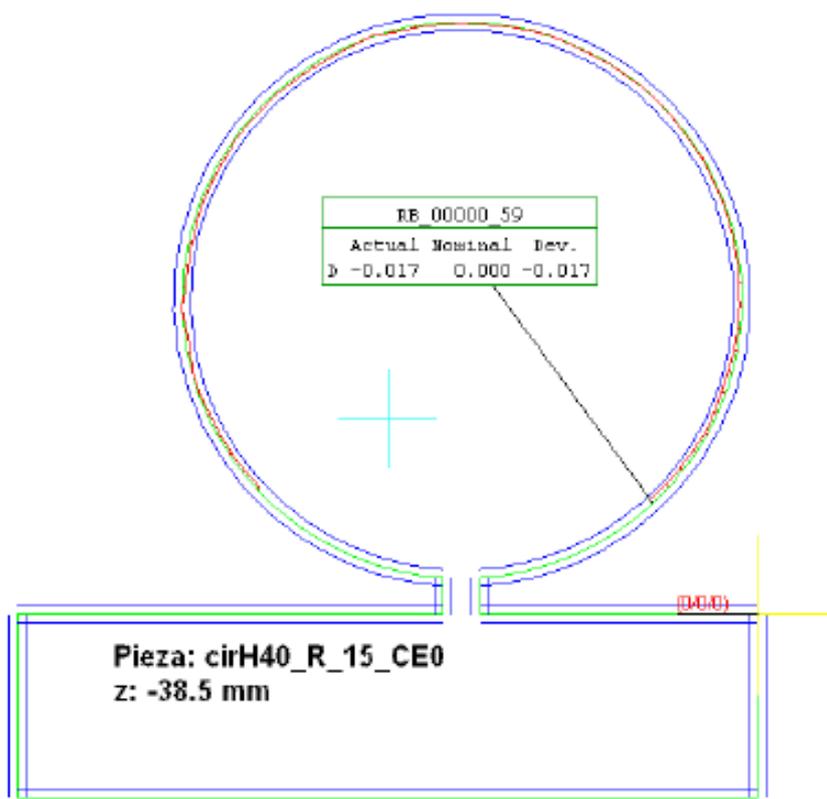
Z-32 mm



Z-36 mm

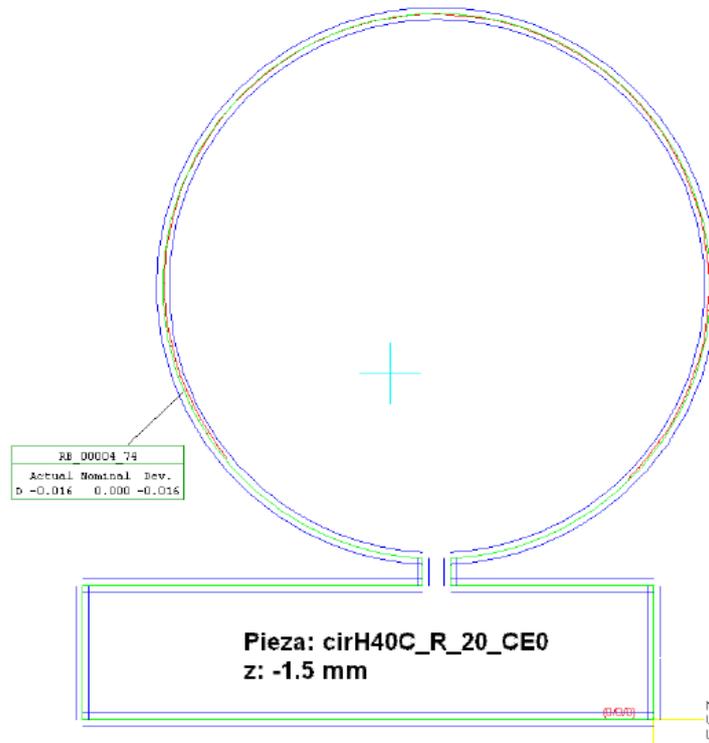


Z-38.5 mm

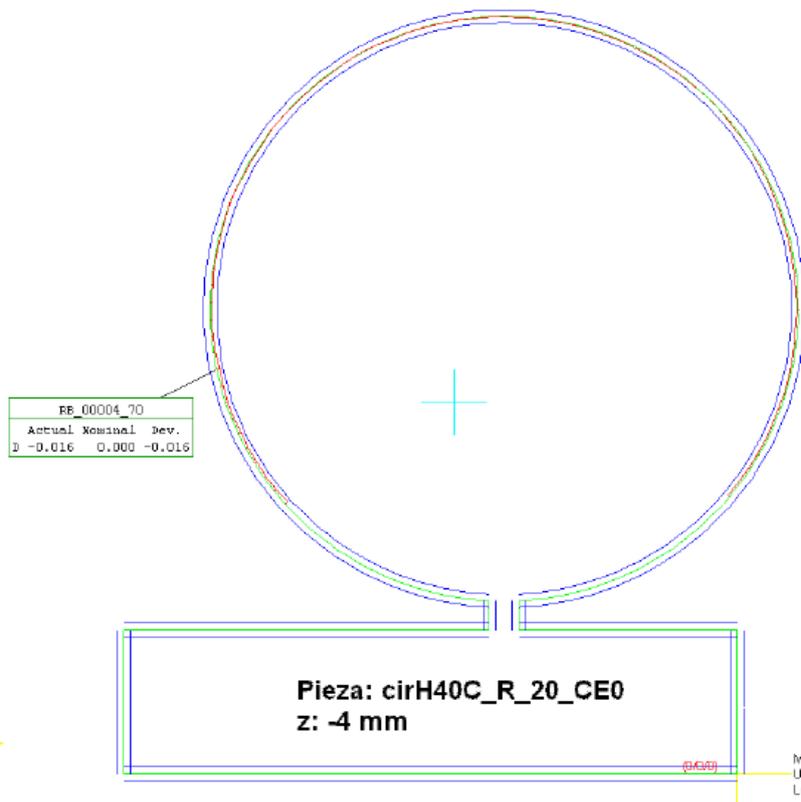


H40 R20 (Radio 20 mm)

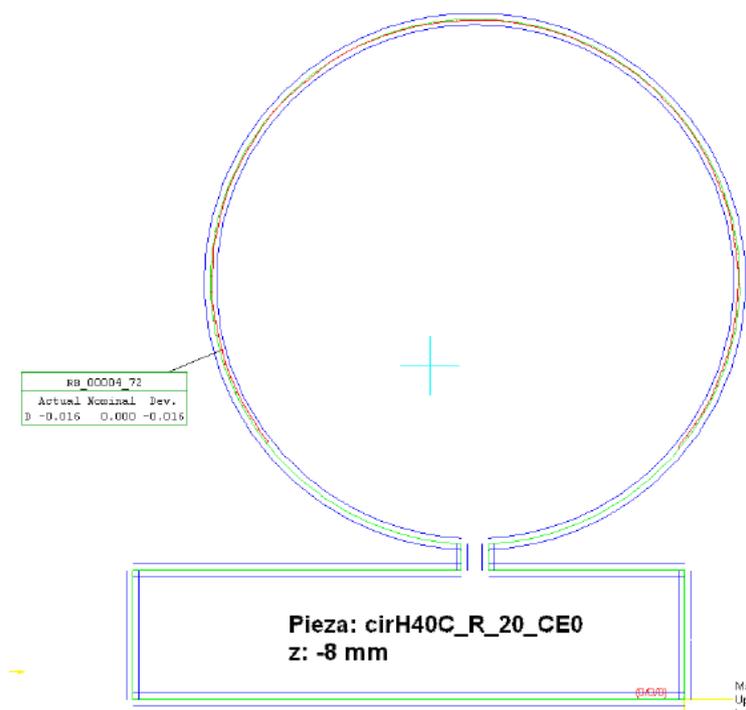
Z-1.5 mm



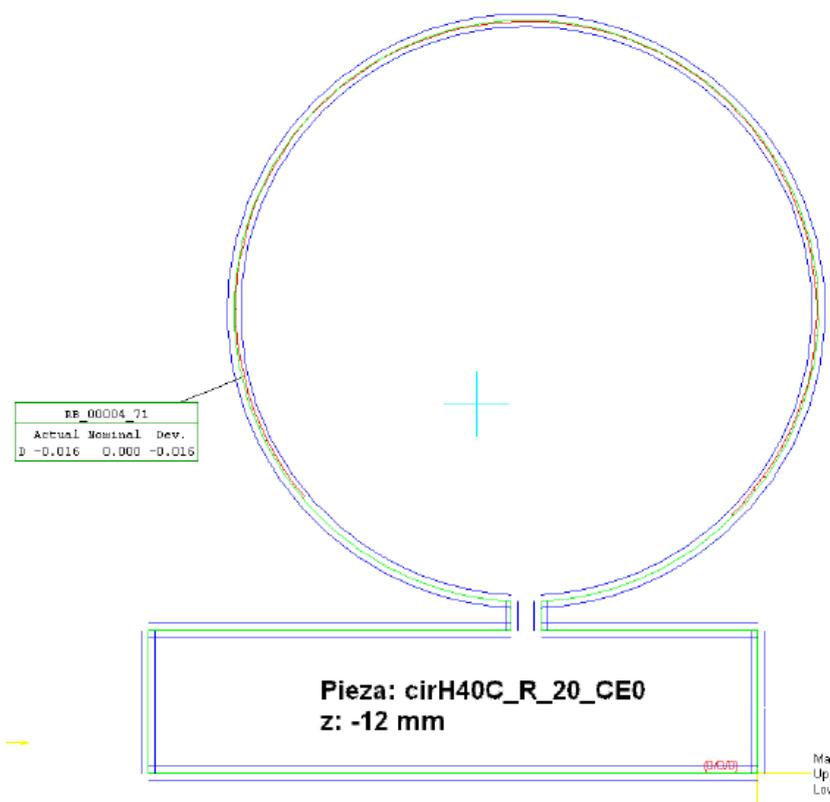
Z-4 mm



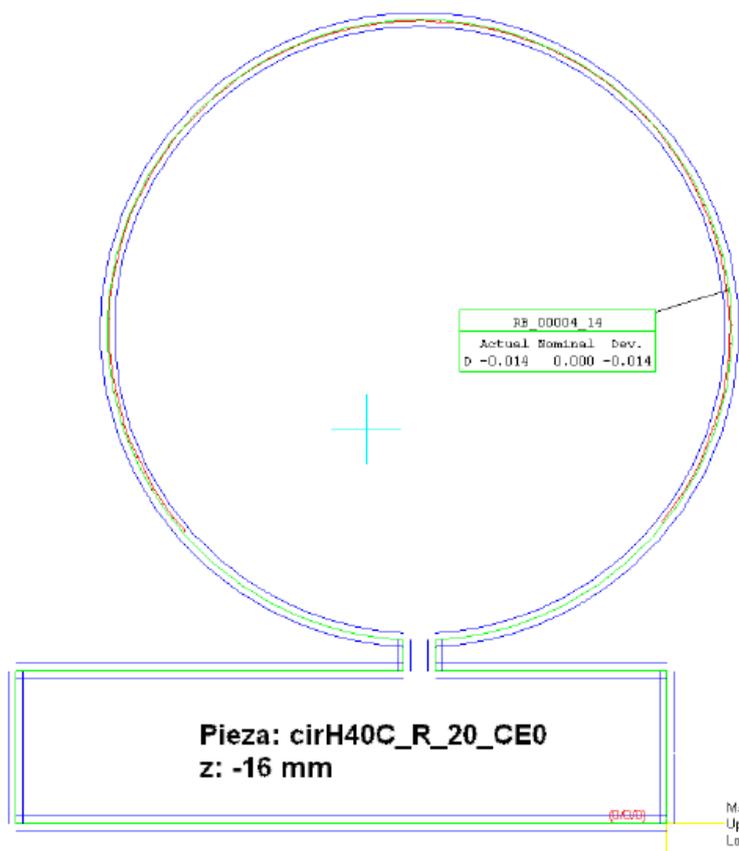
Z-8 mm



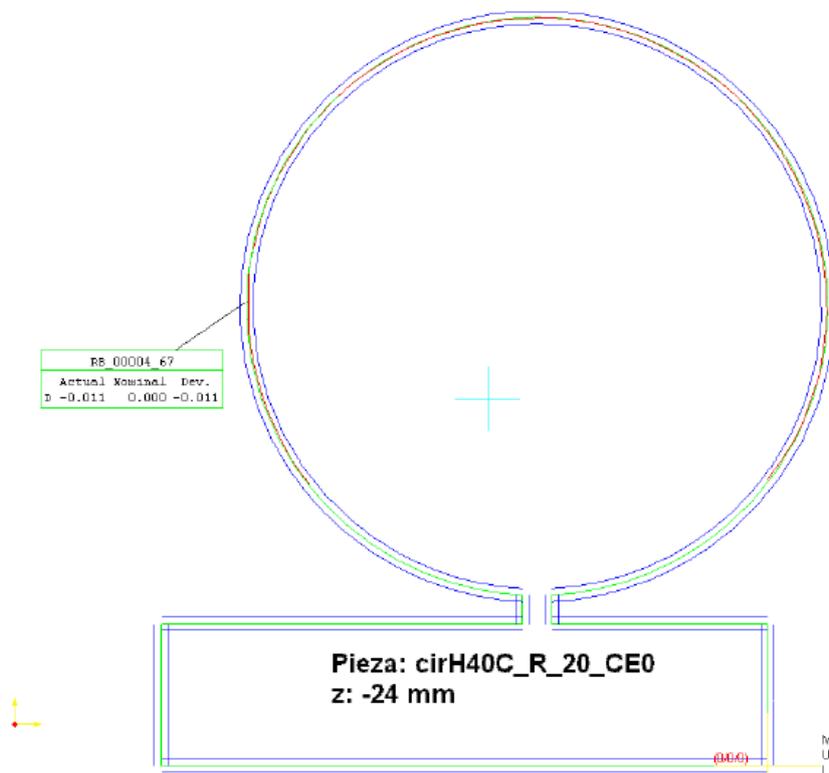
Z-12 mm



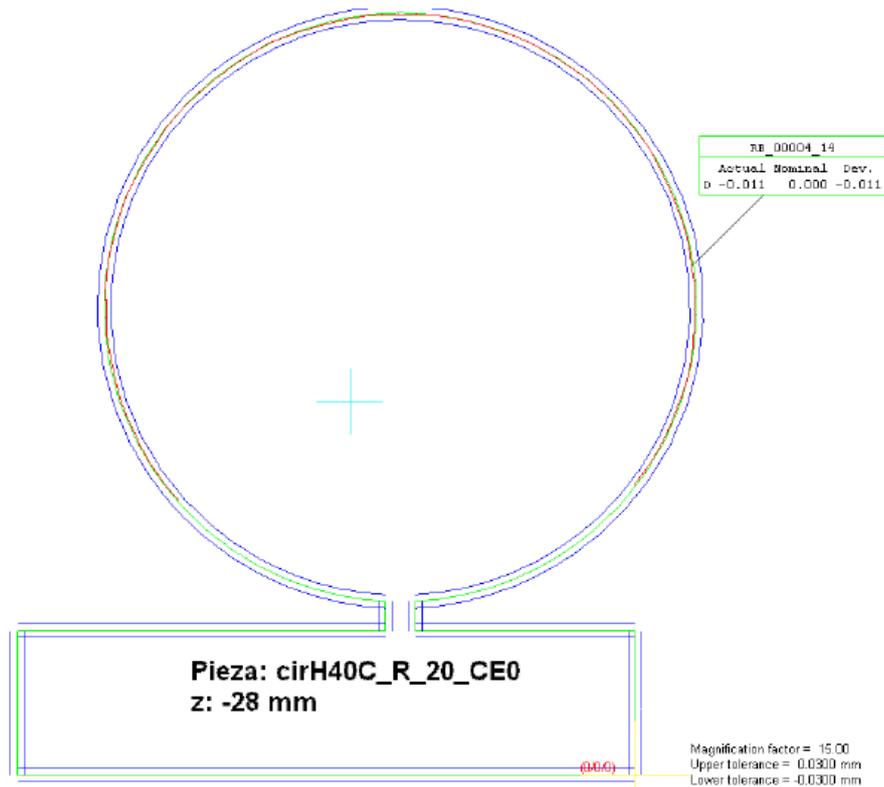
Z-16 mm



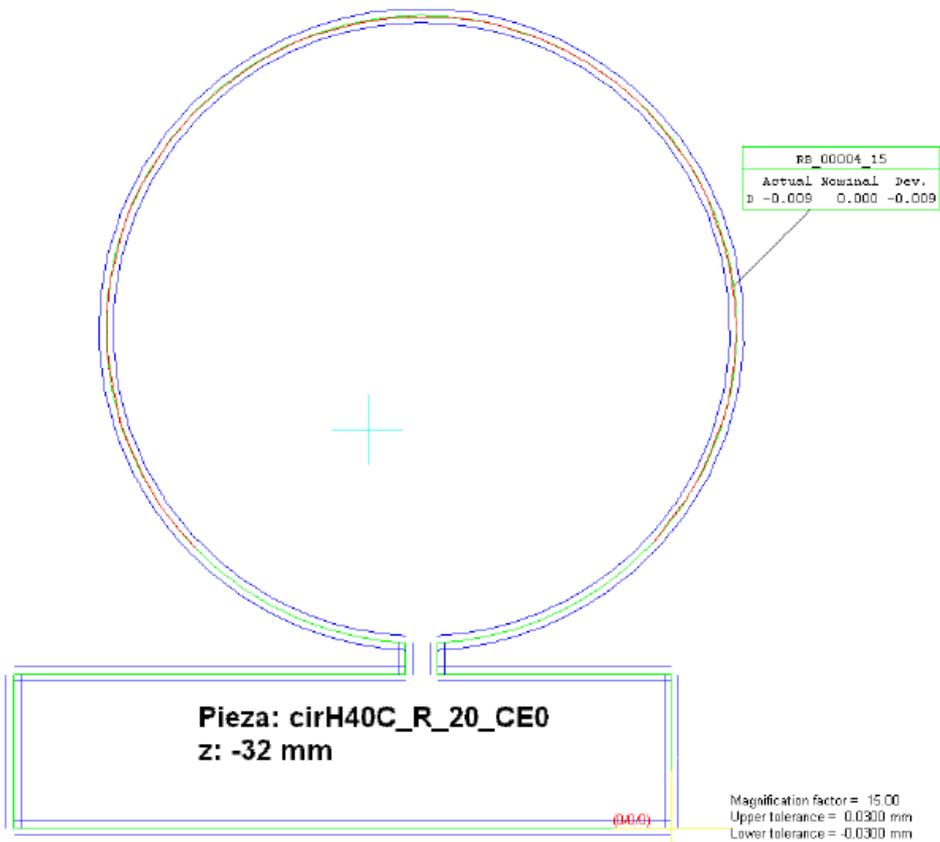
Z-24 mm



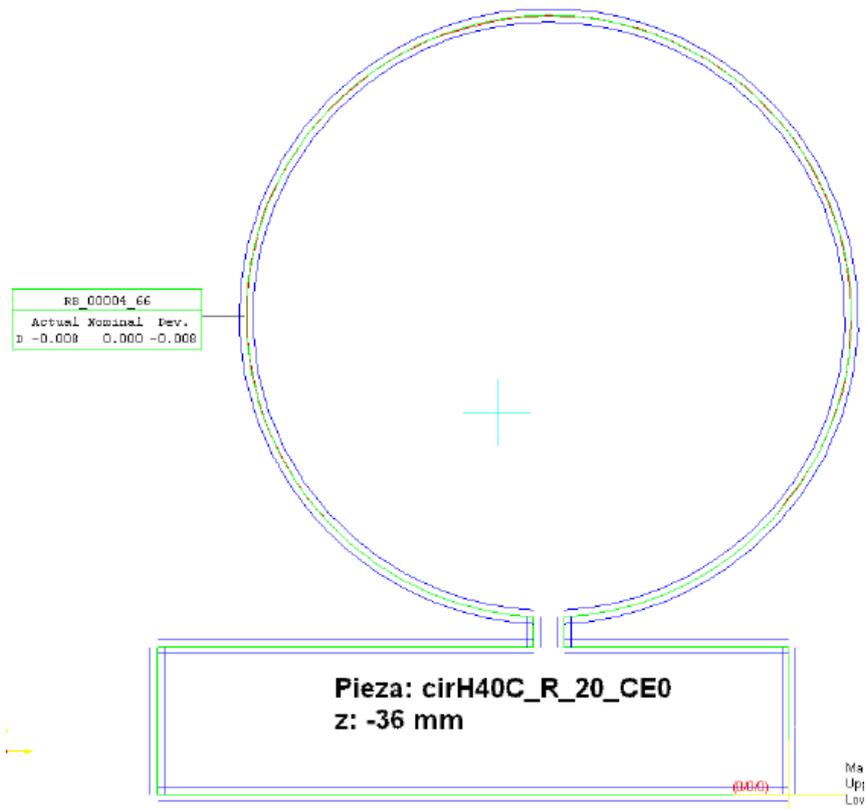
Z-28 mm



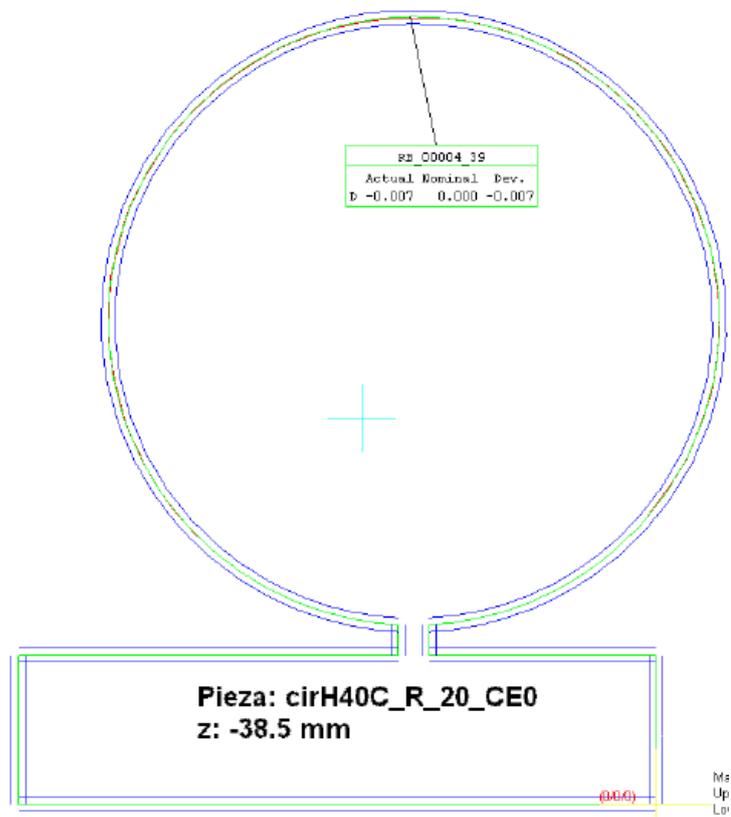
Z-32 mm



Z-36 mm



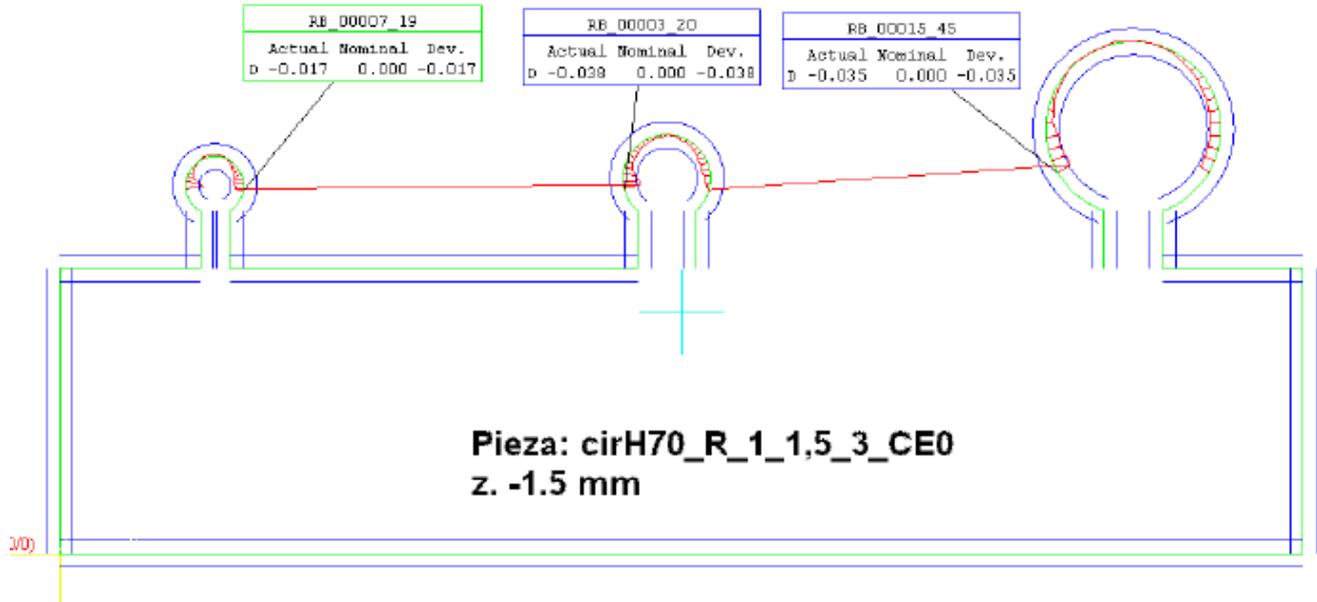
Z-38.5 mm



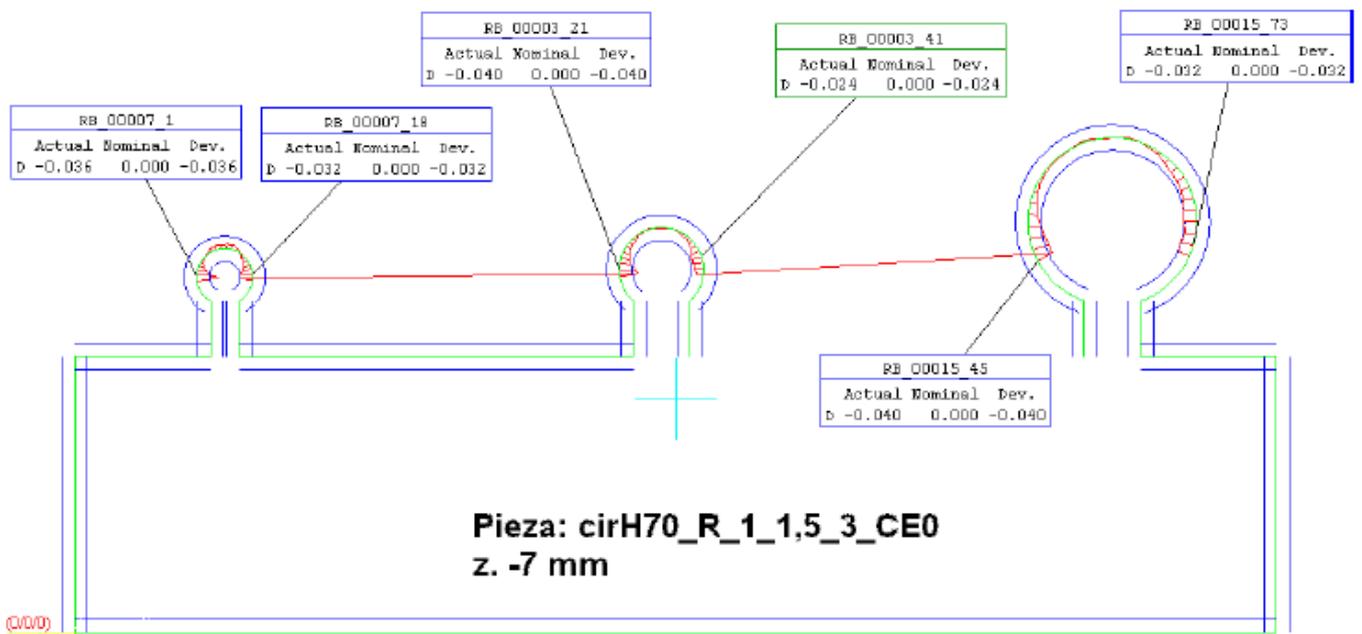
5.2.1.1.2. H70 (Espesor 70 mm)

H70 R 1 1.5 3 (Radios 1, 1.5 y 3 mm)

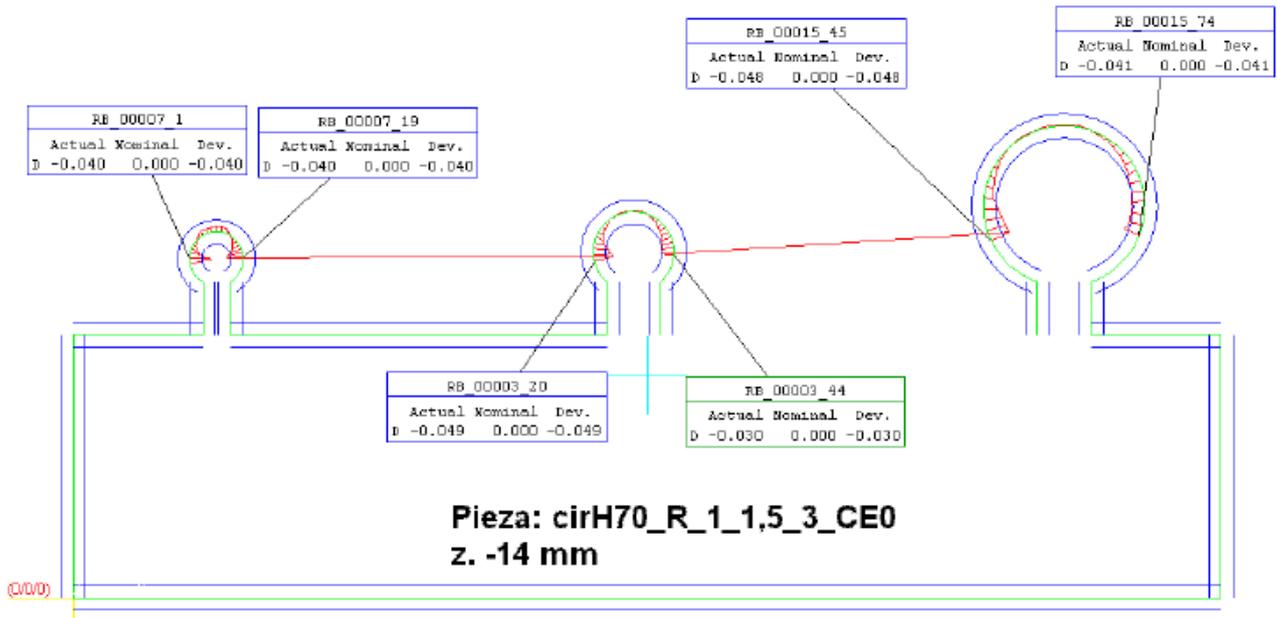
Z-1.5 mm



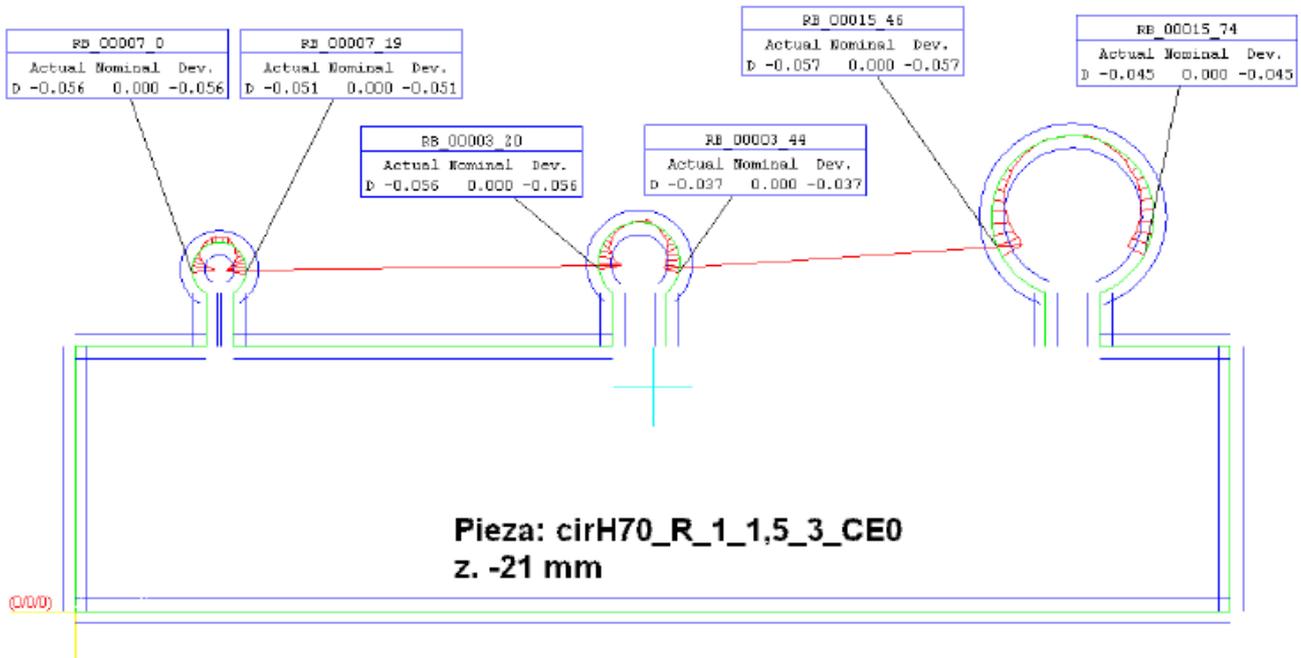
Z-7 mm



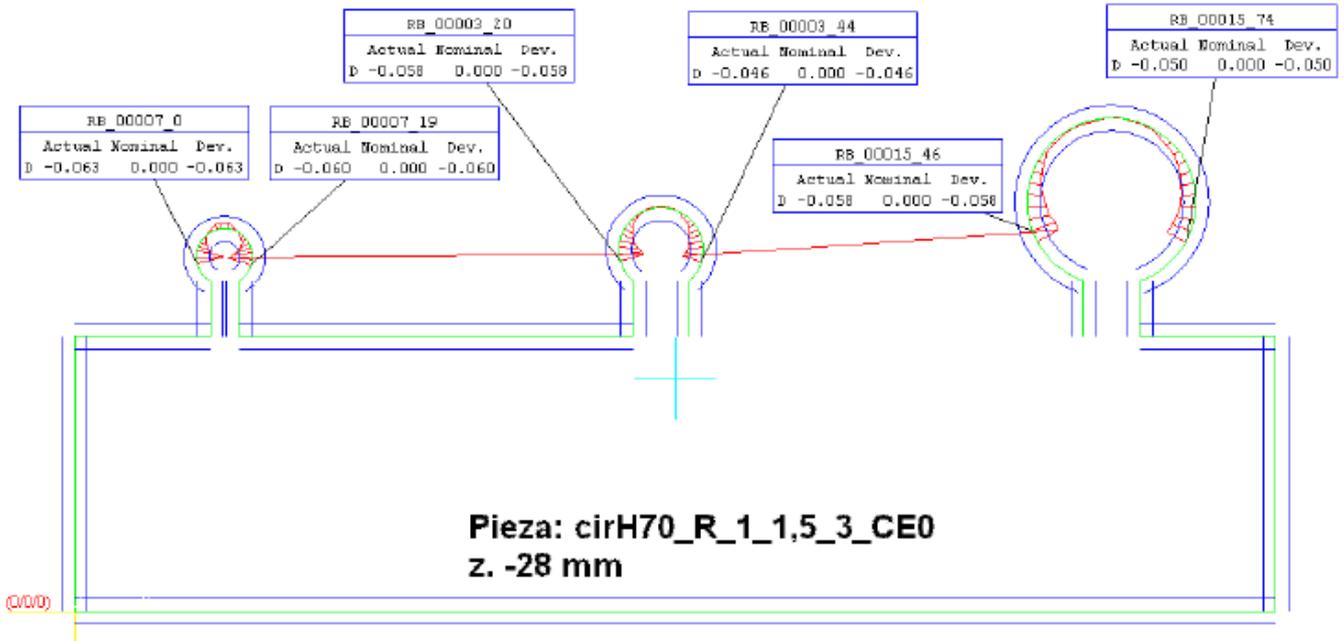
Z-14 mm



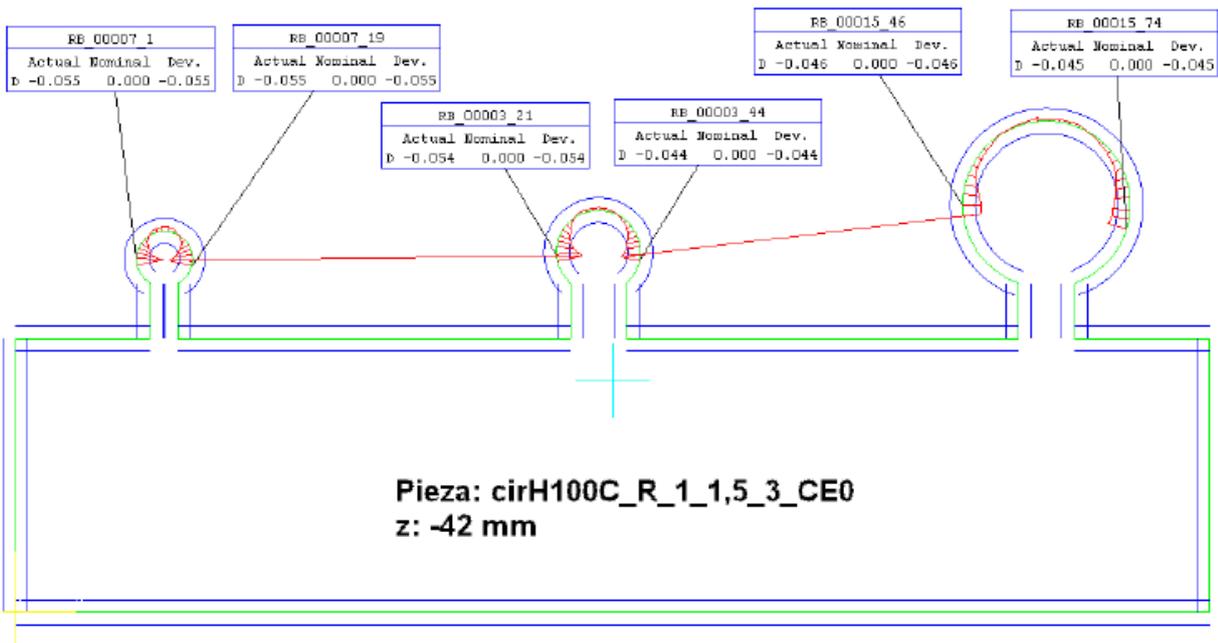
Z-21 mm



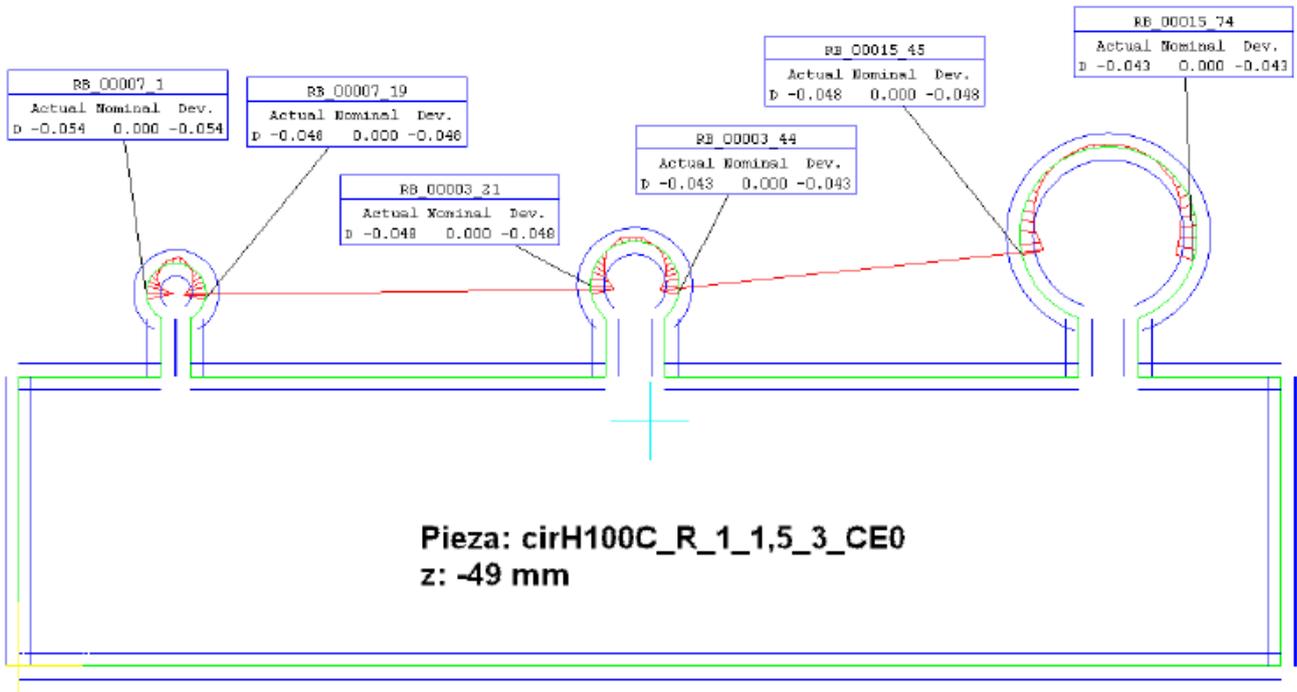
Z-28 mm



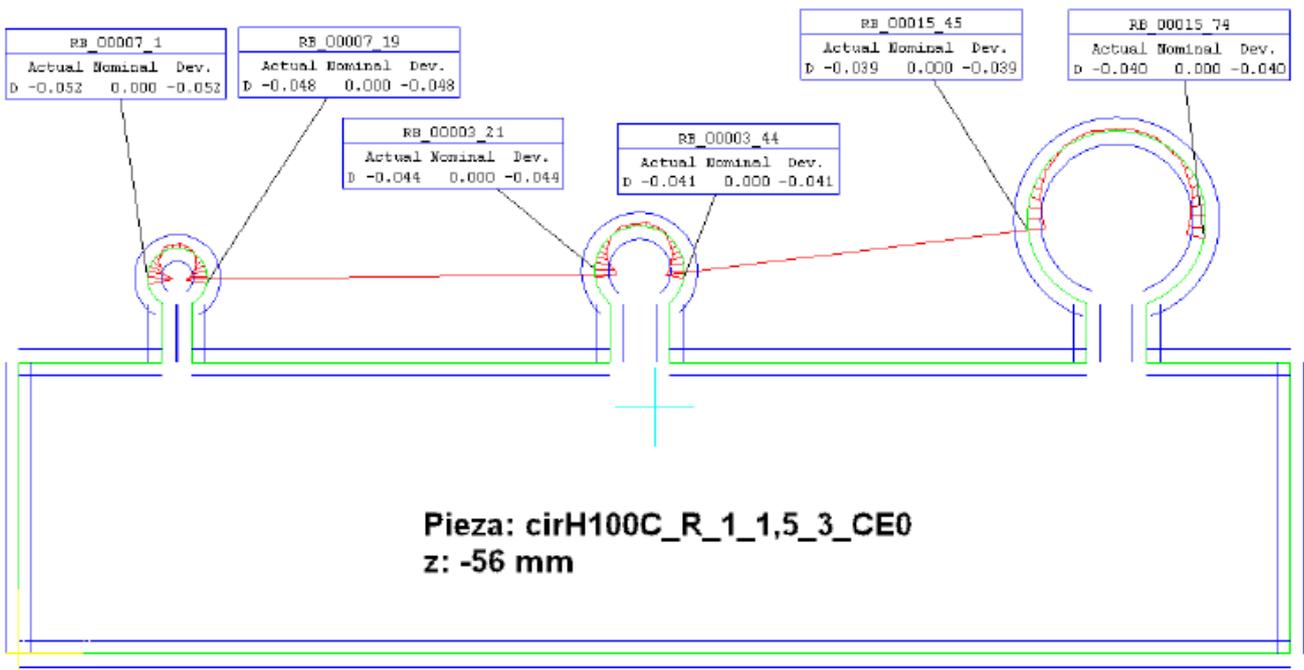
Z-42 mm



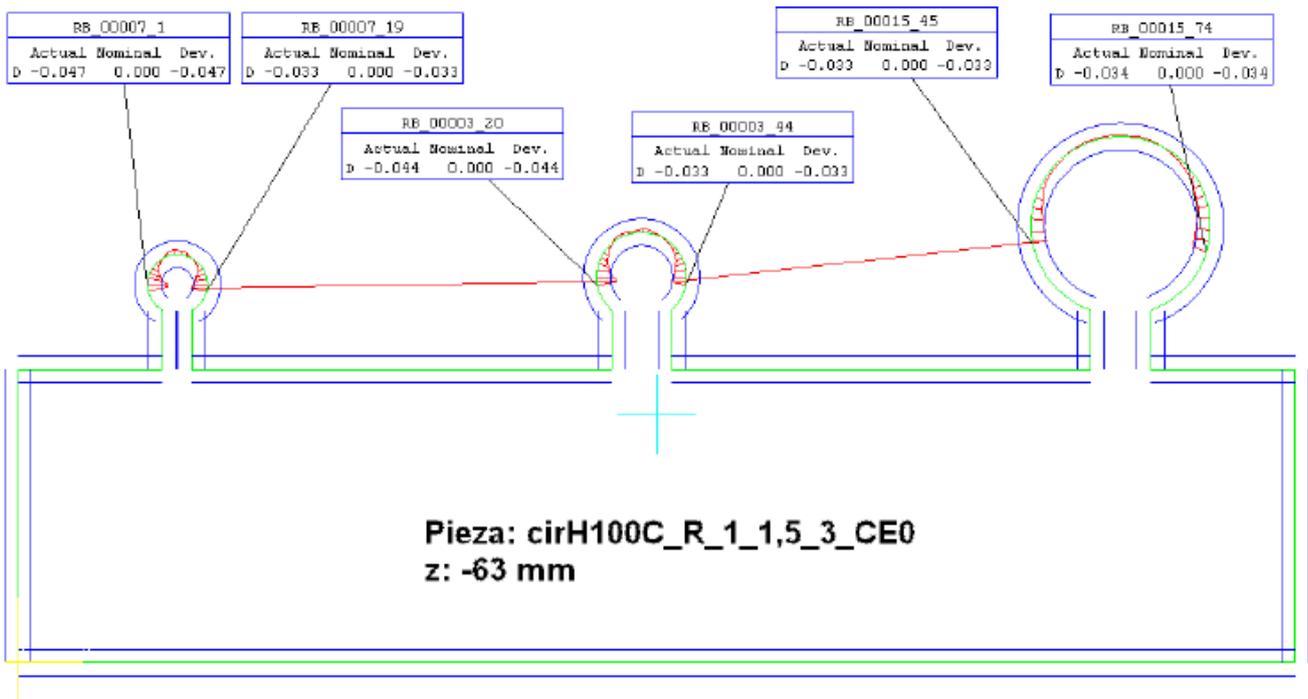
Z-49 mm



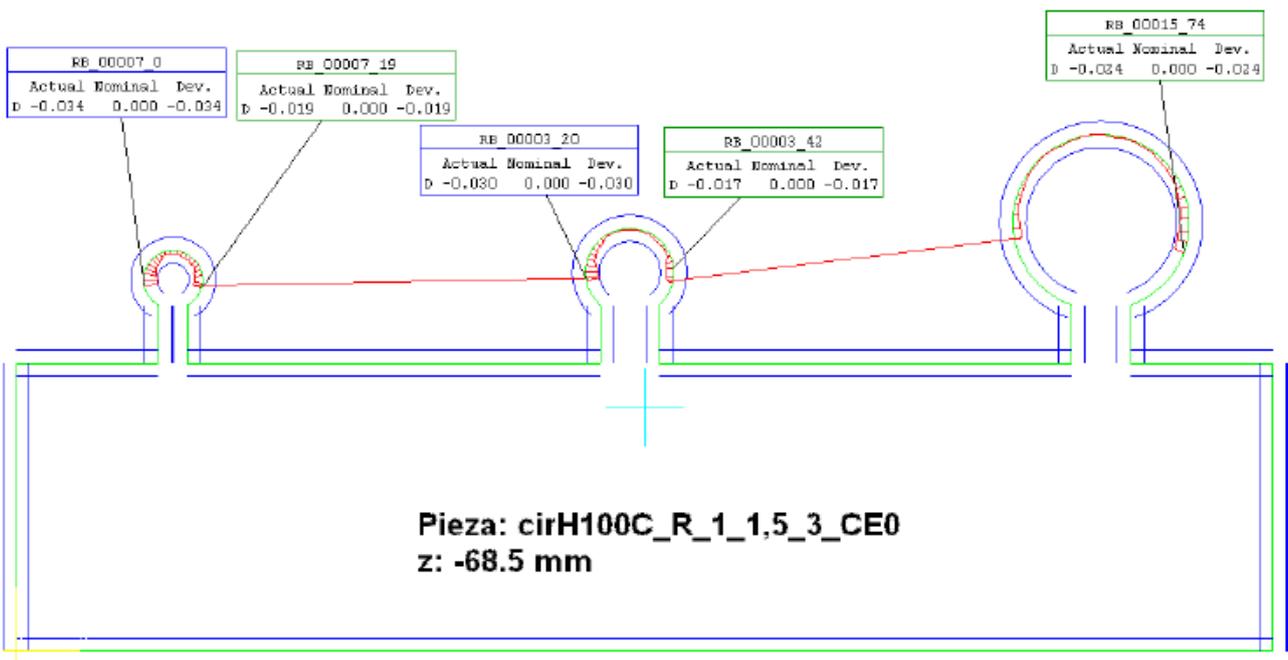
Z-56 mm



Z-63 mm

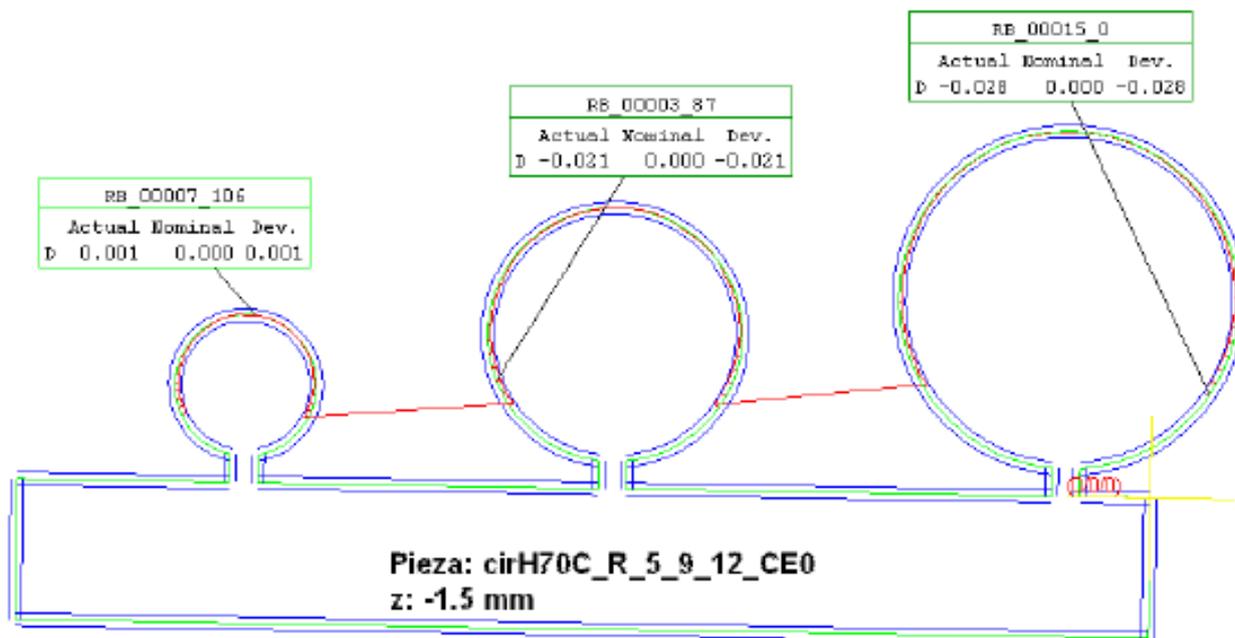


Z-68.5 mm

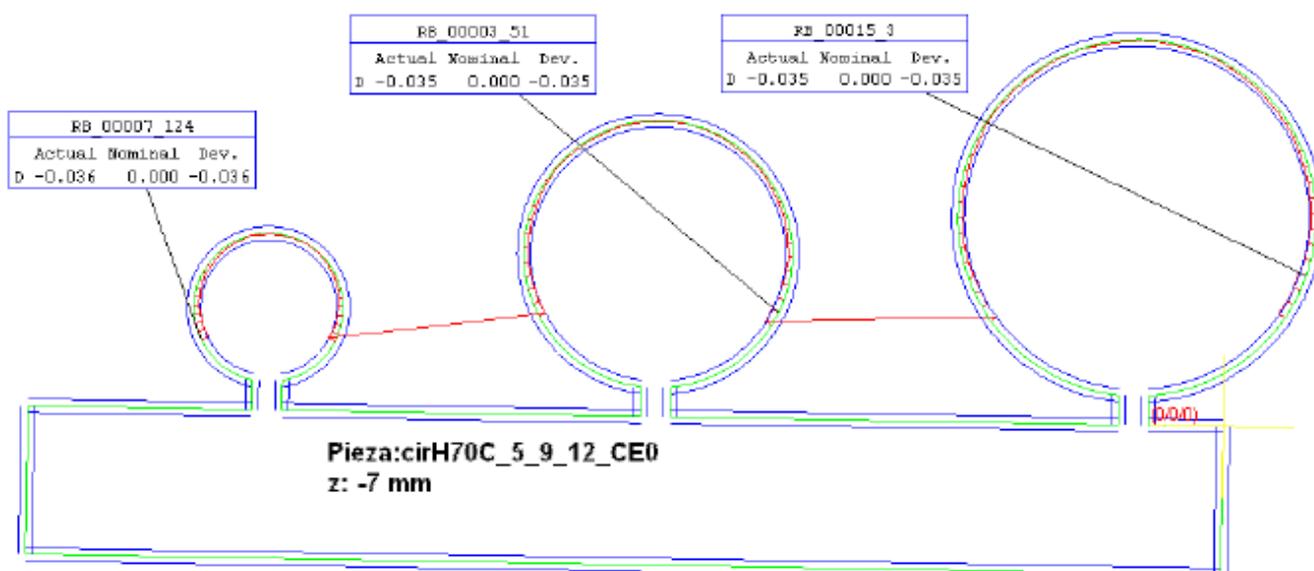


H70 R 5 9 12 (Radios 5, 9 y 12 mm)

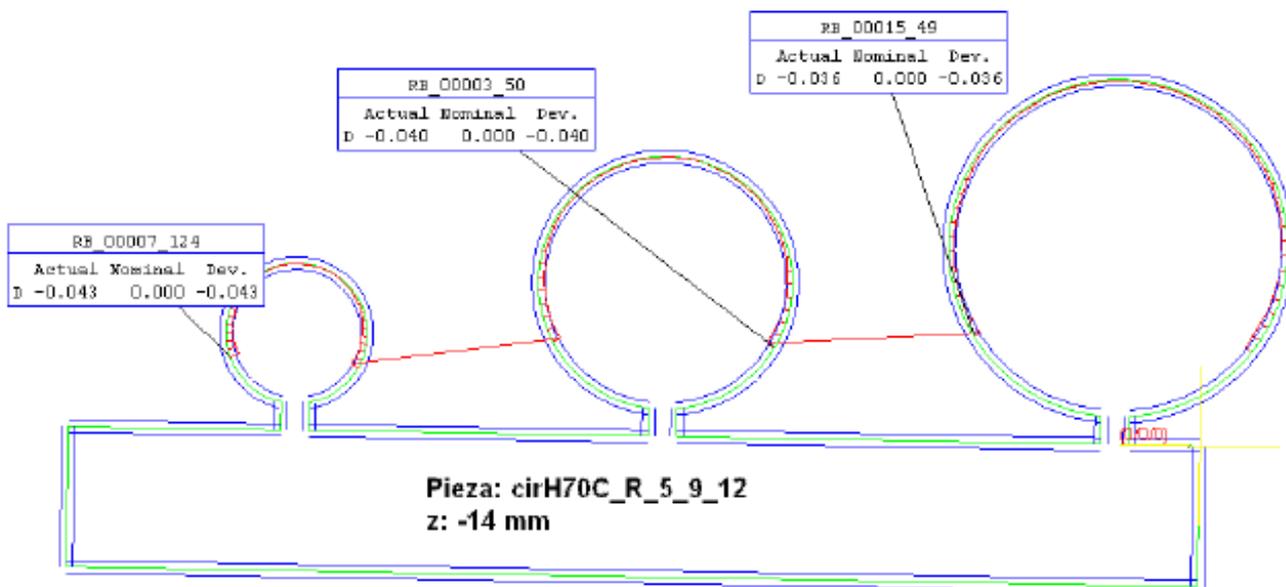
Z-1.5 mm



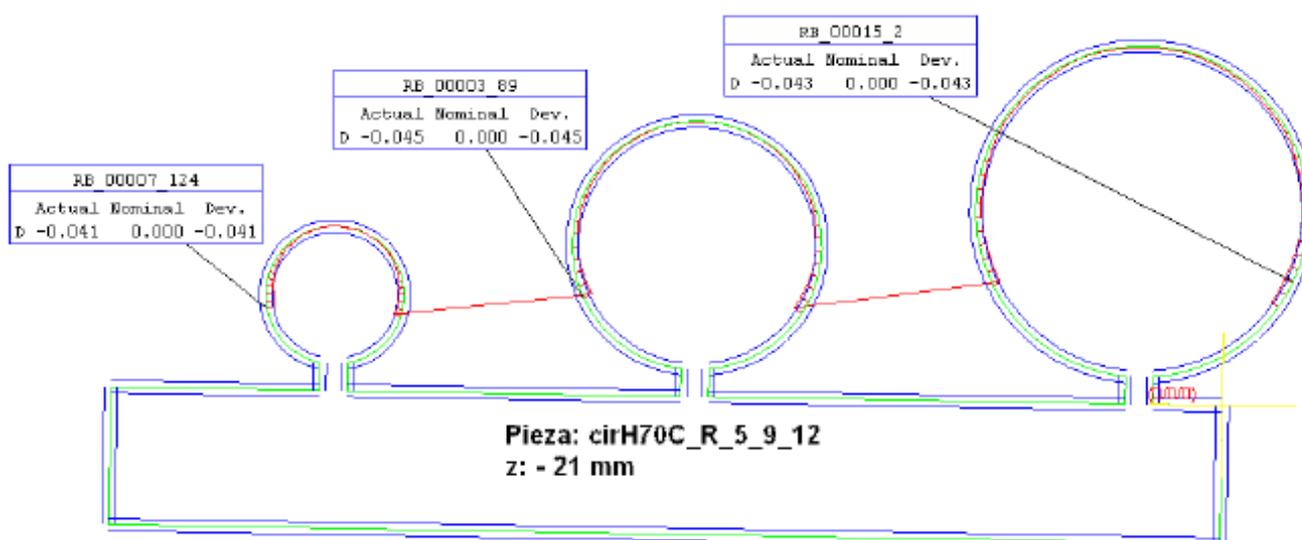
Z-7 mm



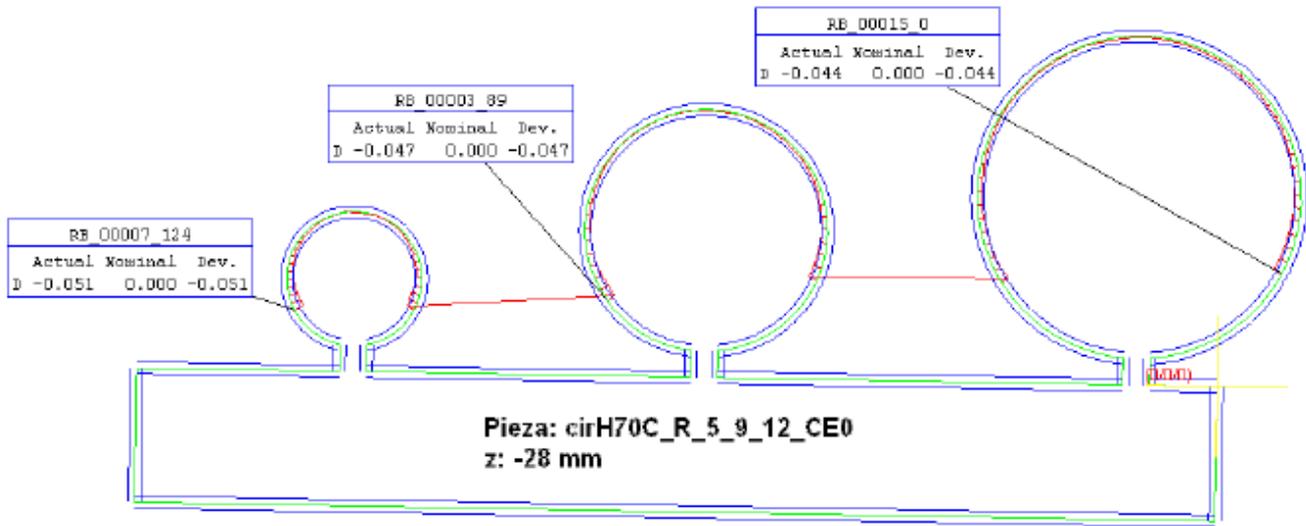
Z-14 mm



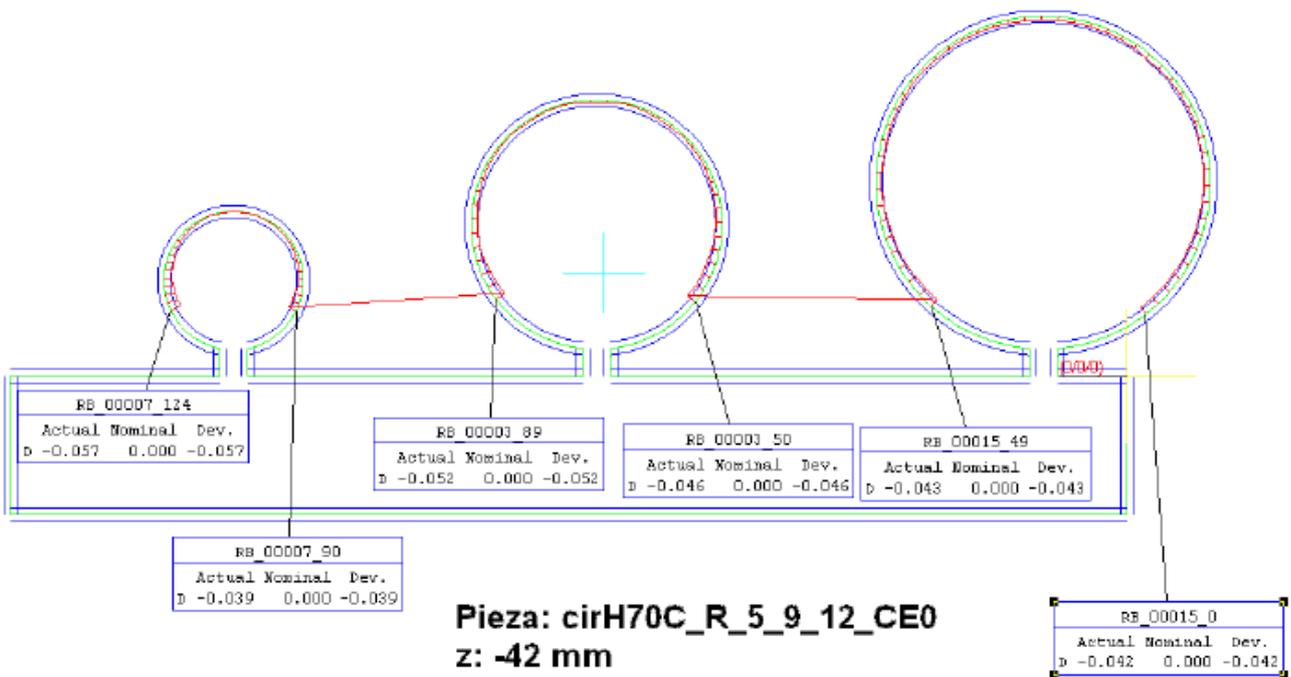
Z-21 mm



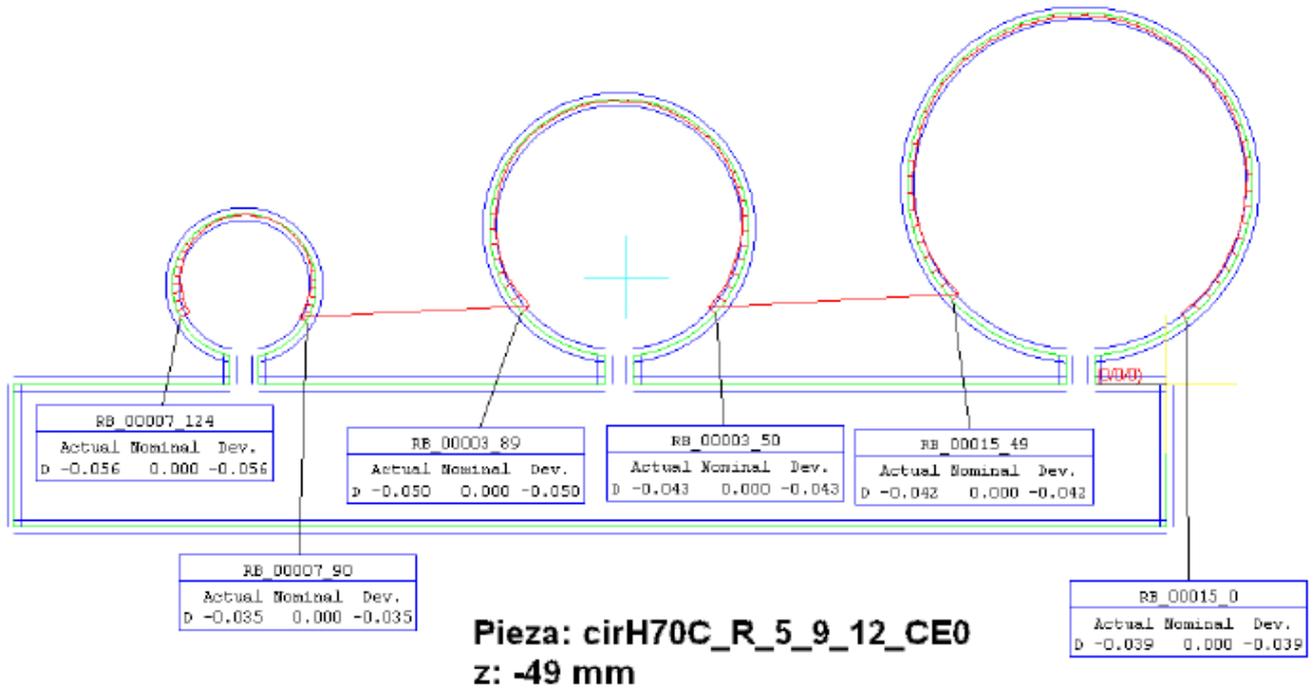
Z-28 mm



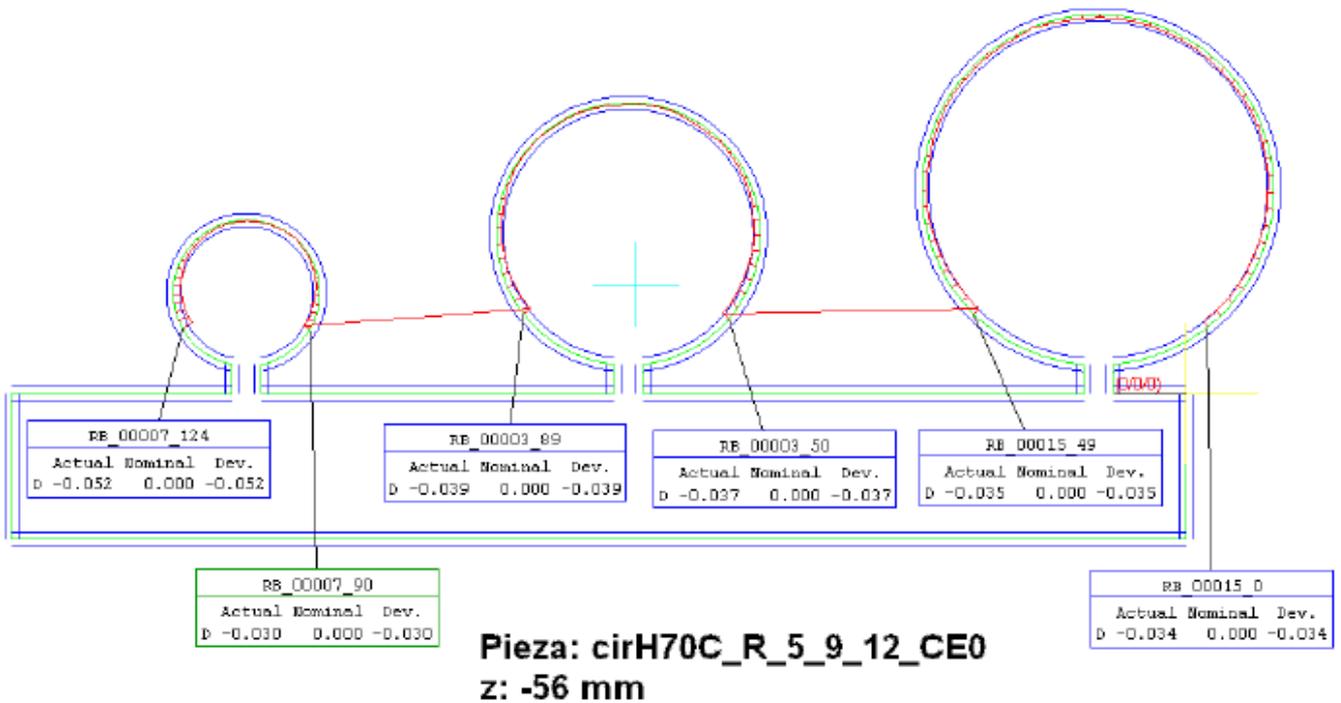
Z-42 mm



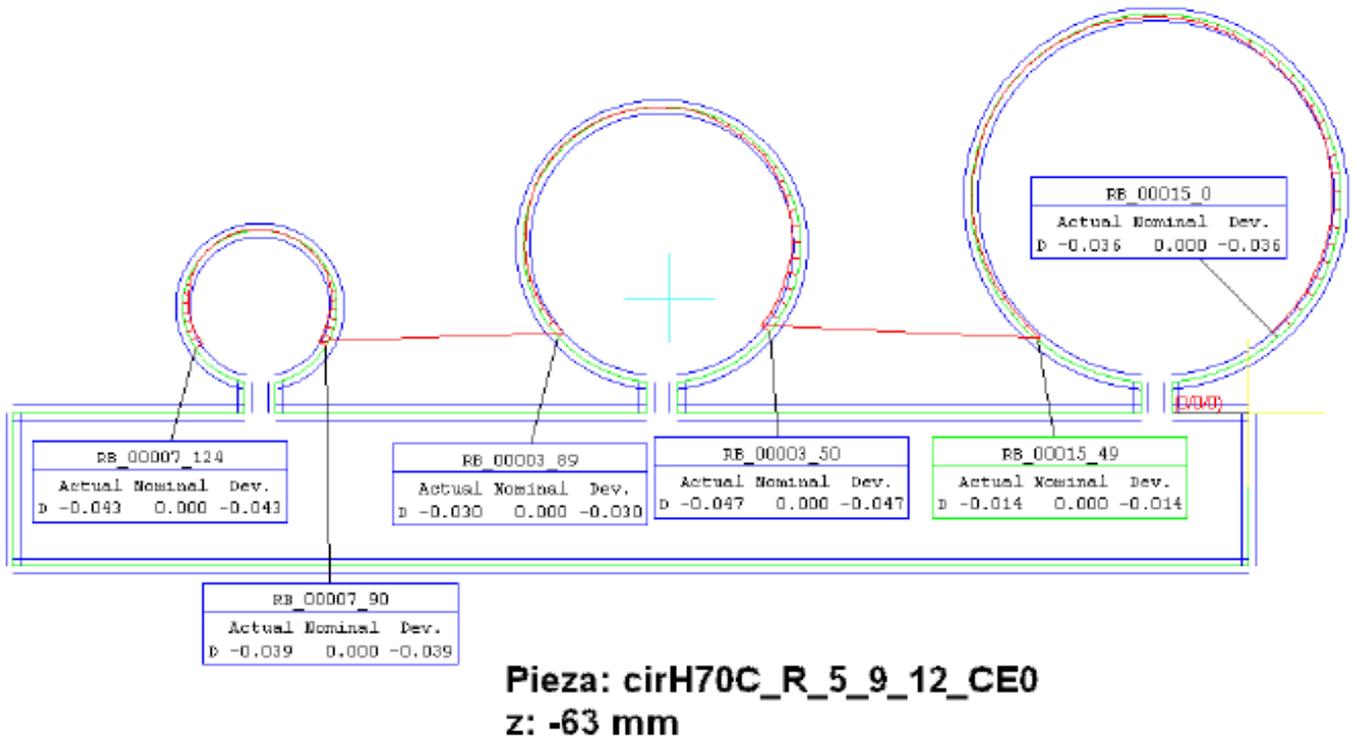
Z-49 mm



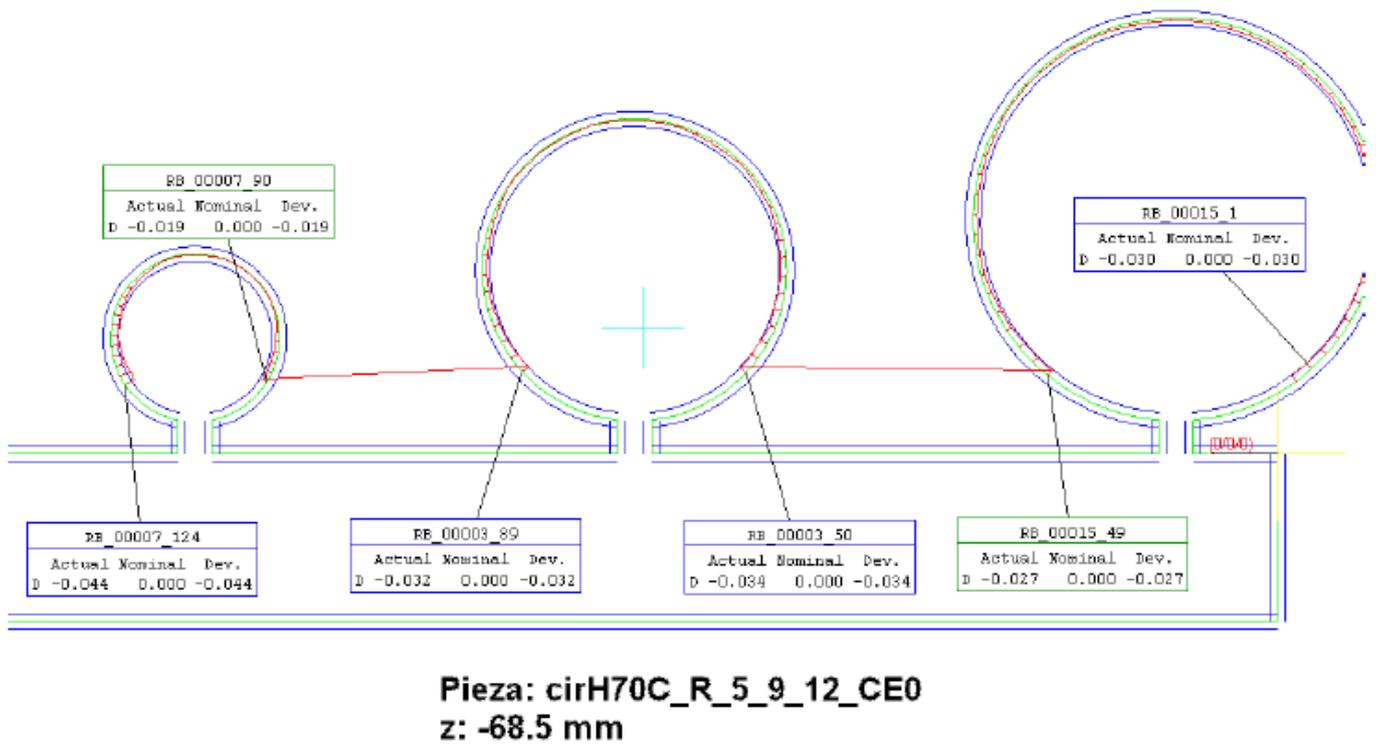
Z-56 mm



Z-63 mm

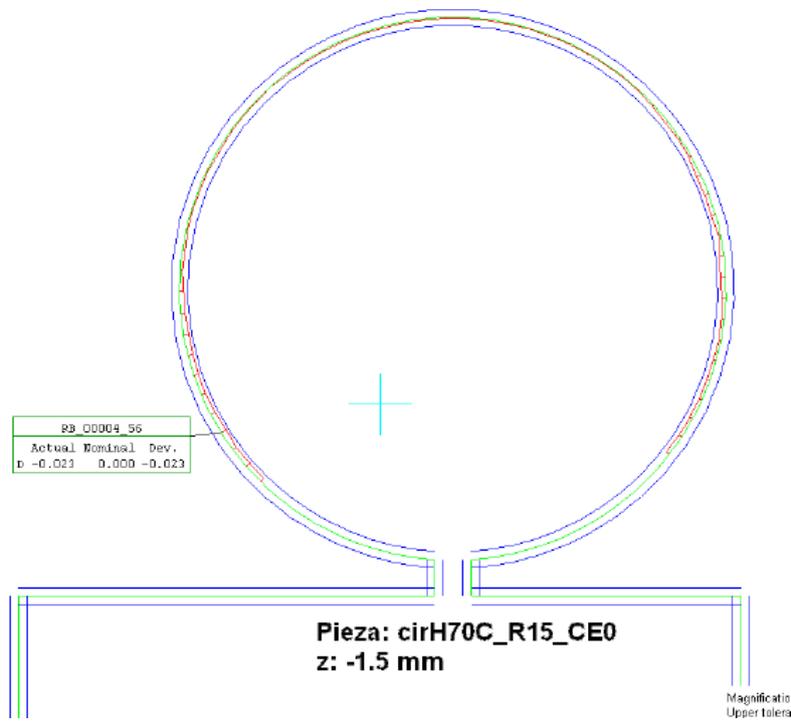


Z-68.5 mm

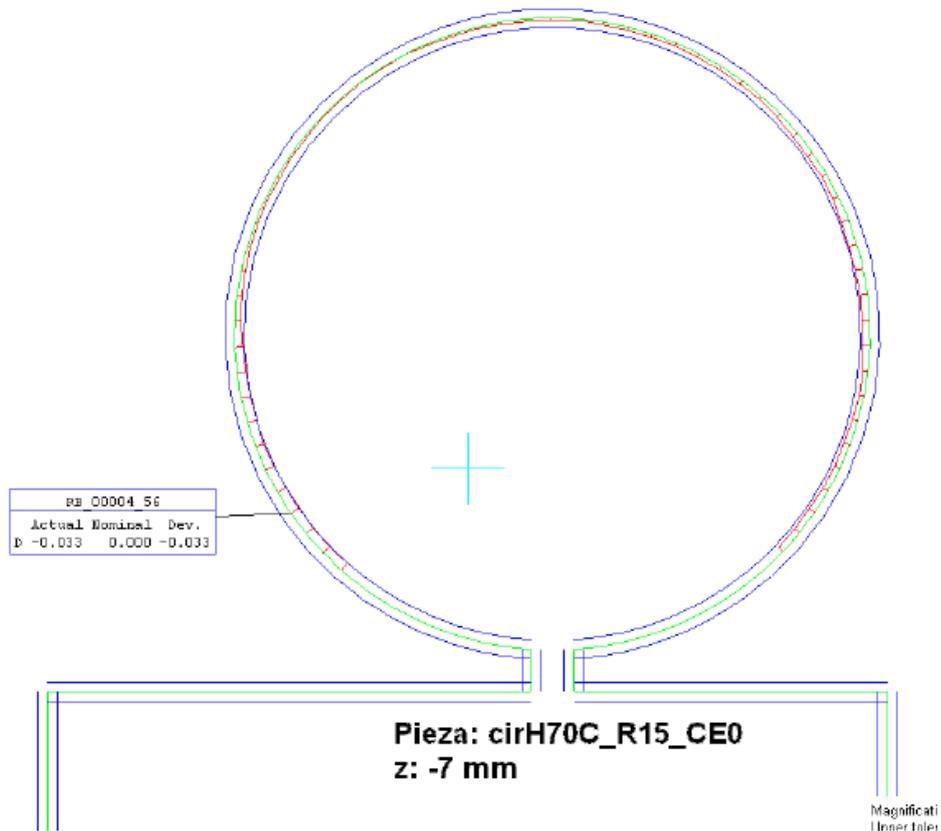


H70 R 15 (Radio 15 mm)

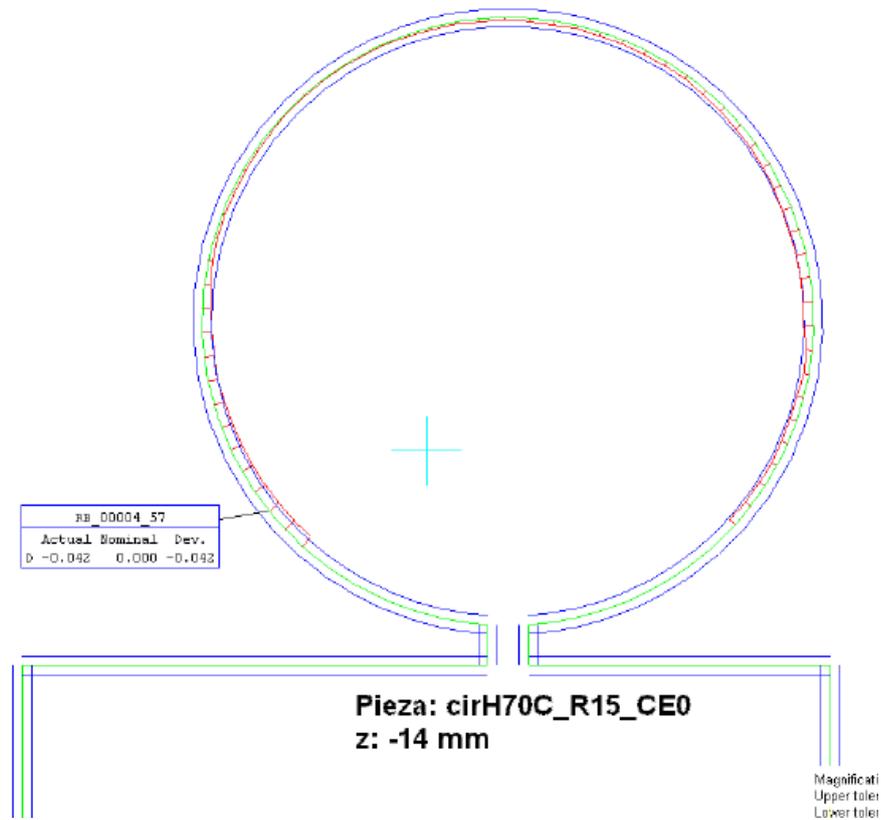
Z-1.5 mm



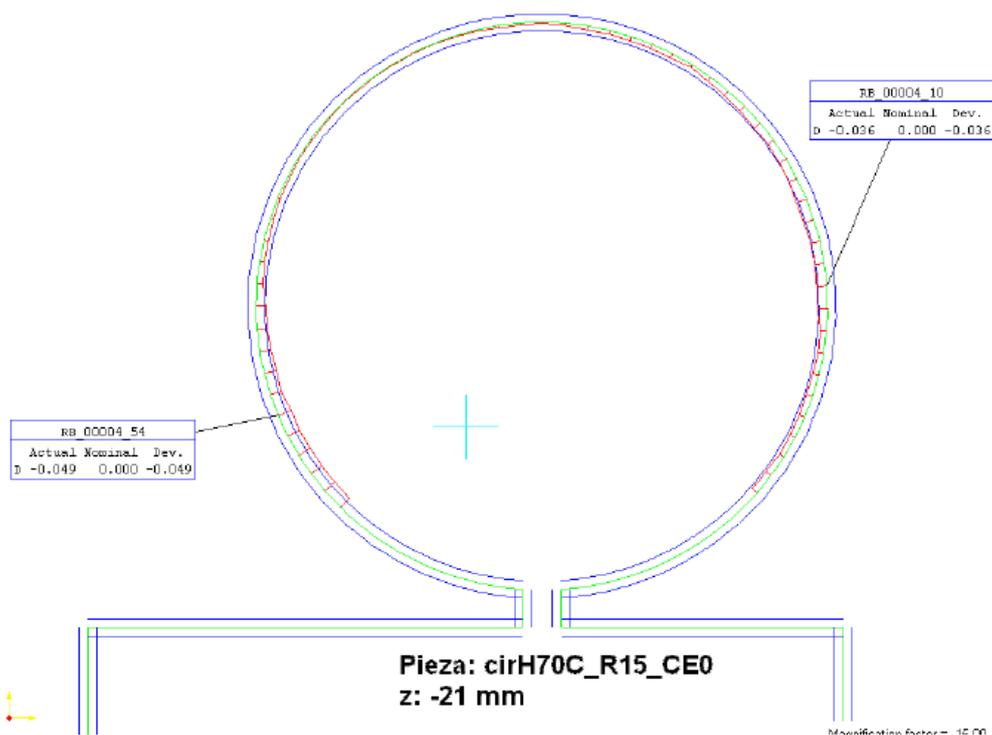
Z-7 mm



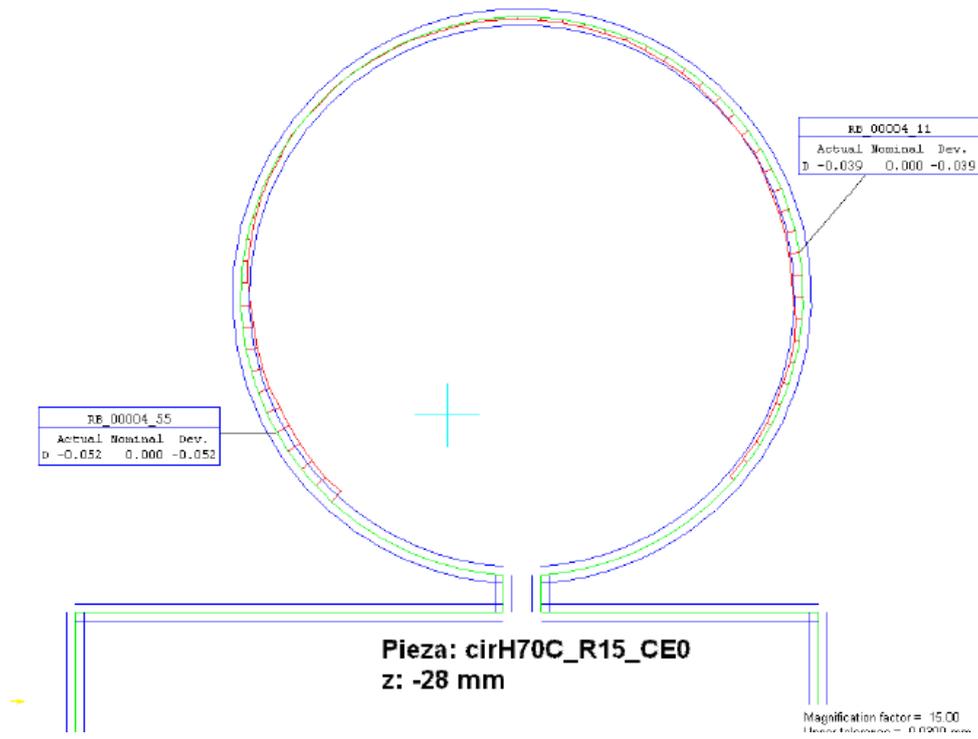
Z-14 mm



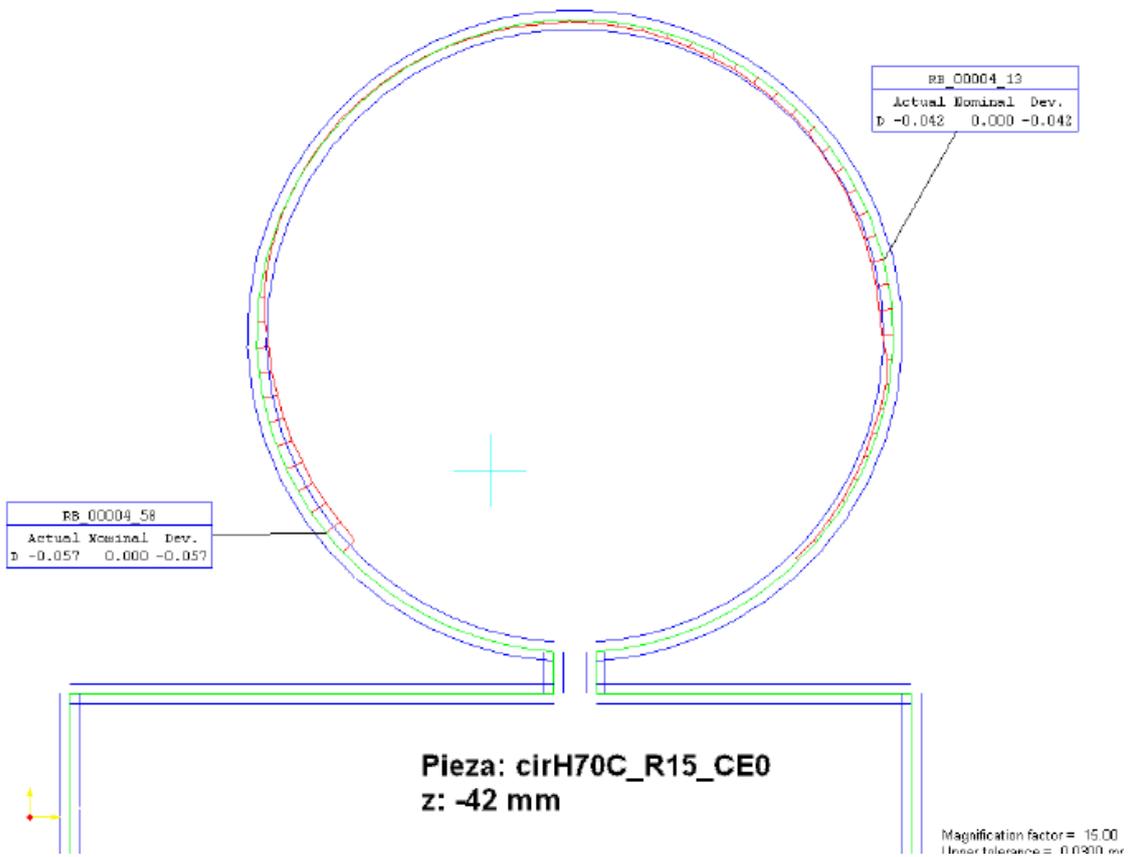
Z-21 mm



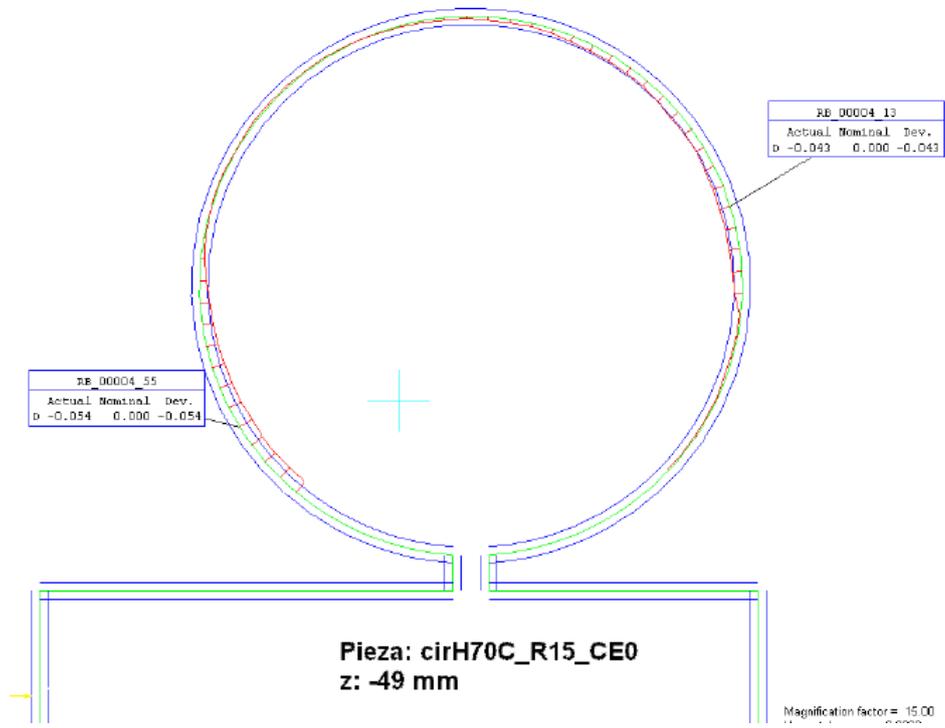
Z-28 mm



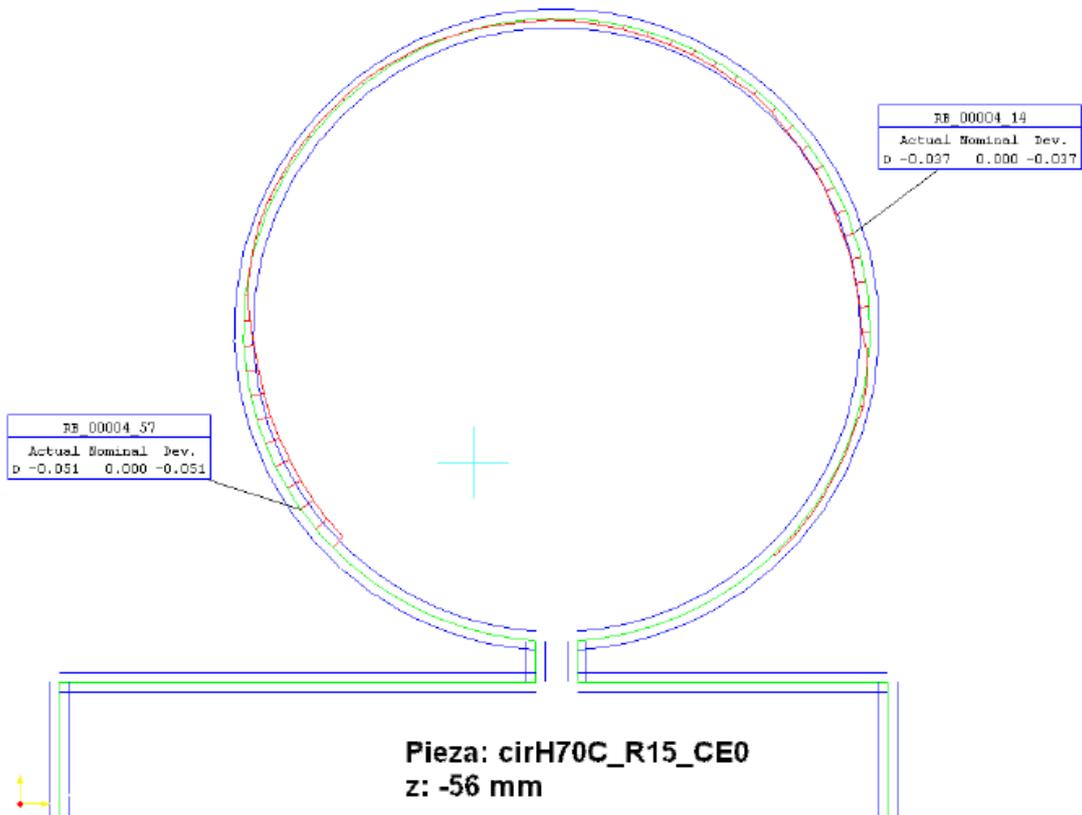
Z-42 mm



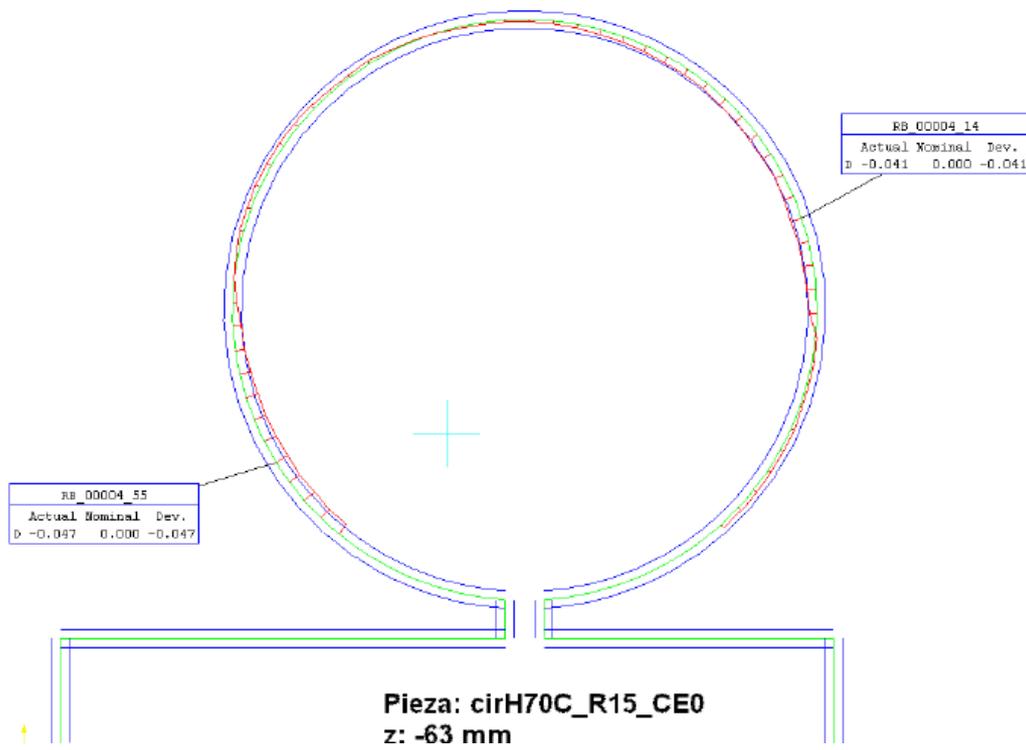
Z-49 mm



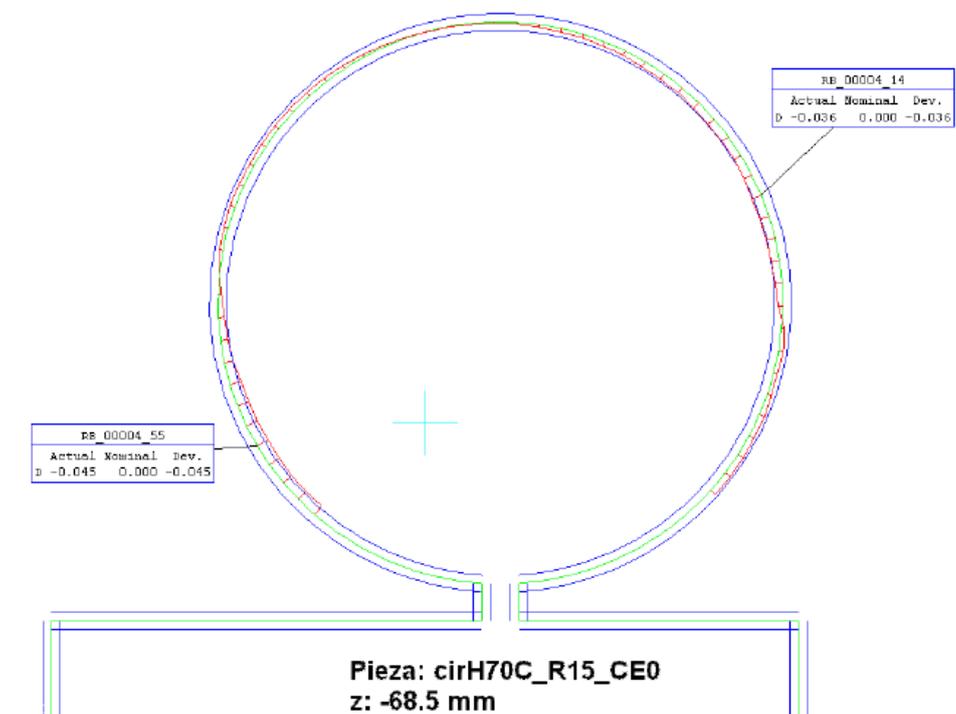
Z-56 mm



Z-63 mm

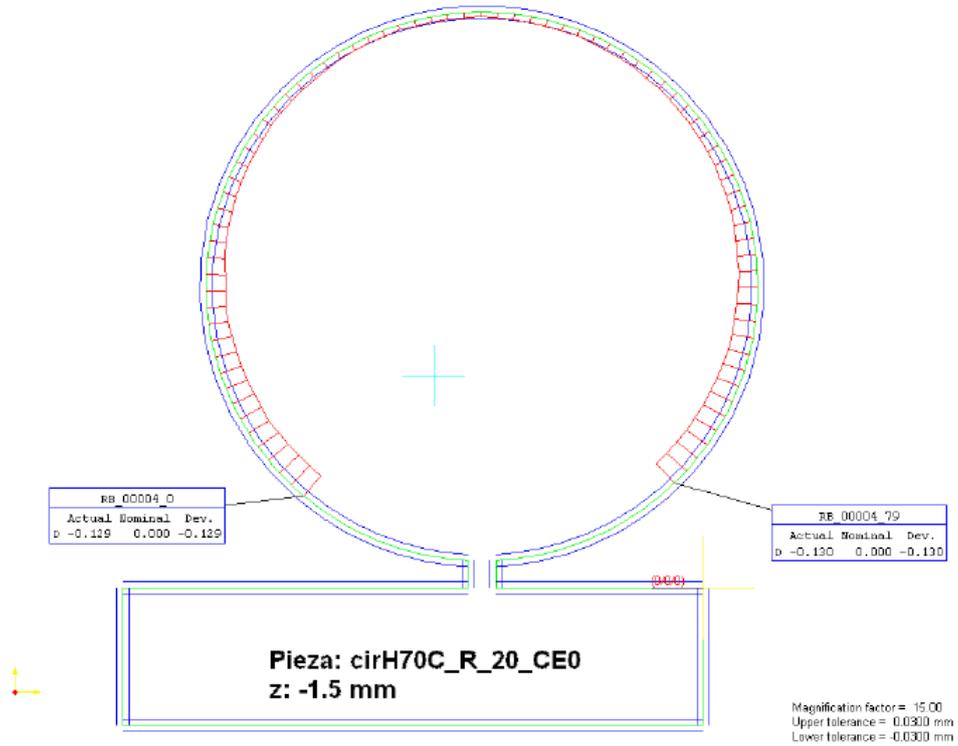


Z-68.5 mm

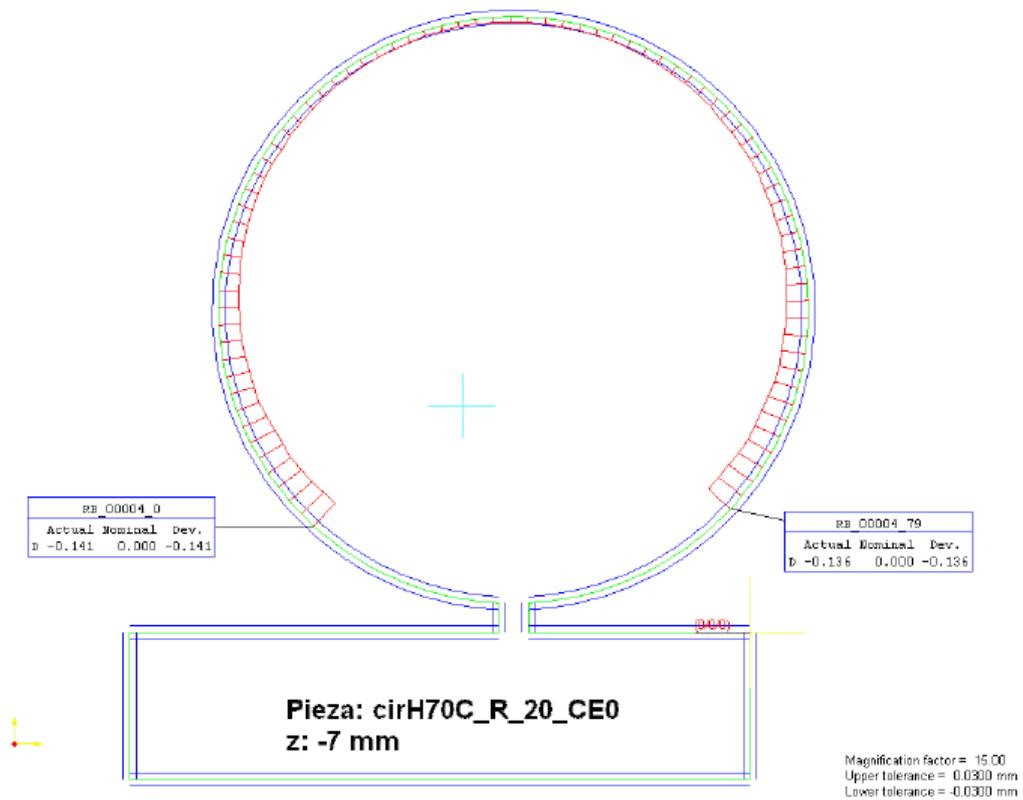


H70 R 20 (Radio 20 mm)

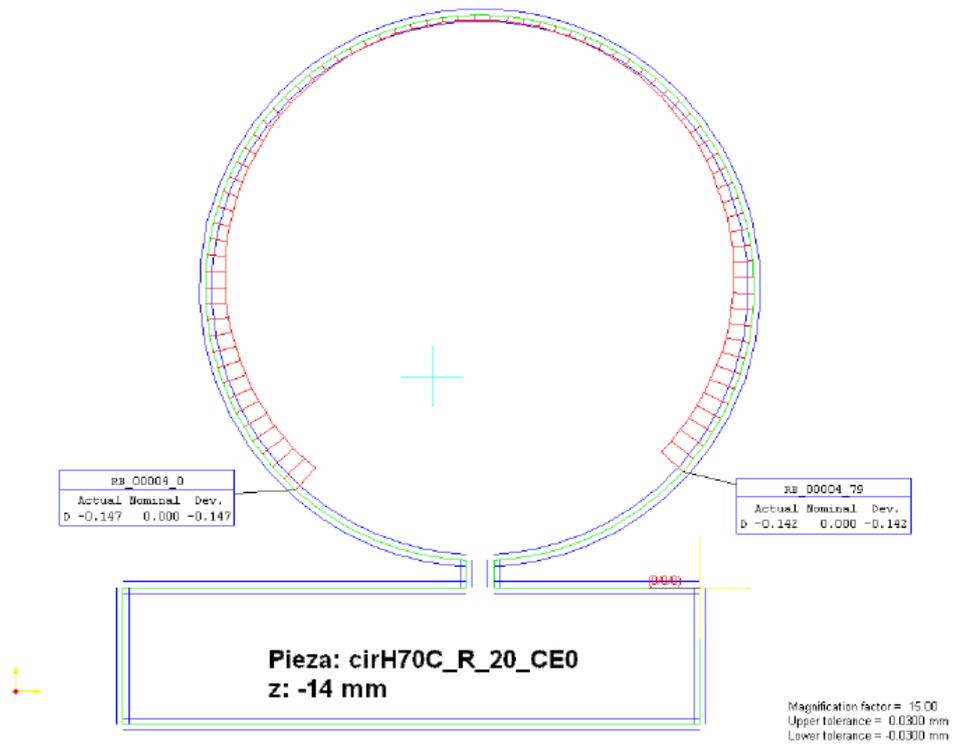
Z-1.5 mm



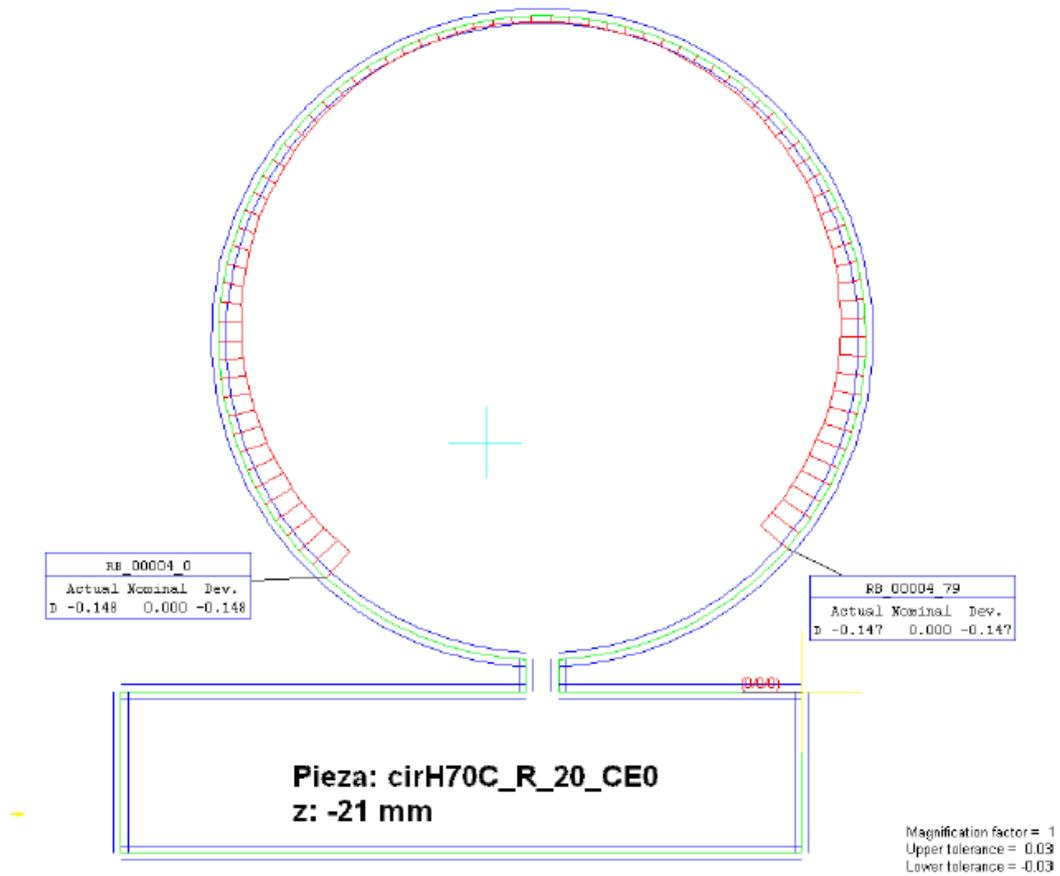
Z-7 mm



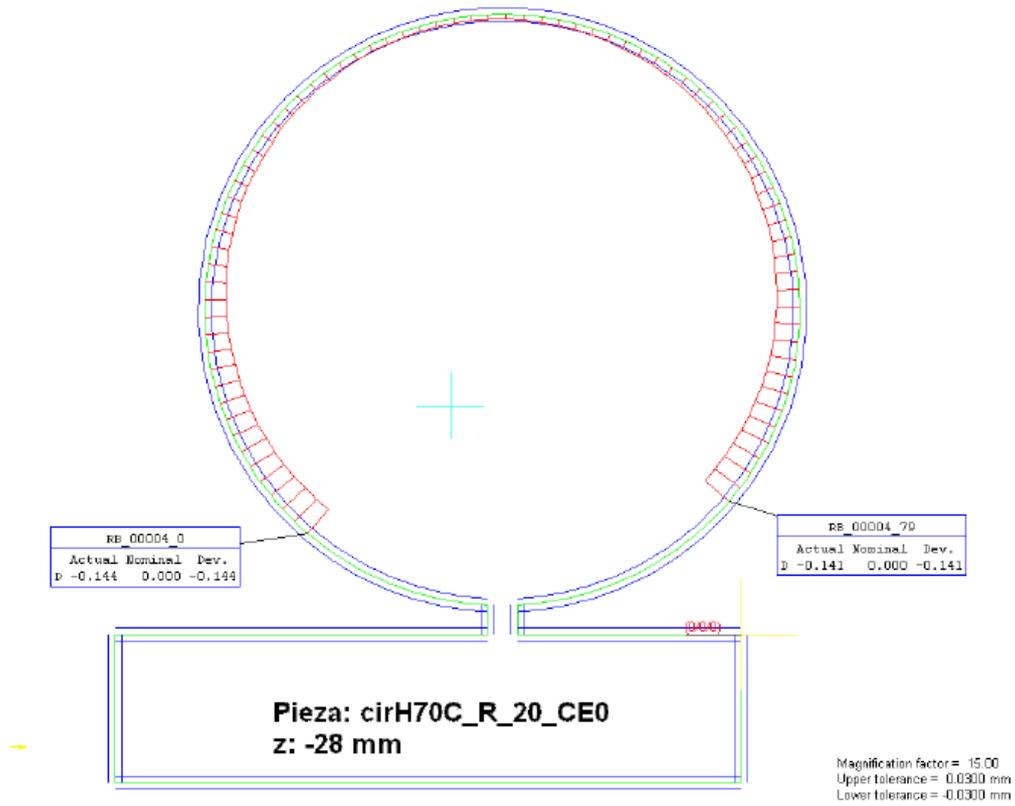
Z-14 mm



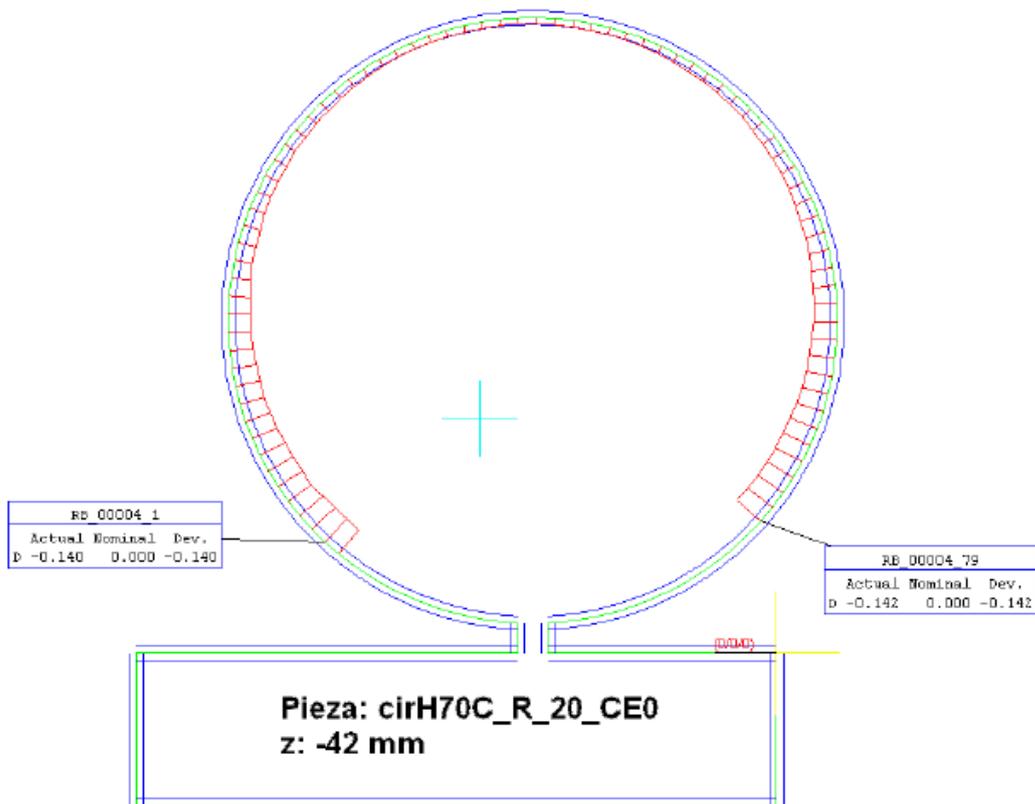
Z-21 mm



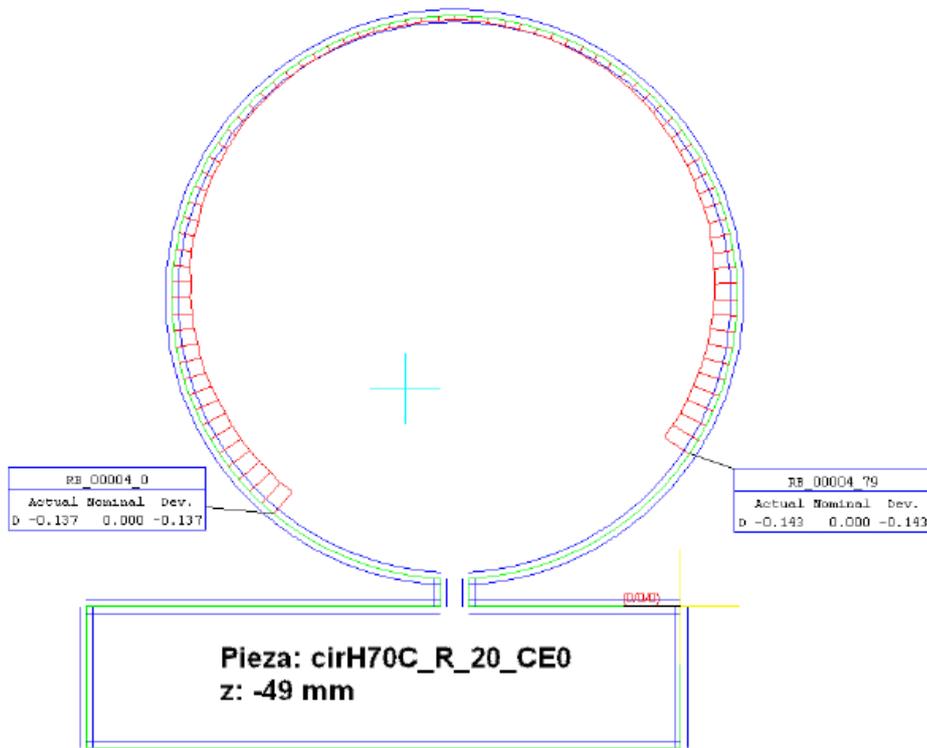
Z-28 mm



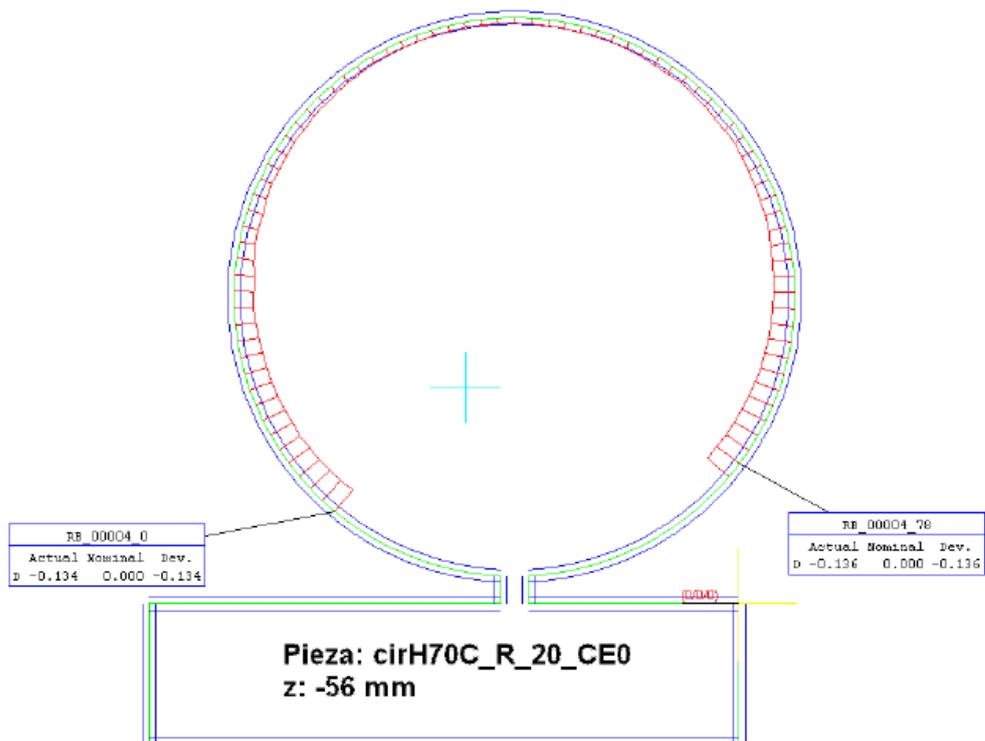
Z-42 mm



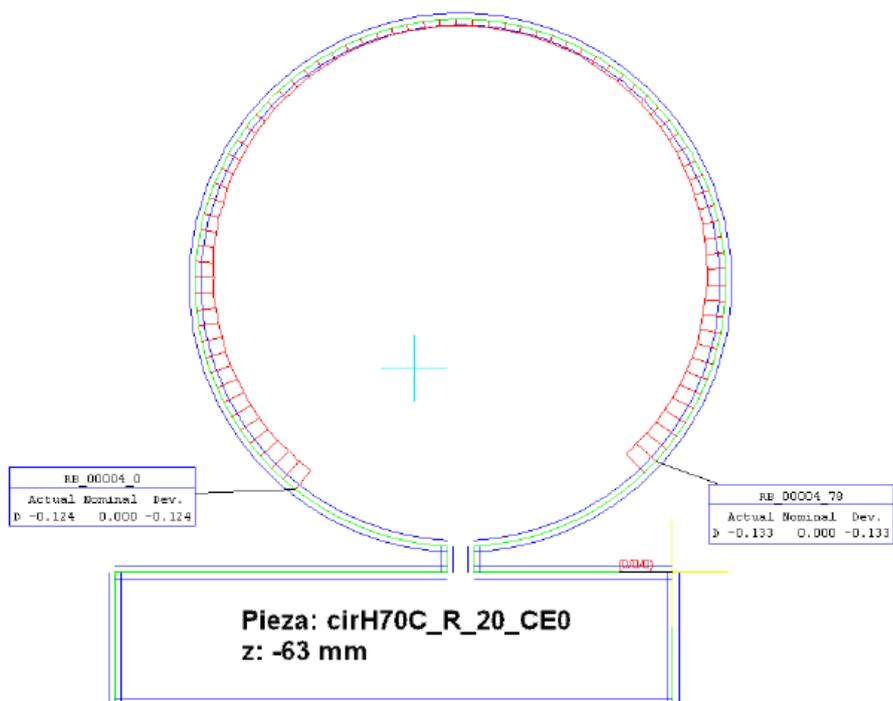
Z-49 mm



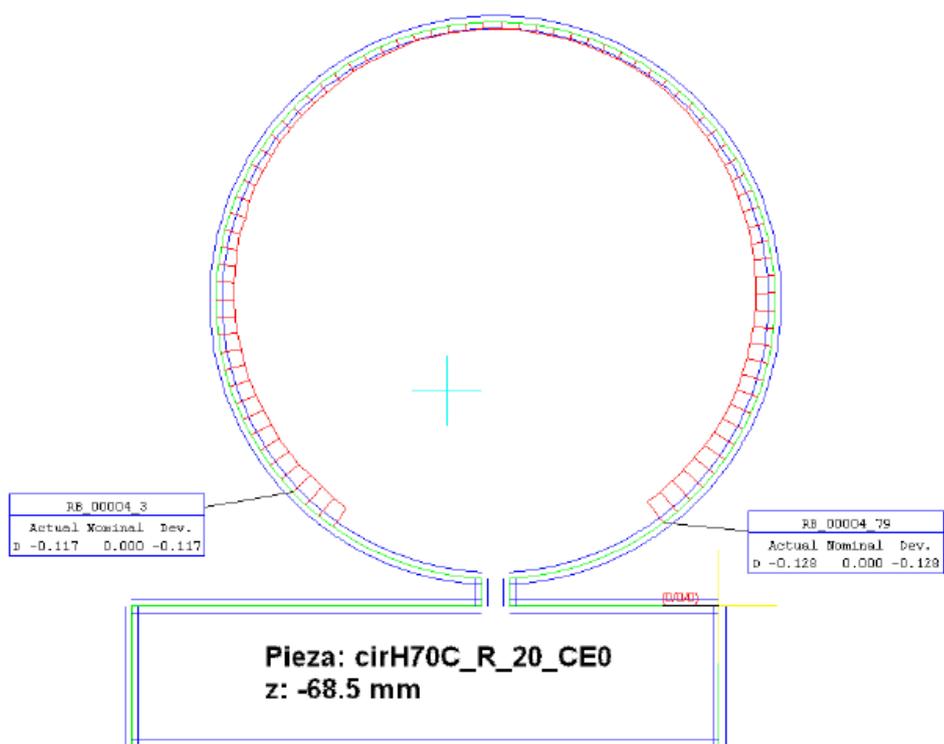
Z-56 mm



Z-63 mm



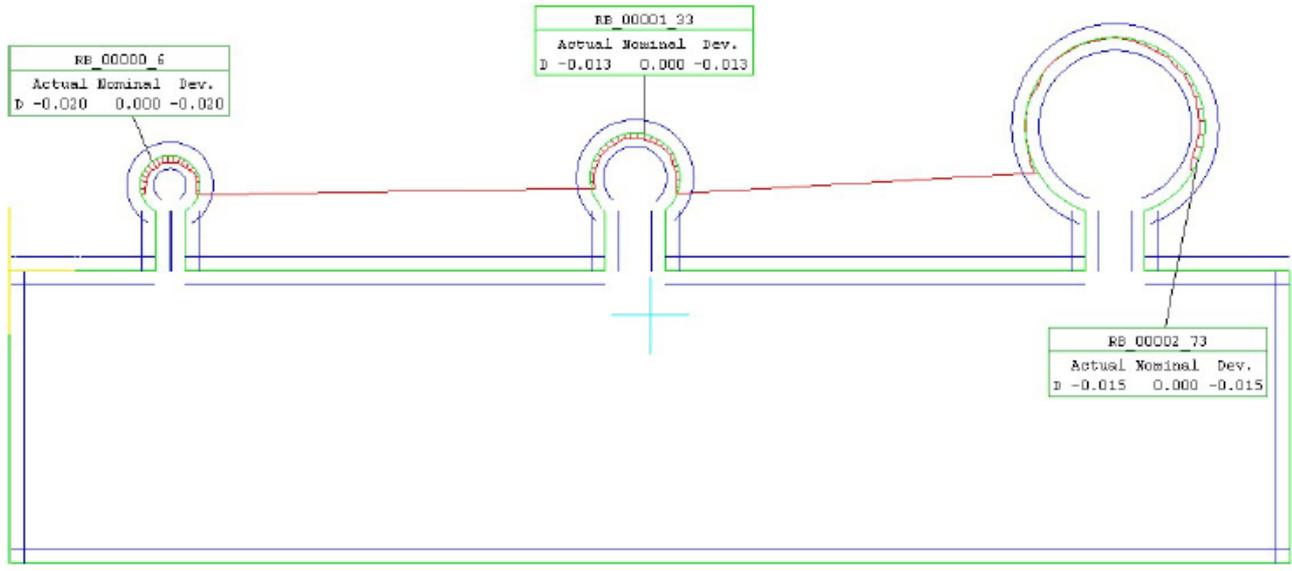
Z-68.5 mm



5.2.1.1.3. H100 (Espesor 100 mm)

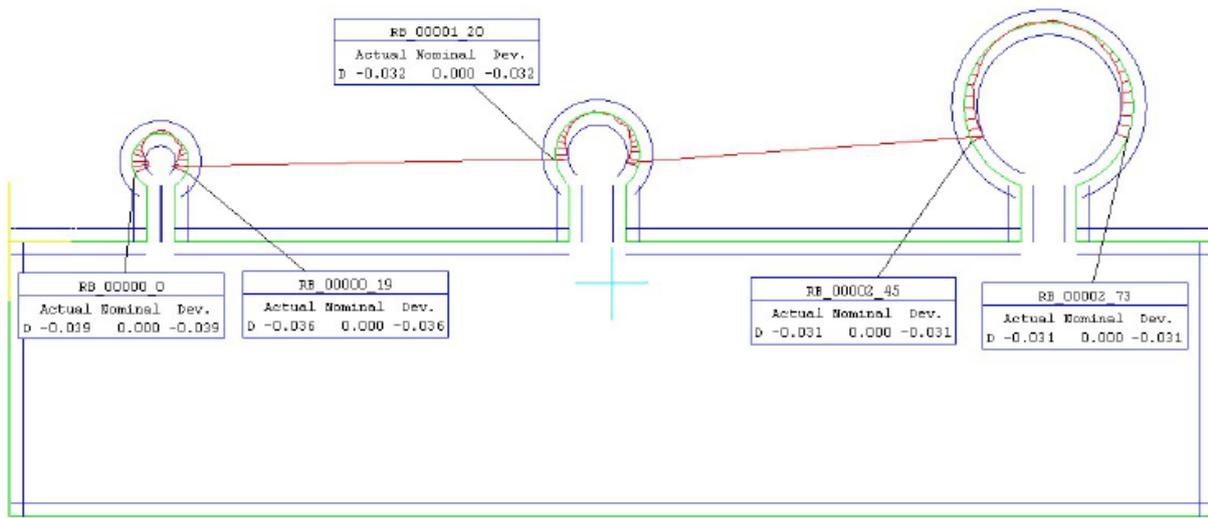
H100 R 1 1.5 3 (Radios 1, 1.5 y 3 mm)

Z-1.5 mm



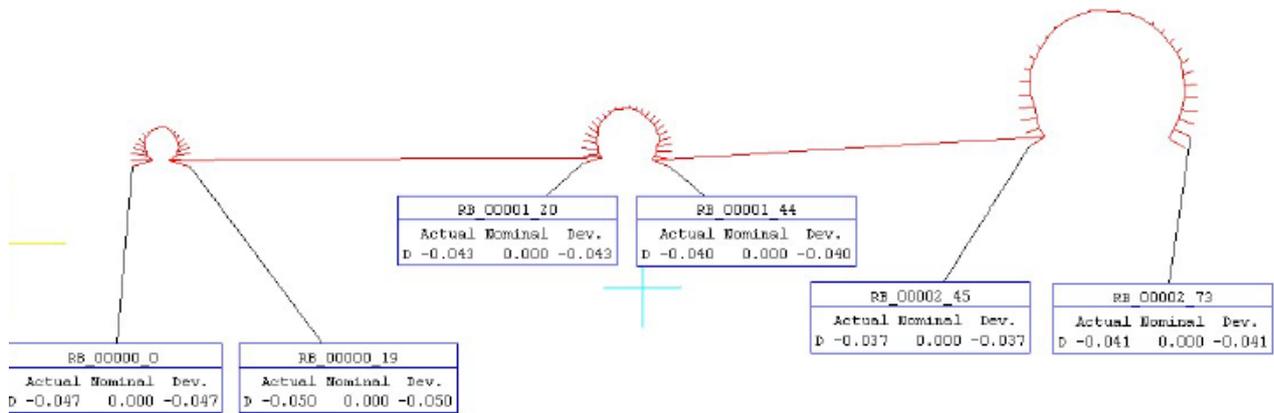
Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -1.5 mm

Z-10 mm



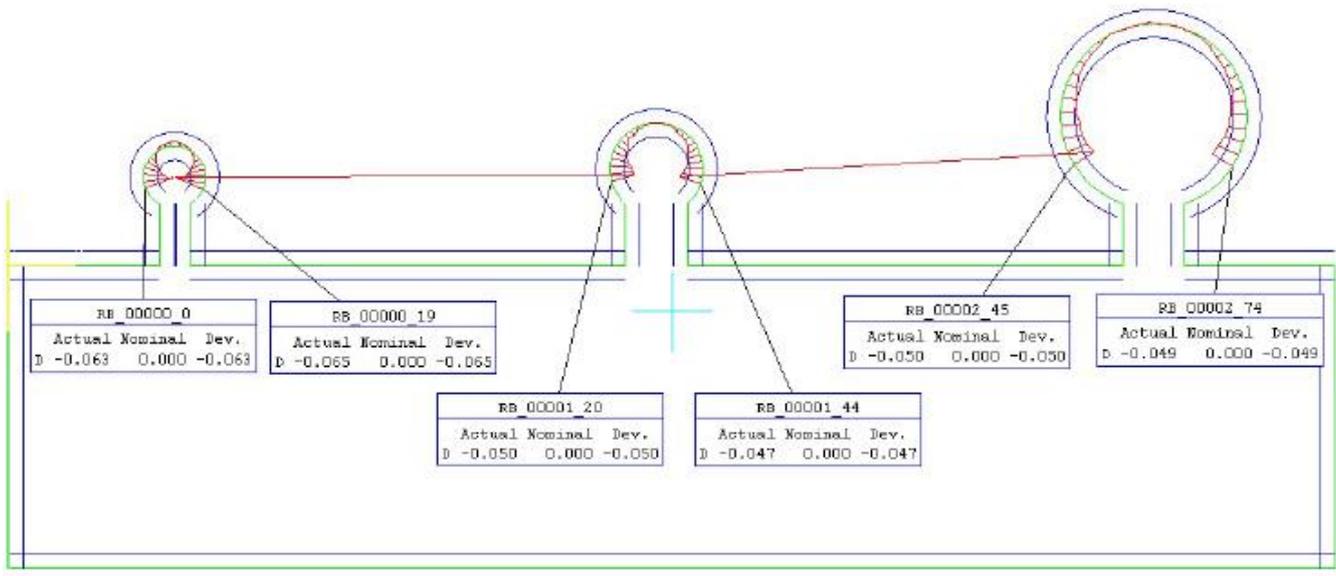
Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -10 mm

Z-20 mm



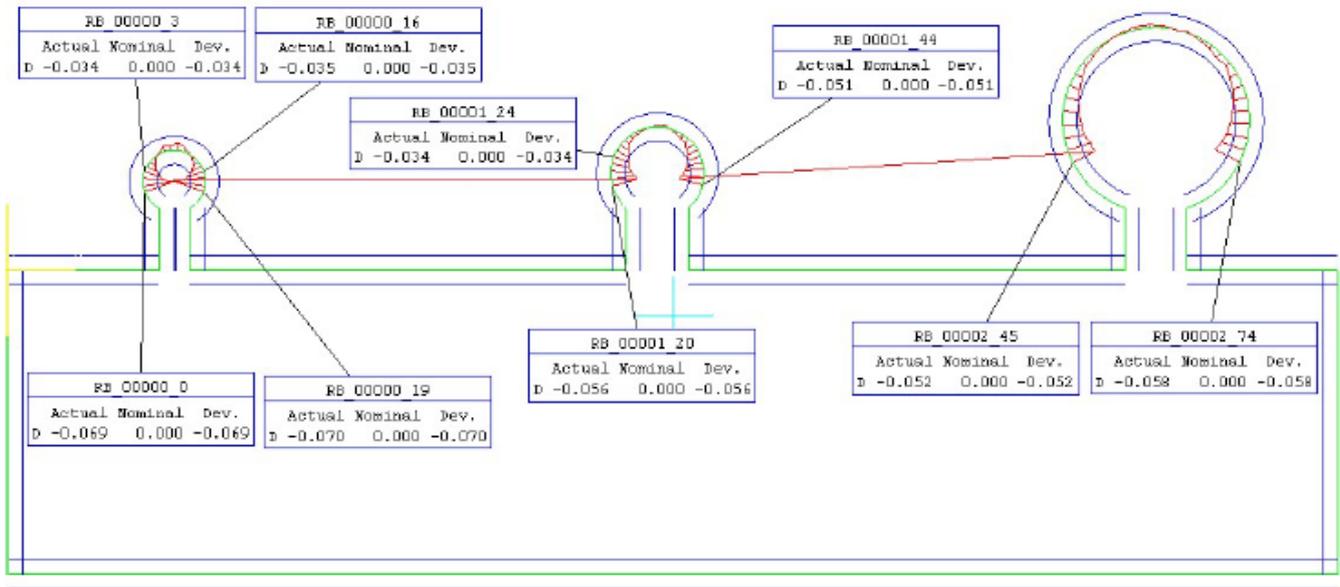
Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CEO
Z: -20 mm

Z-30 mm



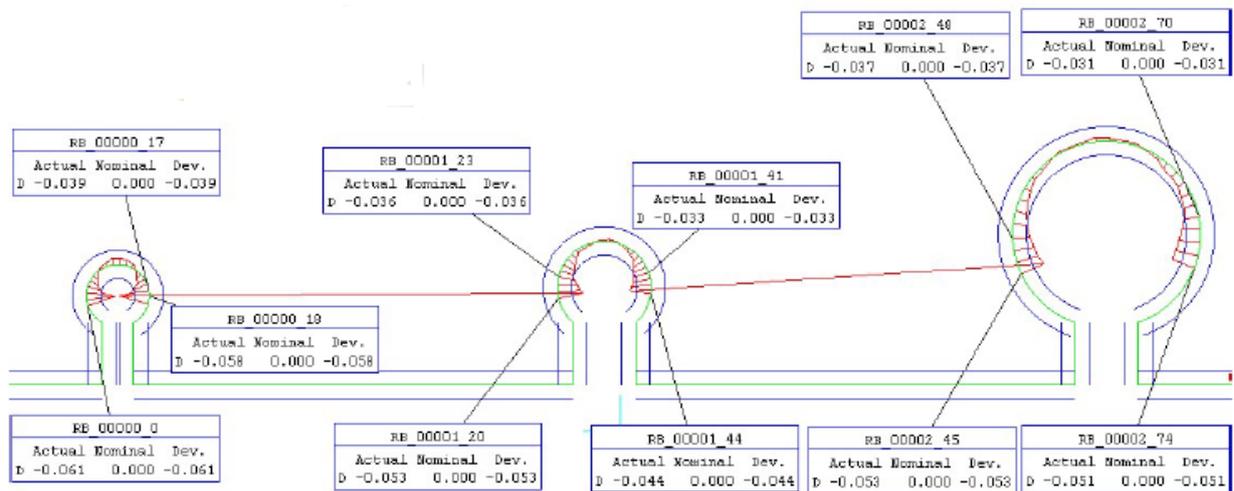
Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CEO
Z: -30 mm

Z-40 mm



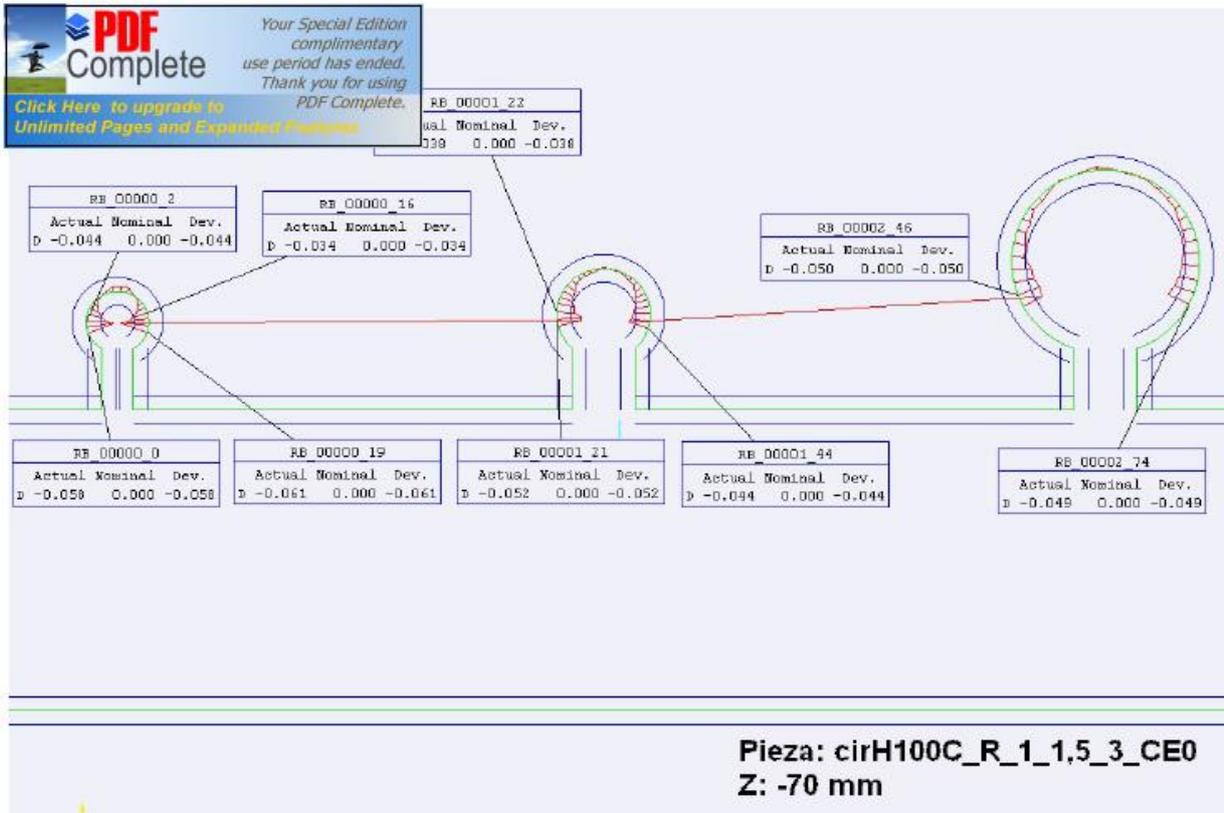
Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -40 mm

Z-60 mm

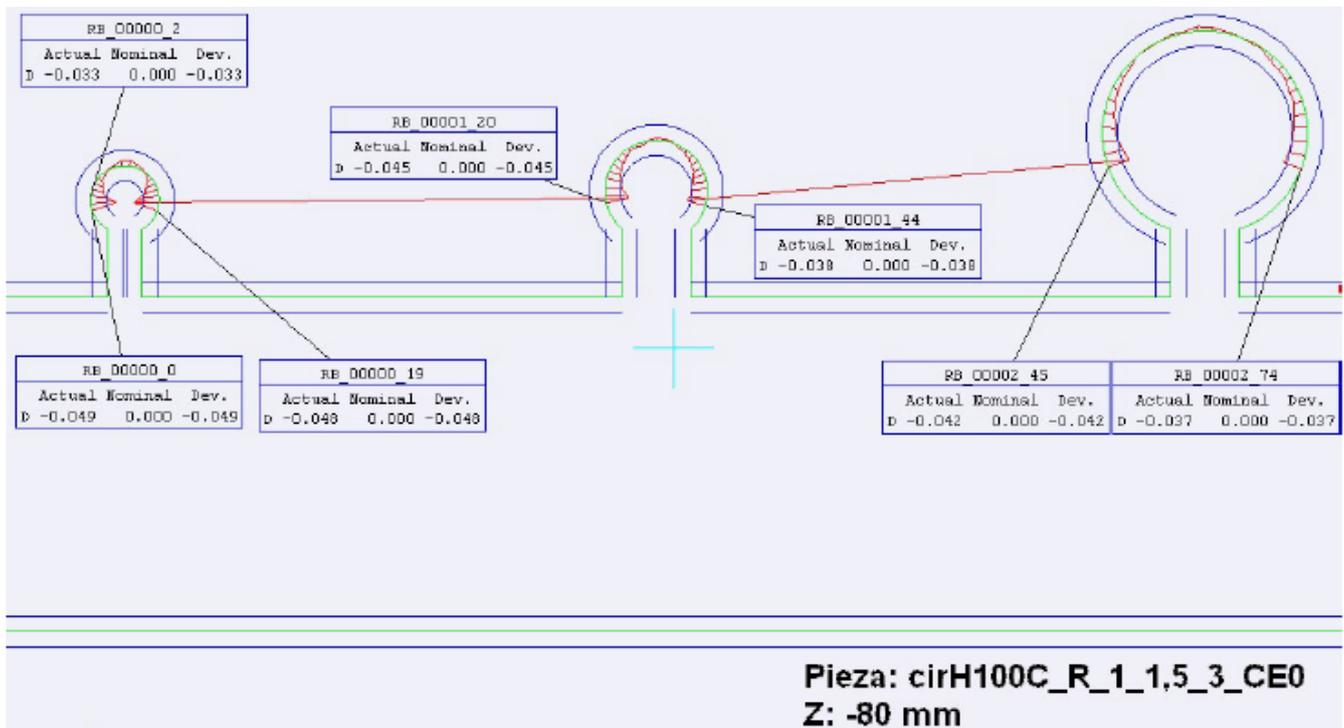


Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -60 mm

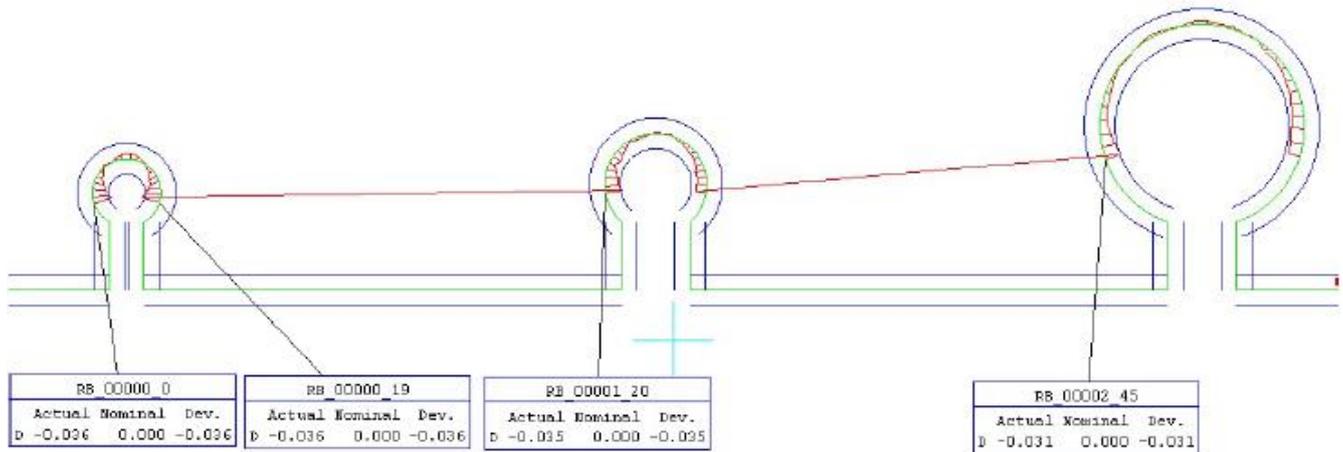
Z-70 mm



Z-80 mm

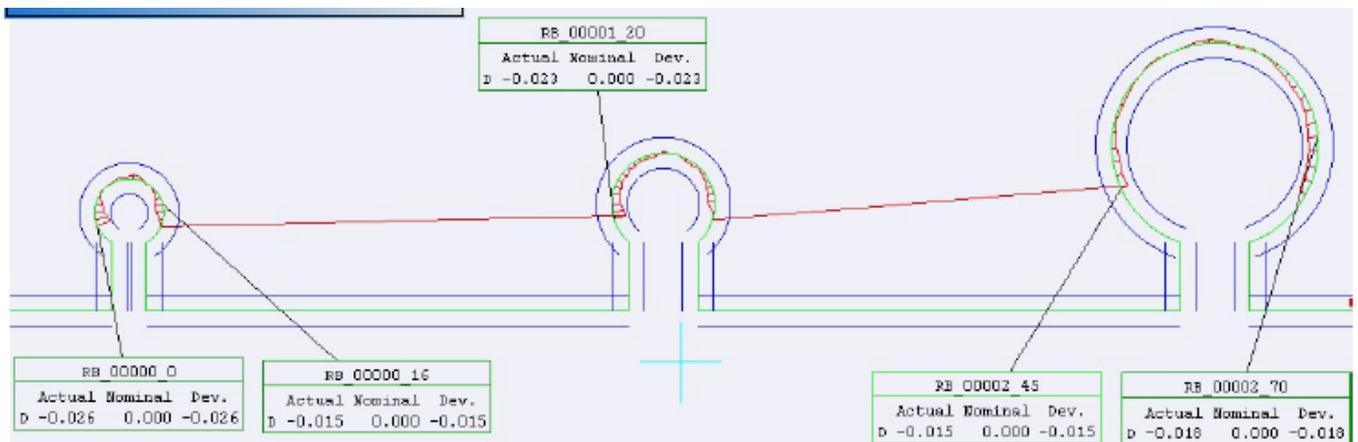


Z-90 mm



Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -90 mm

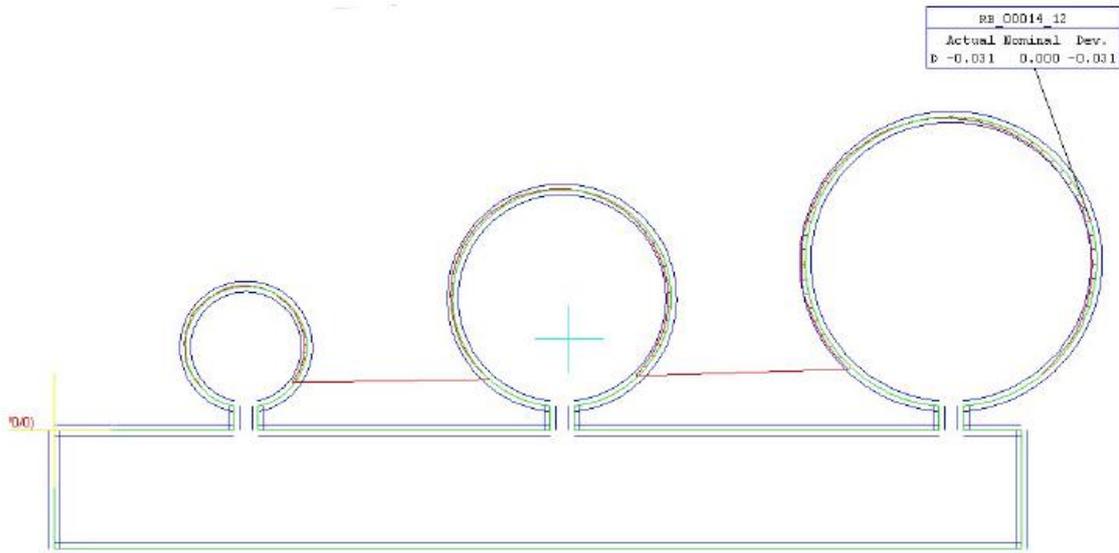
Z-98.5 mm



Pieza: cirH100C_R_1_1,5_3_CE0
Z: -98.5 mm

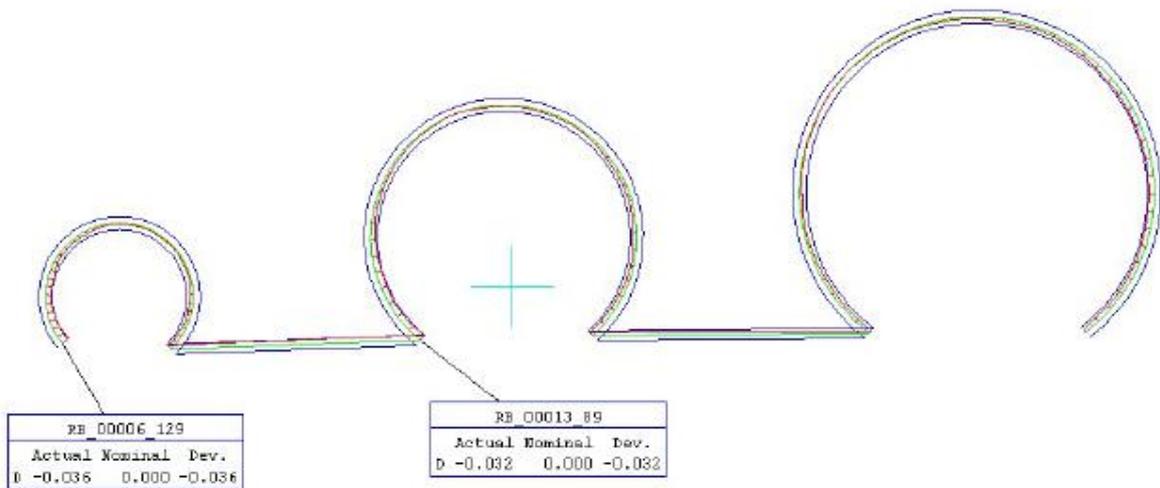
H100 R 5 9 12 (Radios 5, 9 y 12 mm)

Z-1.5 mm



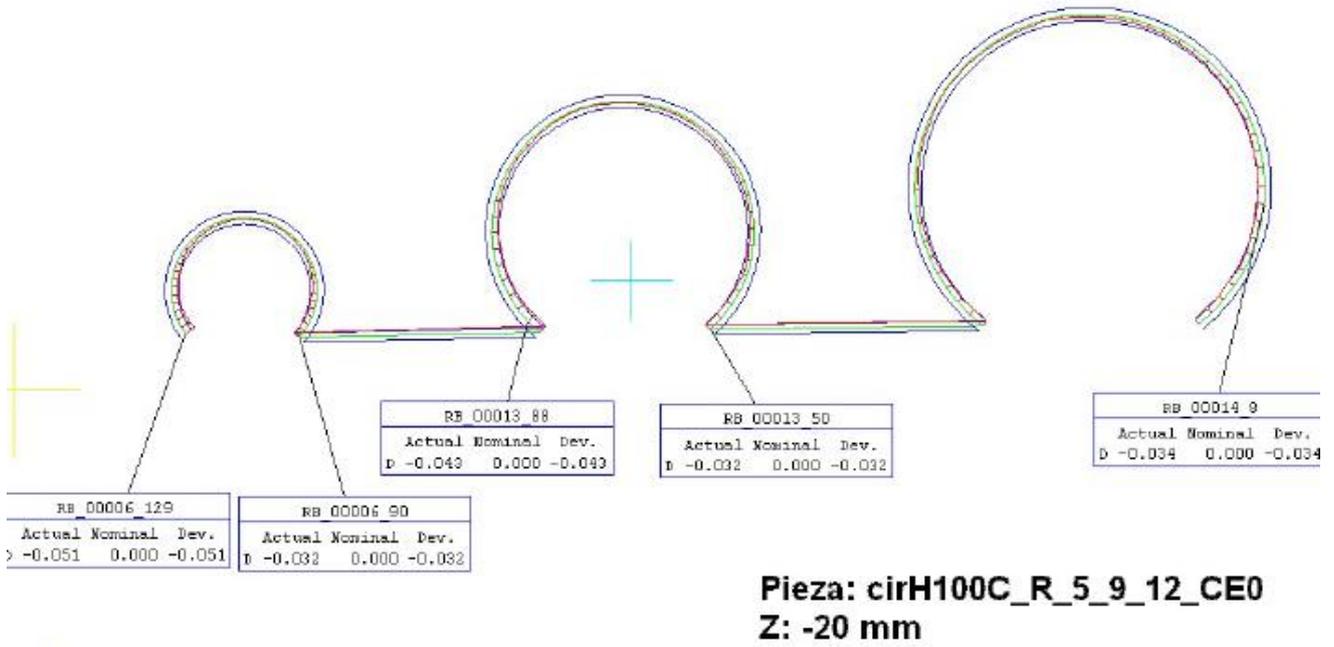
**Pieza: cirH100C_R_5_9_12_CEO
Z: -1.5 mm**

Z-10 mm

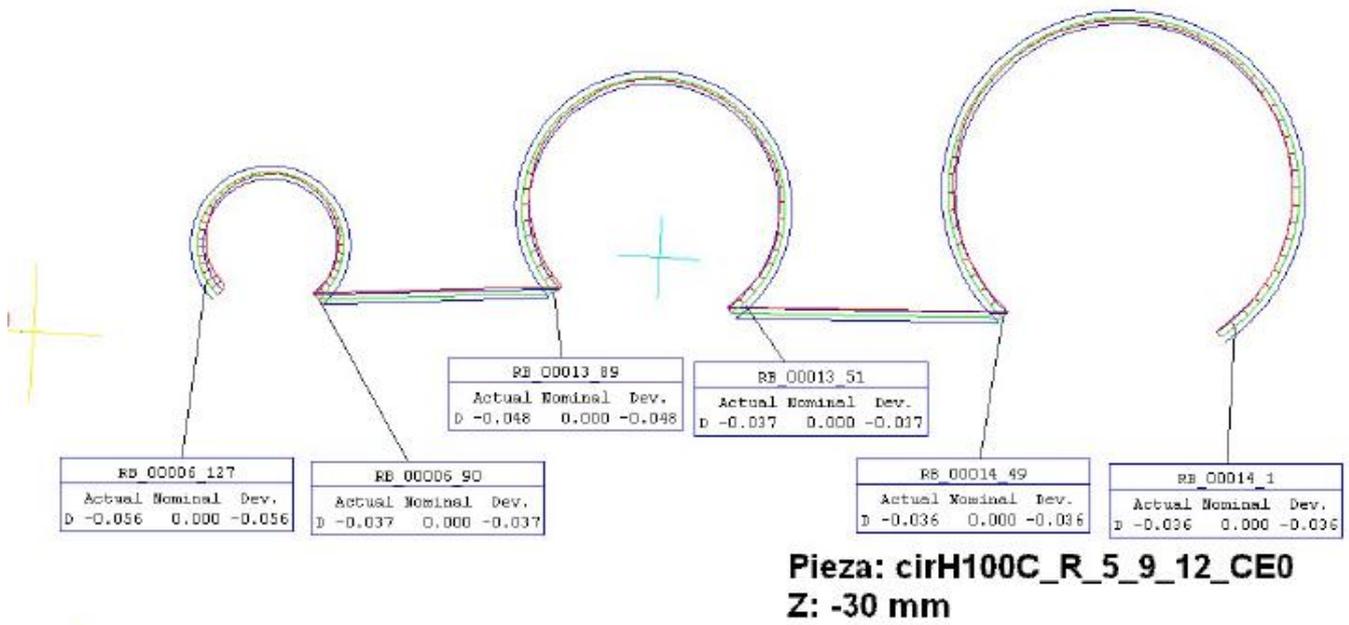


**Pieza: cirH100C_R_5_9_12_CEO
Z: -10 mm**

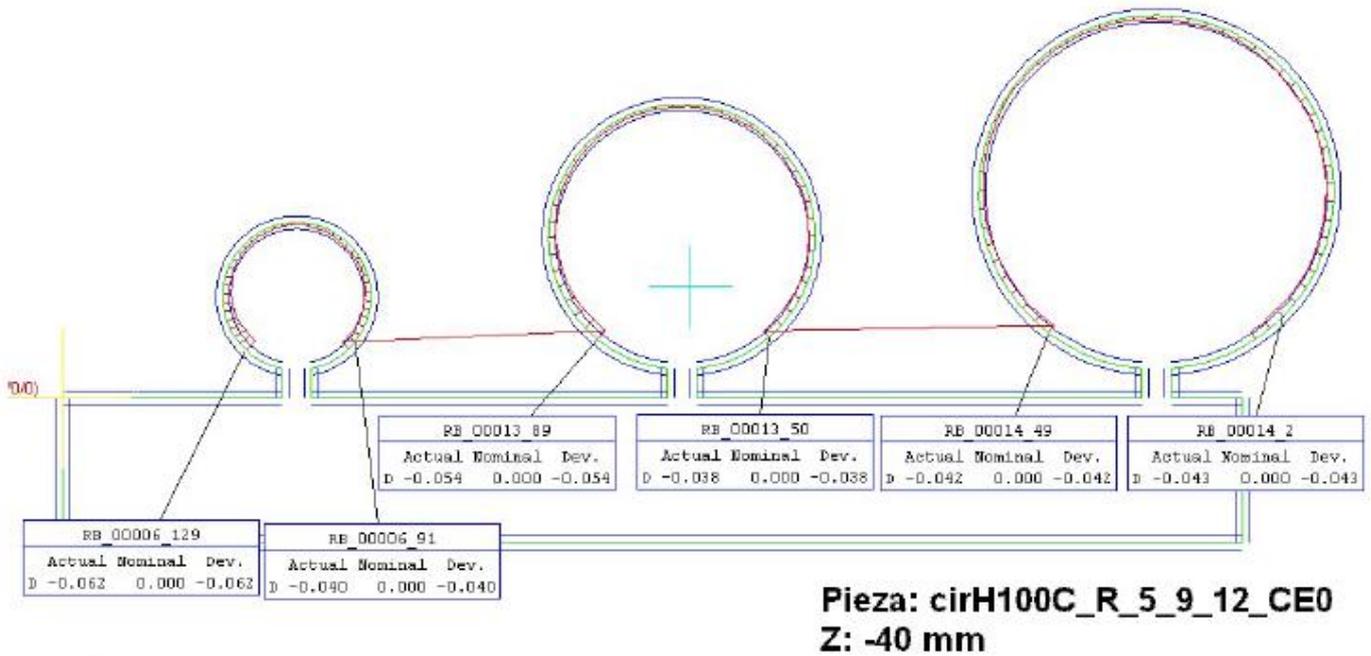
Z-20 mm



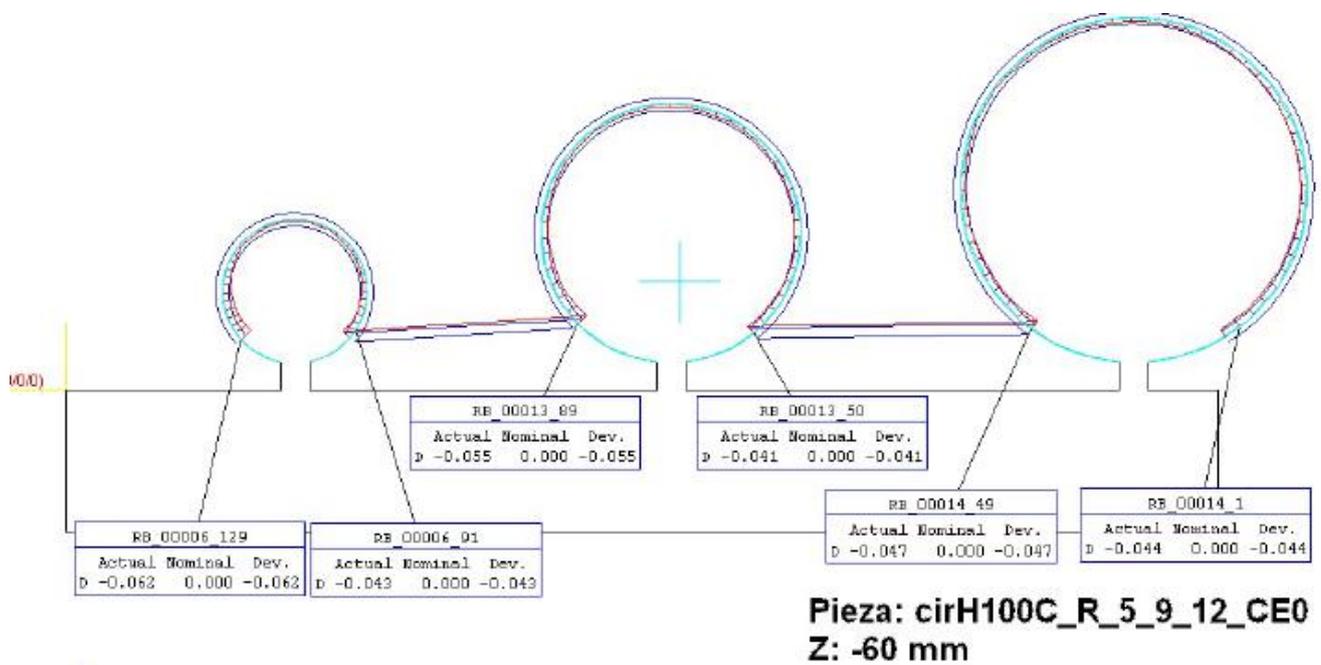
Z-30 mm



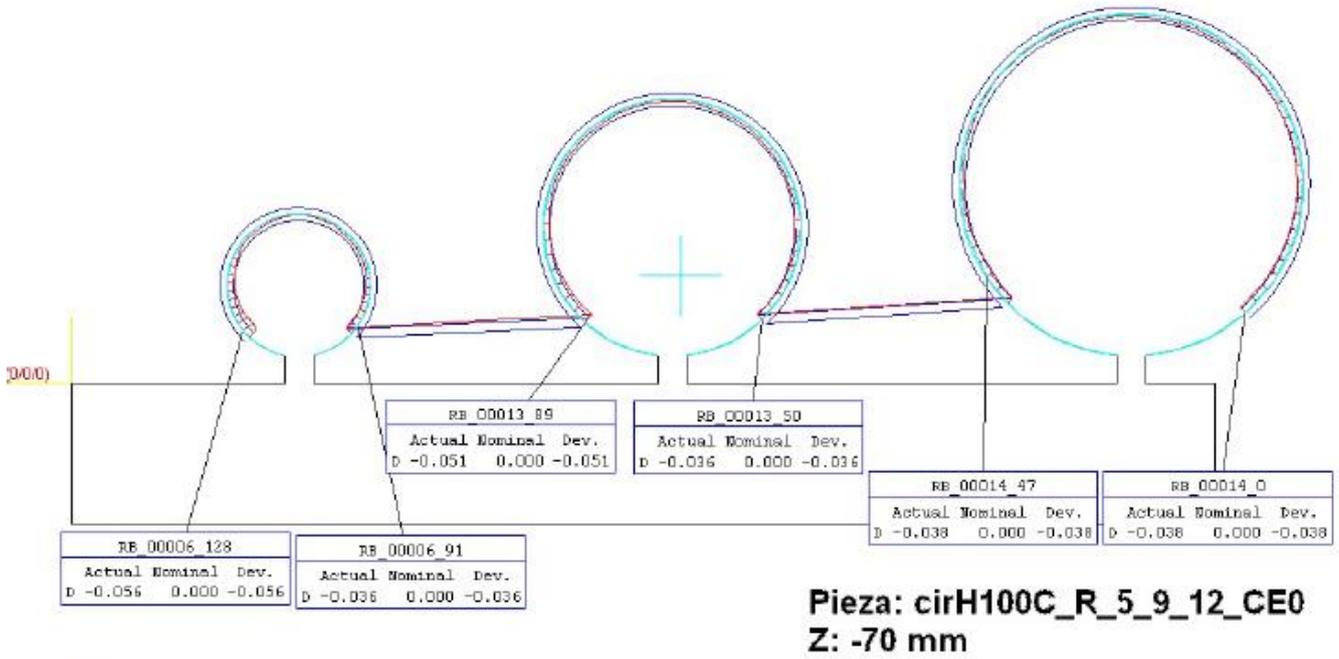
Z-40 mm



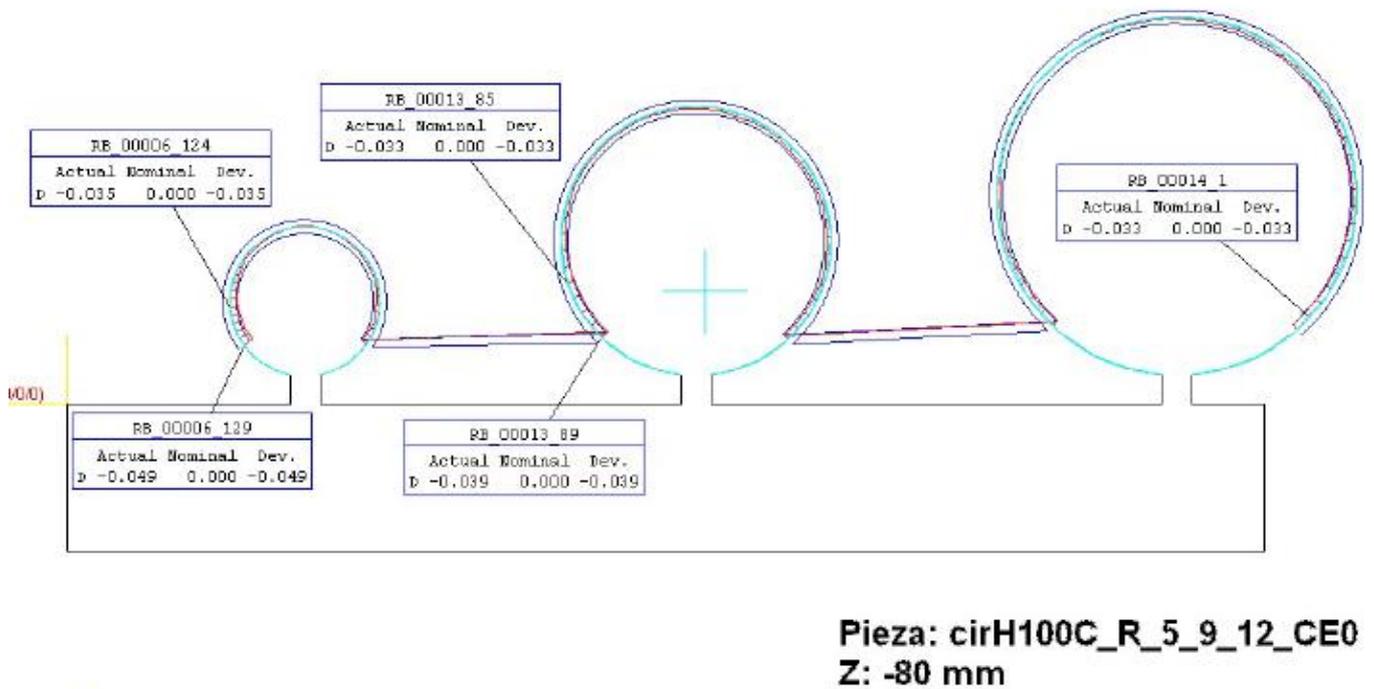
Z-60 mm



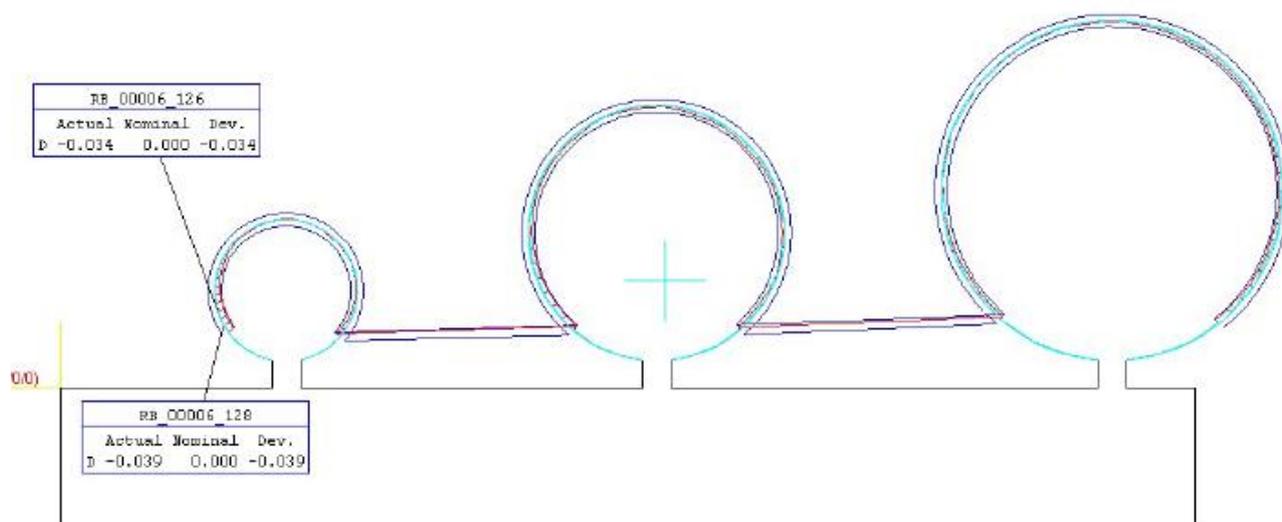
Z-70 mm



Z-80 mm

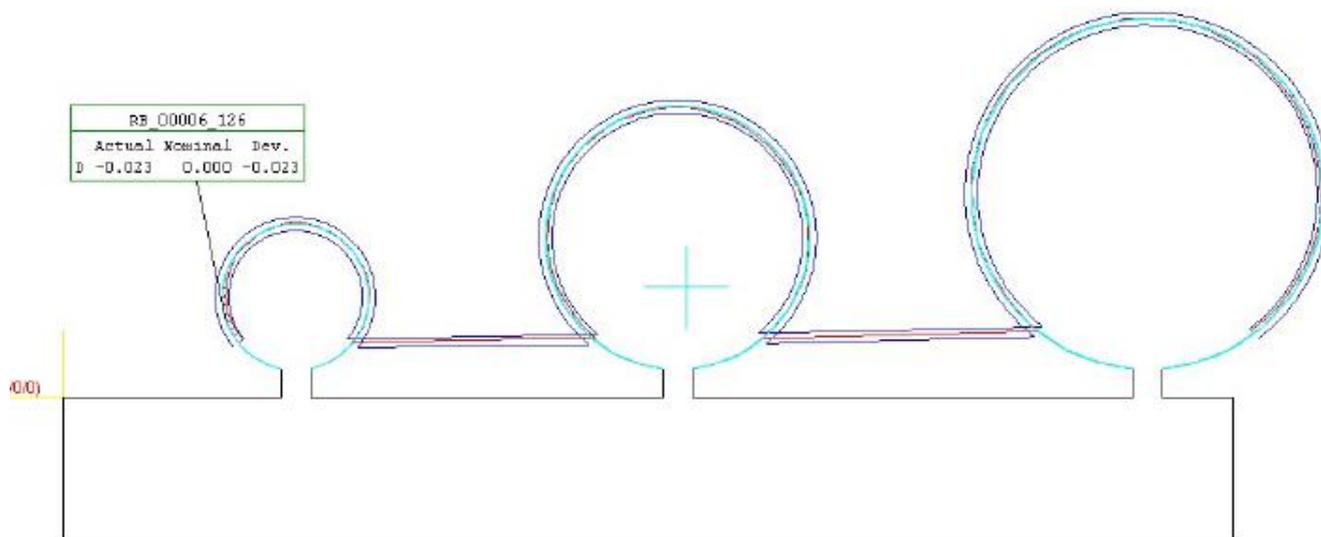


Z-90 mm



Pieza: cirH100C_R_5_9_12_CE0
Z: -90 mm

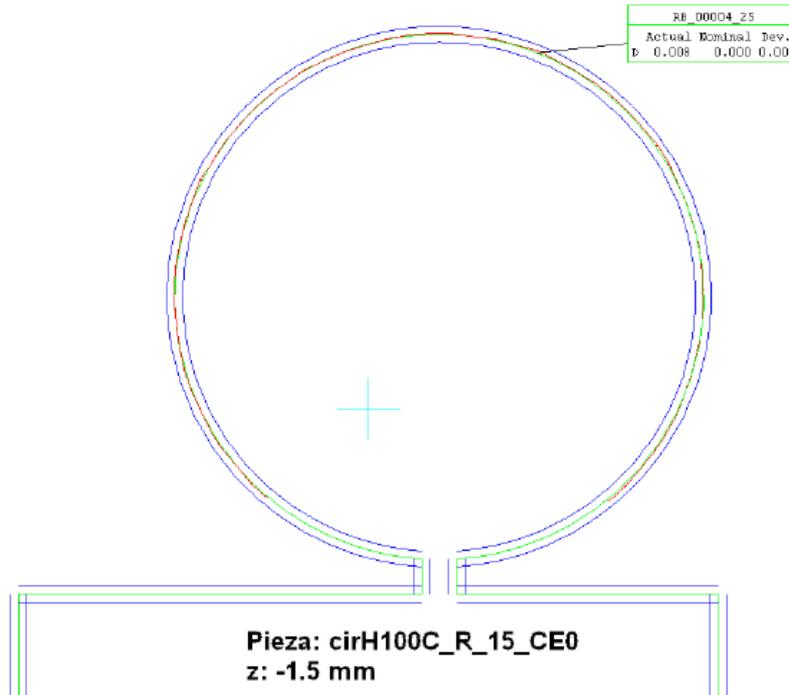
Z-98.5 mm



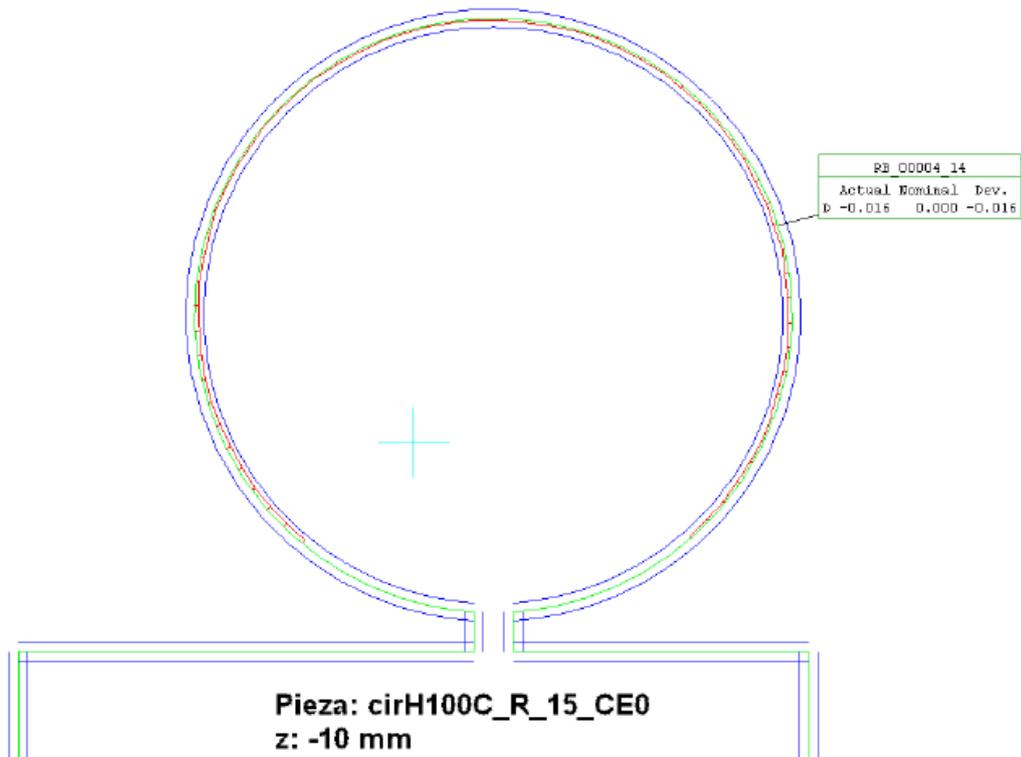
Pieza: cirH100C_R_5_9_12_CE0
Z: -98.5 mm

H100 R 15 (Radio 15 mm)

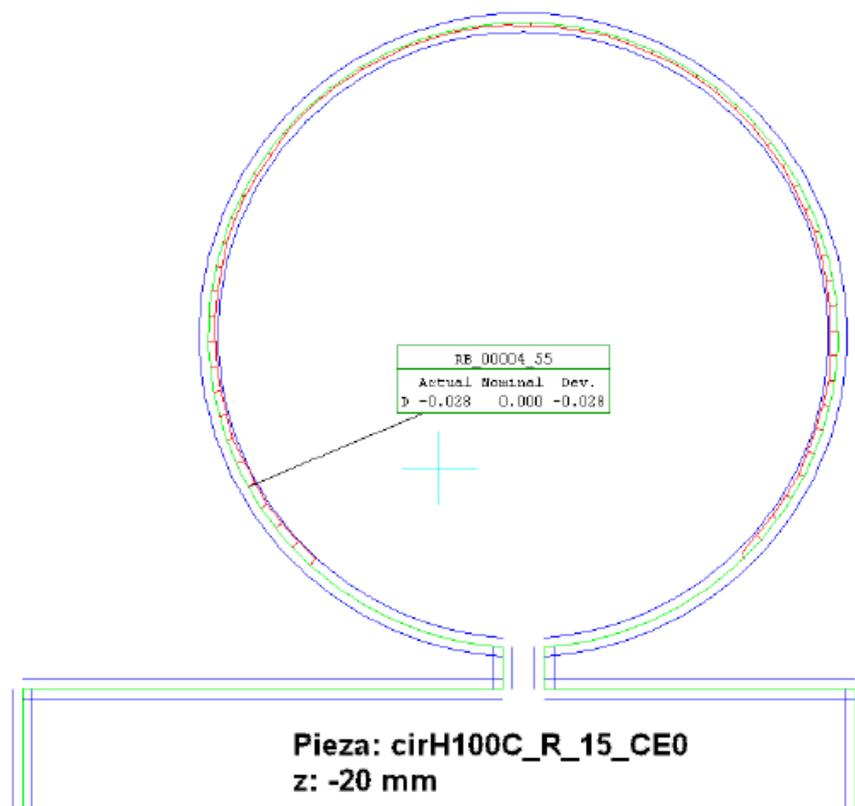
Z-1.5 mm



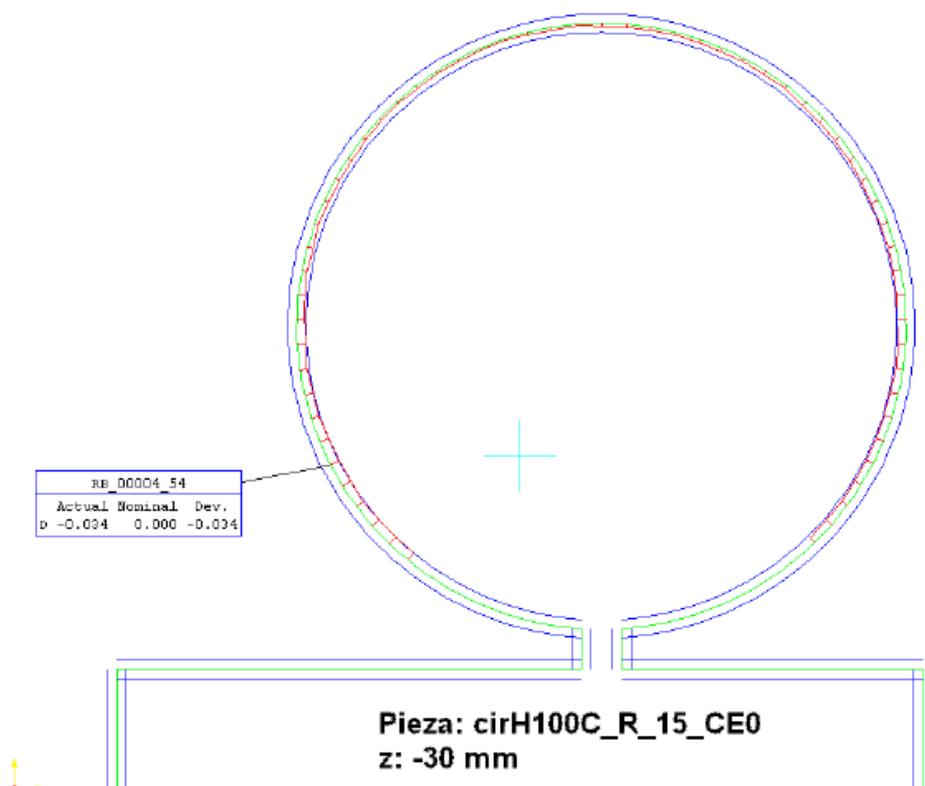
Z-10 mm



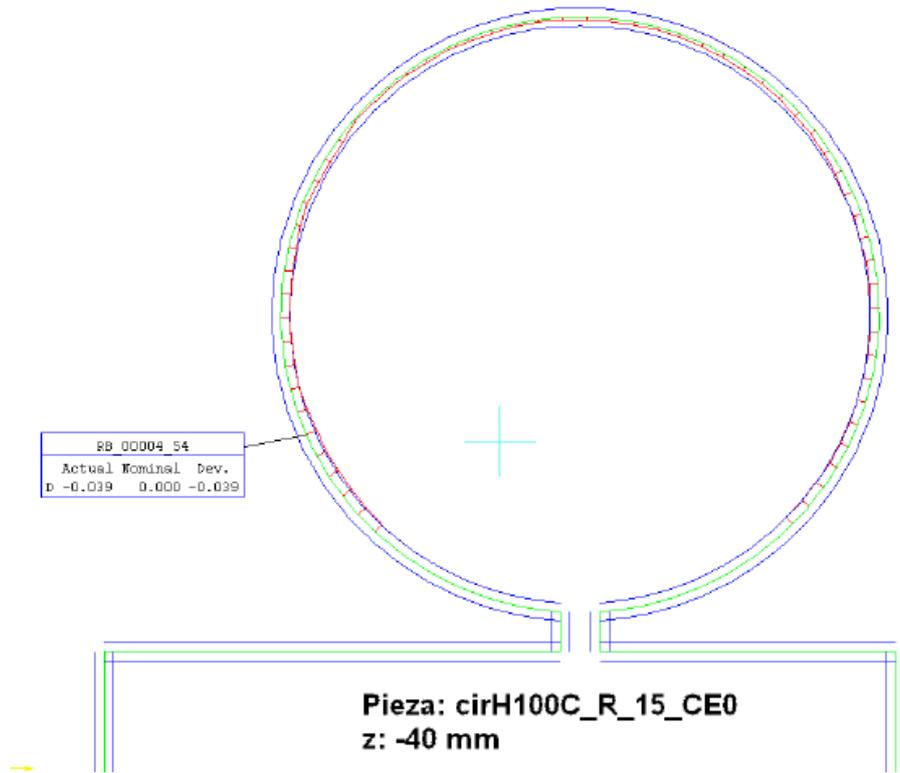
Z-20 mm



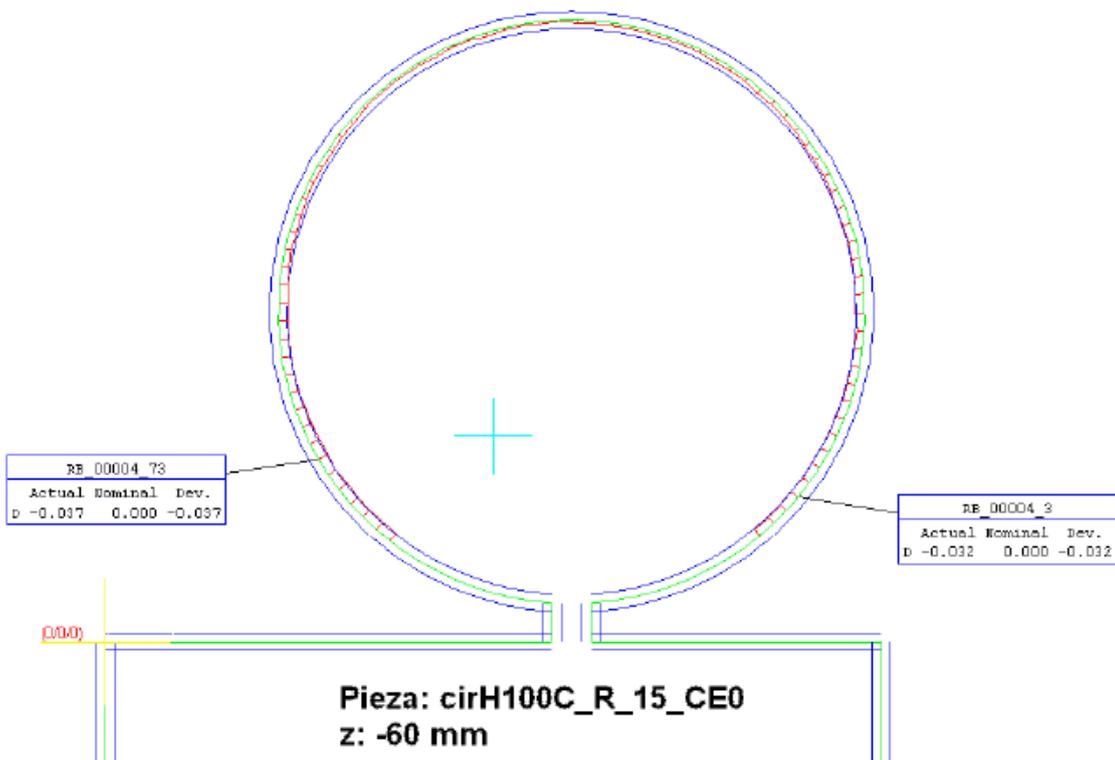
Z-30 mm



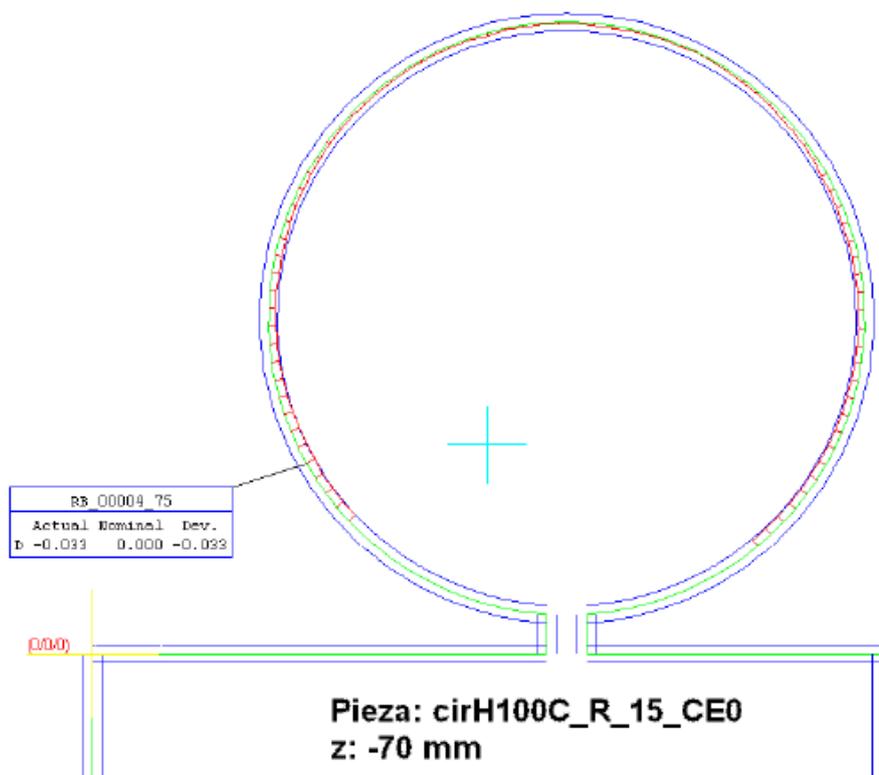
Z-40 mm



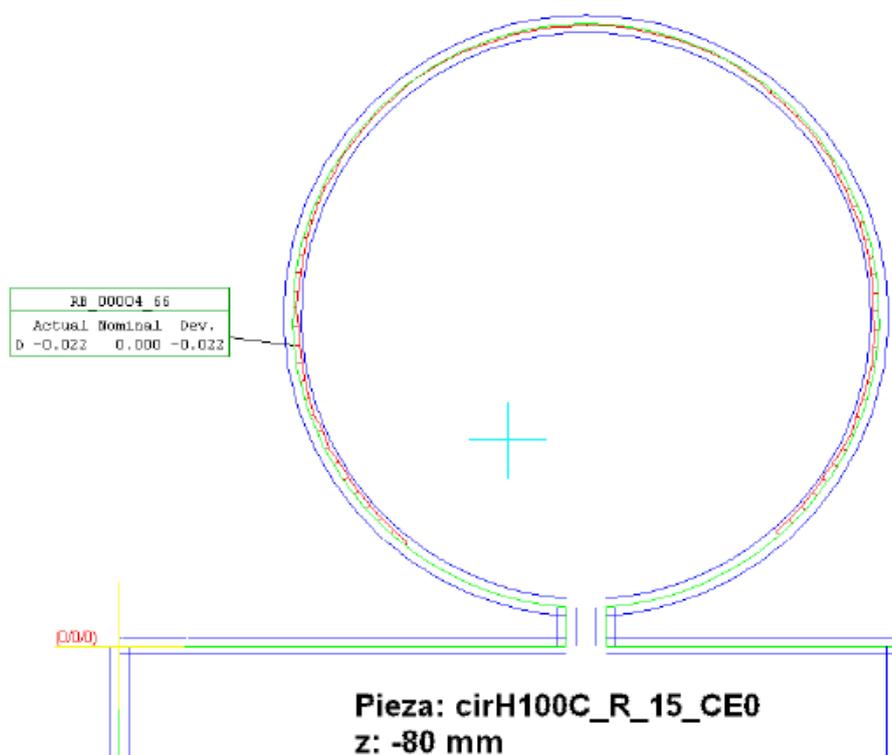
Z-60 mm



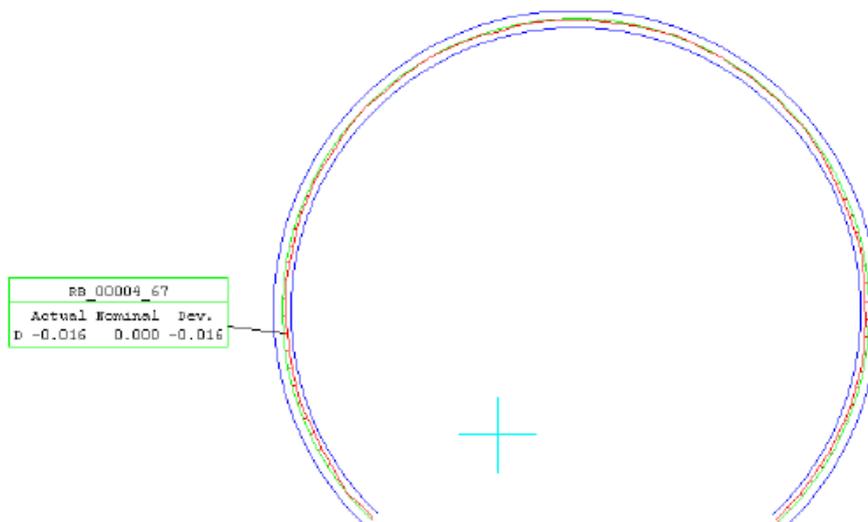
Z-70 mm



Z-80 mm

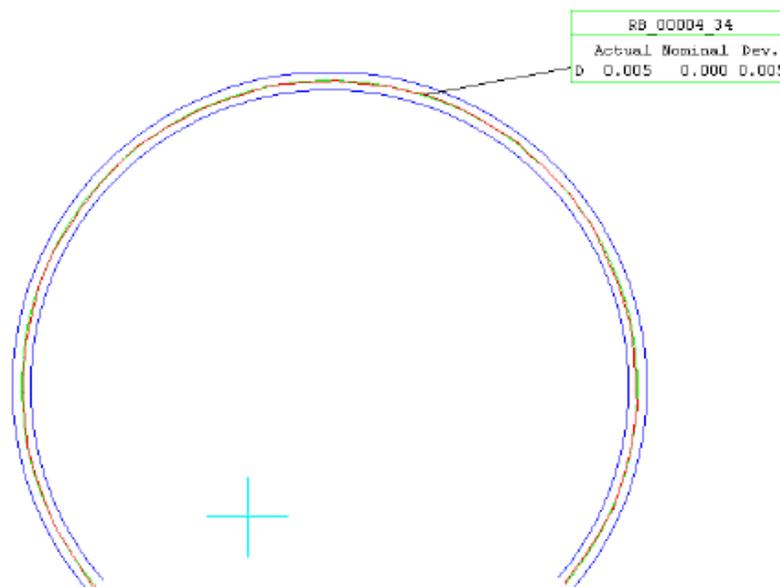


Z-90 mm



Pieza: cirH100C_R_15_CE0
z: -90 mm

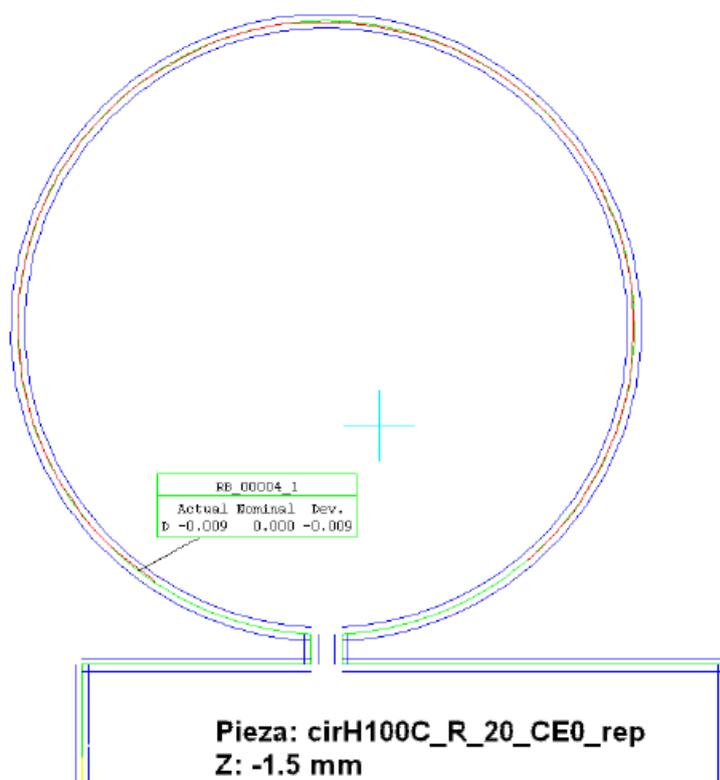
Z-98.5 mm



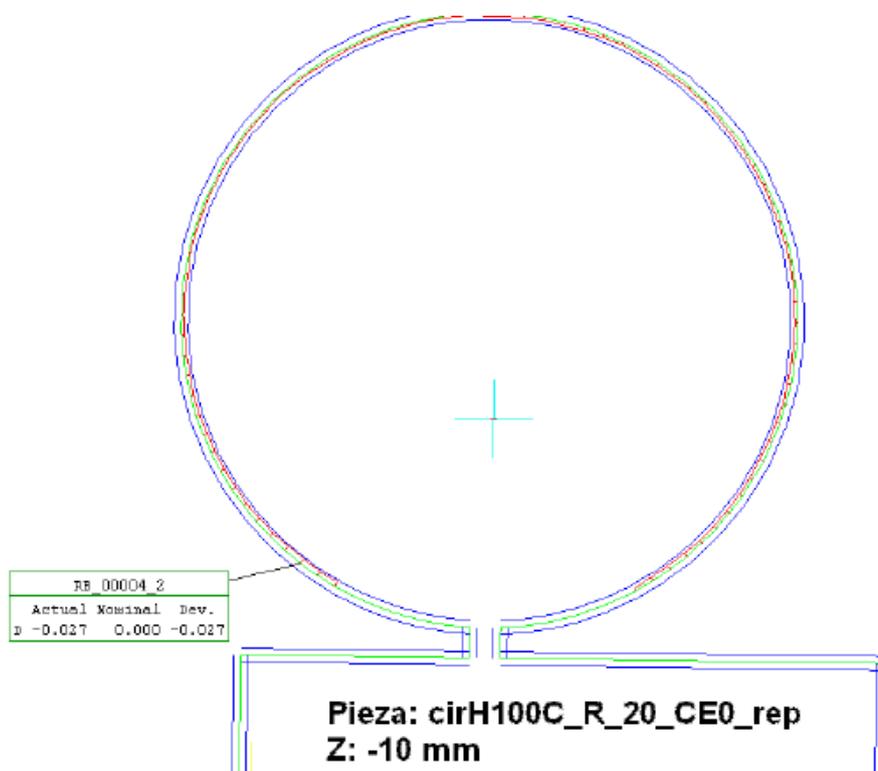
Pieza: cirH100C_R_15_CE0
z: -98.5 mm

H100 R 20 (Radio 20 mm)

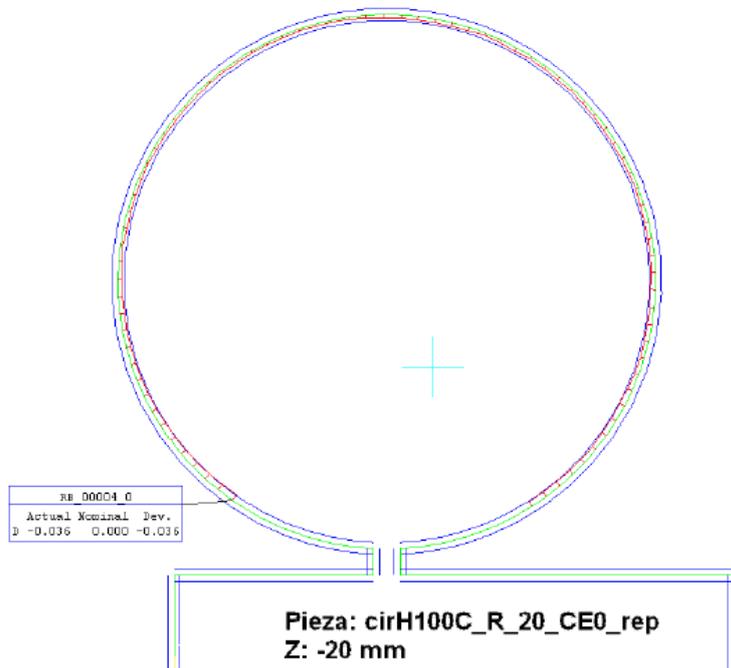
Z-1.5 mm



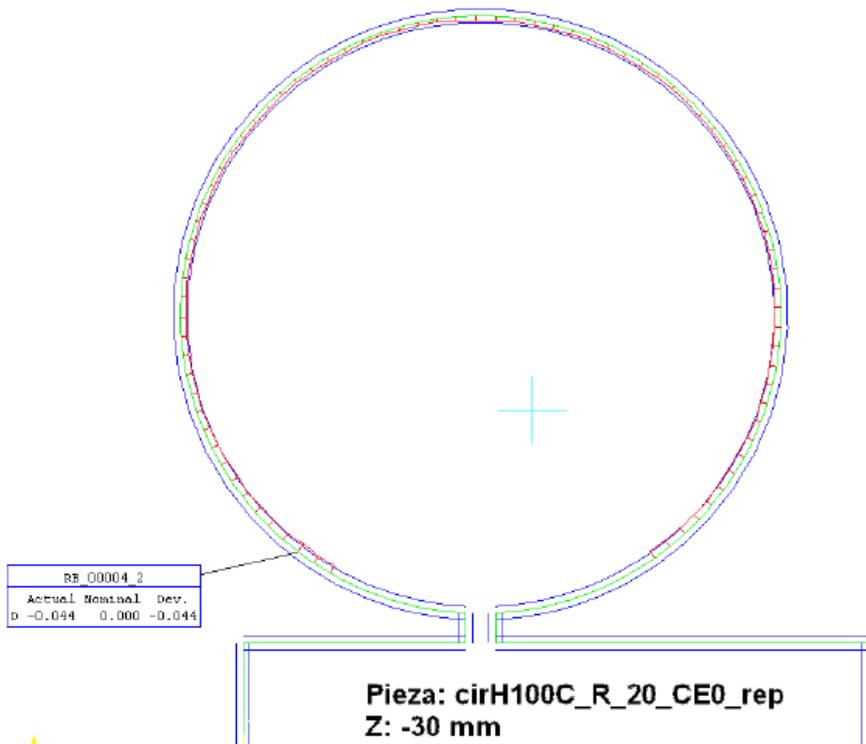
Z-10 mm



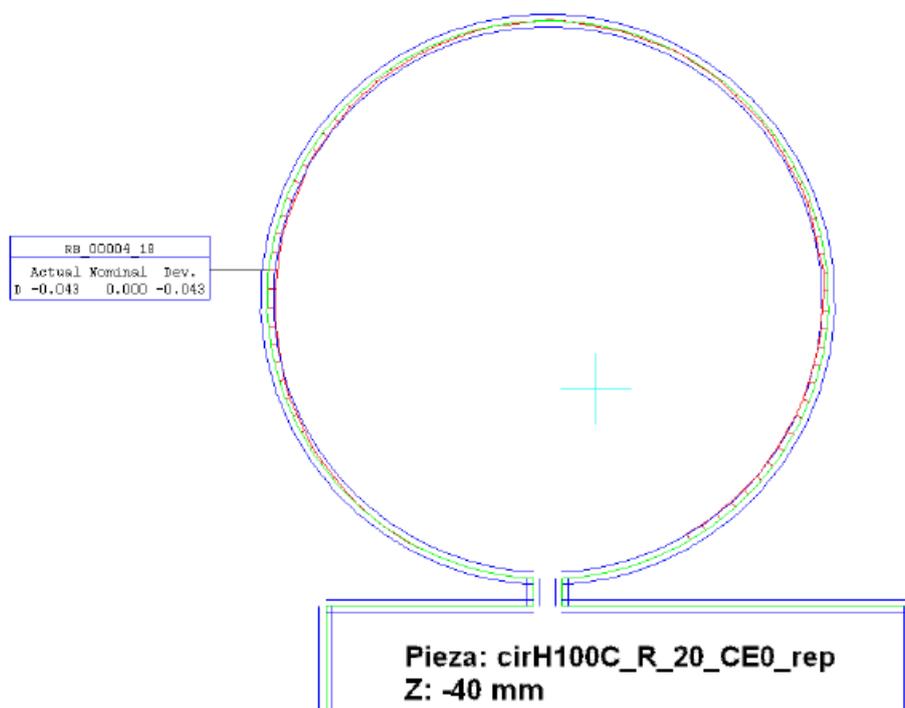
Z-20 mm



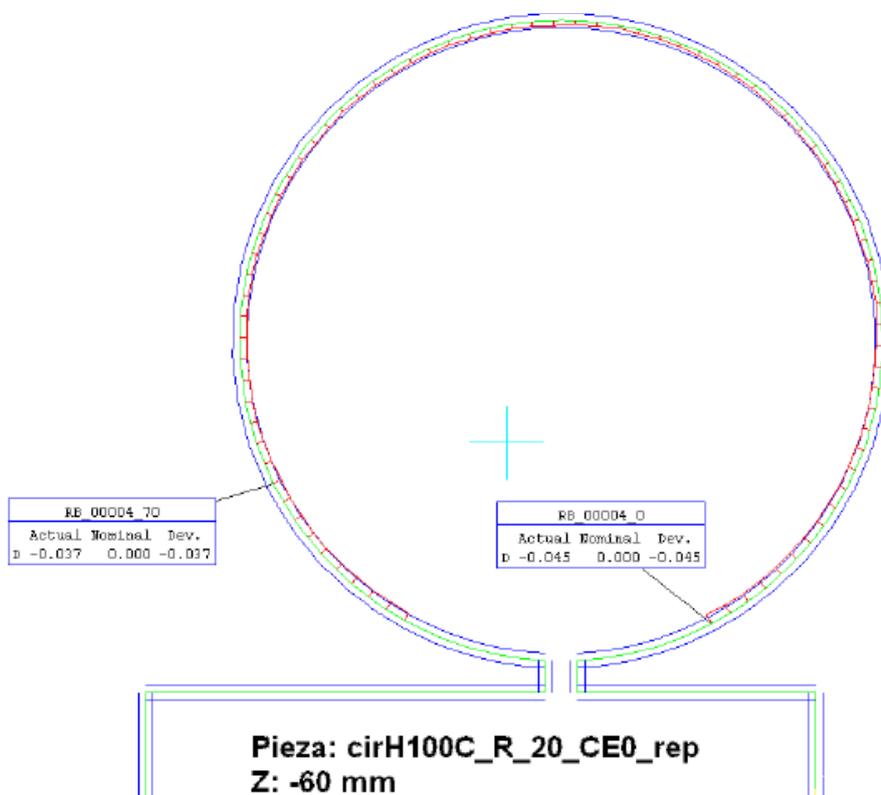
Z-30 mm



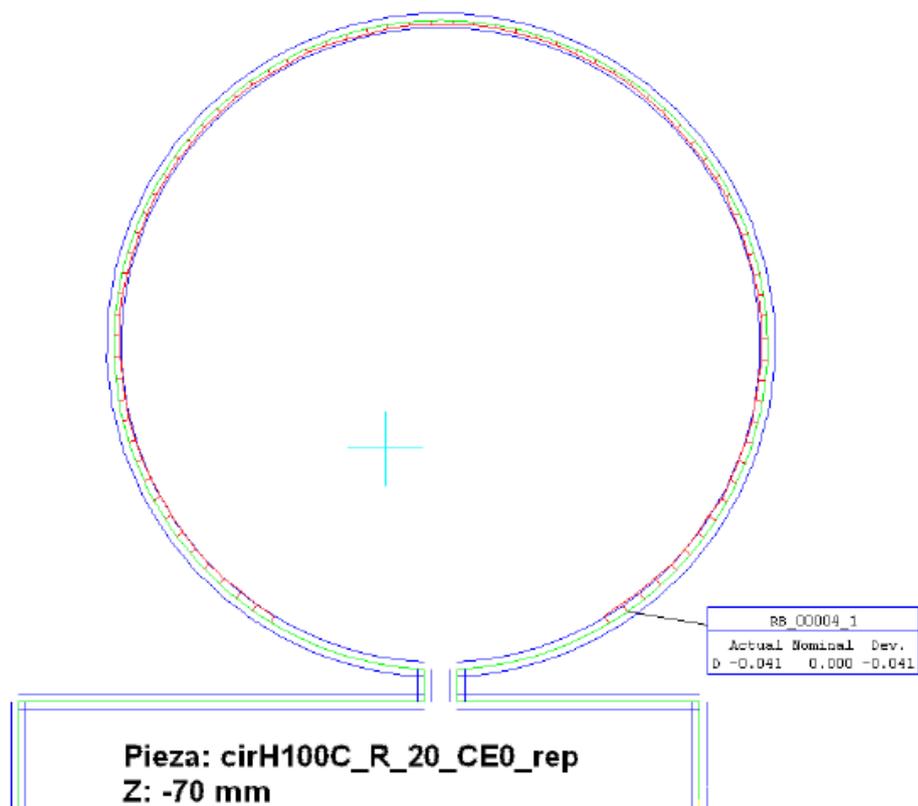
Z-40 mm



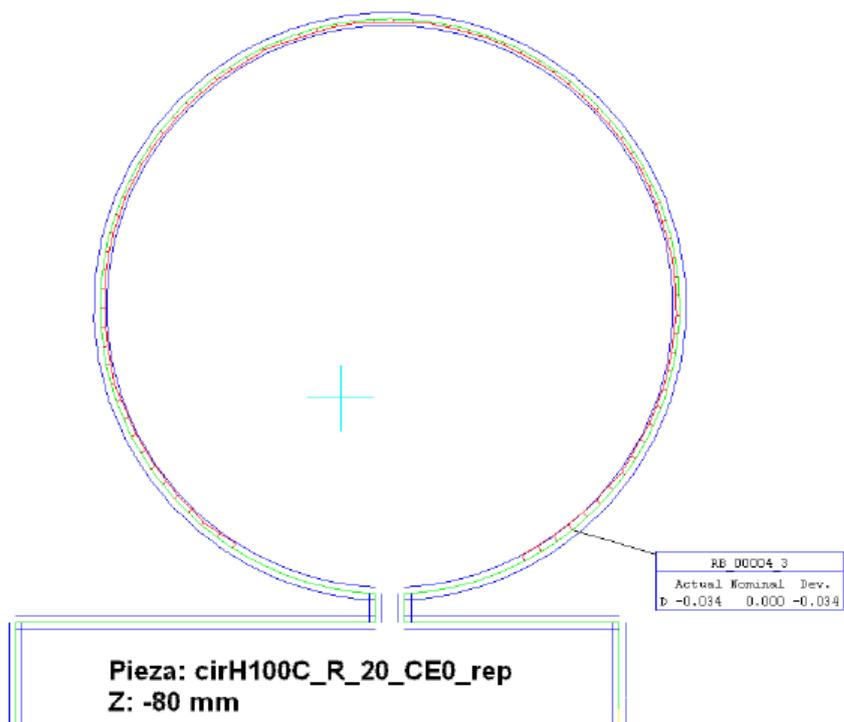
Z-60 mm



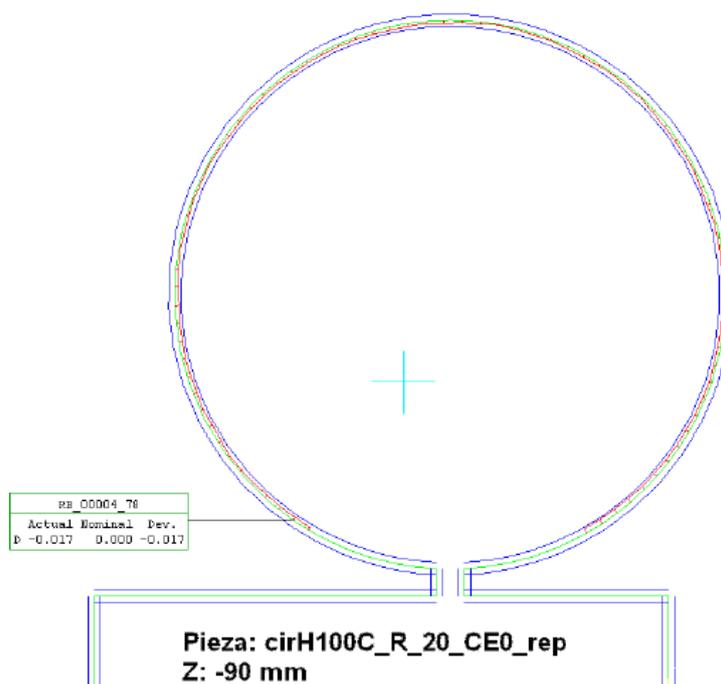
Z-70 mm



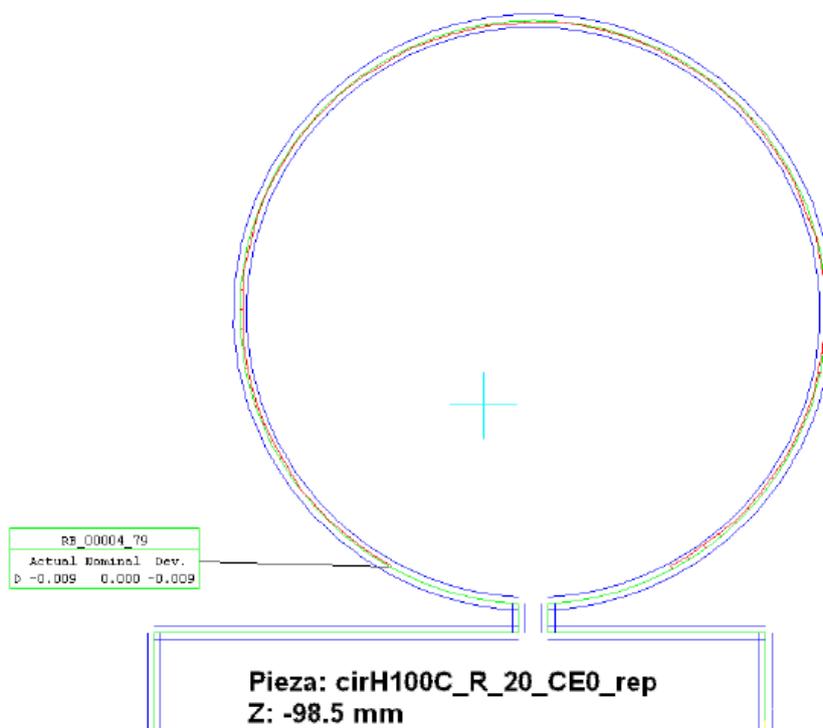
Z-80 mm



Z-90 mm



Z-98.5 mm



5.2.1.2. PUNTOS QUE FORMAN PARTE DE LA RNA

A continuación se disponen ordenadamente los 30 puntos interpolados (en algunos casos menos), que relacionan cada punto con su radio real. Estos puntos han sido los que han formado parte del entrenamiento de la Red Neuronal Artificial, presentándolos a la misma como la salida esperada (“*Target*”) para cada plano de medición de cada probeta.

5.2.1.2.1. H40 (Espesor 40 mm)

RADIO 3 mm

Punto	z-1,5 Radio real	z-4 Radio real	z-8 Radio real	z-12 Radio real	z-16 Radio real	z-24 Radio real	z-28 Radio real	z-32 Radio real	z-36 Radio real	z-38,5 Radio real
1	2,995			2,995	2,980				2,987	
2	2,995			2,993	2,980				2,986	
3	2,995			2,991	2,981				2,985	
4	2,995		3,000	2,990	2,982	2,978	2,978		2,984	
5	2,994	2,993	2,993	2,988	2,983	2,980	2,980	2,979	2,983	
6	2,994	2,990	2,990	2,985	2,983	2,982	2,983	2,983	2,982	2,991
7	2,990	2,989	2,988	2,987	2,984	2,986	2,986	2,986	2,983	2,989
8	2,991	2,992	2,990	2,988	2,988	2,987	2,987	2,984	2,987	2,990
9	2,993	2,994	2,995	2,991	2,990	2,988	2,991	2,990	2,985	2,989
10	2,995	2,994	2,997	2,996	2,995	2,992	2,994	2,995	2,988	2,994
11	2,997	2,998	3,000	3,000	3,001	2,998	3,003	2,994	2,997	2,999
12	2,999	3,001	2,999	3,001	3,000	3,001	2,999	3,001	2,997	2,998
13	3,002	3,001	3,001	3,002	3,001	3,001	2,999	2,999	3,000	2,999
14	3,002	3,001	2,999	3,002	3,003	3,002	3,002	2,997	3,000	2,998
15	3,001	2,999	3,000	3,002	3,001	3,001	3,001	3,001	3,001	2,997
16	2,997	2,996	2,998	3,000	3,001	3,001	3,000	3,000	2,999	2,997
17	2,996	2,998	3,002	3,000	3,001	3,004	3,000	2,999	3,001	3,000
18	2,997	2,998	3,000	2,999	3,001	3,002	2,999	2,999	3,001	2,999
19	2,997	2,998	2,999	2,999	3,000	3,000	2,999	3,001	3,000	2,995
20	2,997	2,997	2,997	2,998	2,998	2,998	3,000	3,002	3,000	2,998
21	2,997	2,998	2,996	2,997	2,999	2,997	2,995	2,997	3,000	2,997
22	3,003	2,997	2,995	2,994	2,996	2,998	2,995	2,995	2,998	2,998
23	3,000	2,996	2,993	2,992	2,993	2,993	2,993	2,994	2,999	2,998
24	2,991	2,993	2,987	2,987	2,989	2,985	2,986	2,988	2,993	2,991
25	2,989	2,985	2,978	2,982	2,982				2,986	2,992
26										2,993
27										2,994
28										2,995
29										2,997
30										2,998

RADIO 5 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	4,995	4,989	4,983	4,983	4,976	4,977	4,980	4,977	4,991	4,996
2	4,990	4,985	4,981	4,980	4,976	4,977	4,980	4,980	4,986	4,988
3	4,990	4,983	4,981	4,979	4,978	4,979	4,982	4,984	4,986	4,989
4	4,991	4,988	4,983	4,981	4,981	4,984	4,986	4,987	4,989	4,992
5	4,993	4,989	4,985	4,987	4,983	4,984	4,986	4,990	4,991	4,993
6	4,991	4,989	4,986	4,989	4,984	4,992	4,987	4,990	4,990	4,993
7	4,995	4,989	4,989	4,991	4,987	4,990	4,990	4,991	4,991	4,993
8	4,995	4,992	4,990	4,989	4,987	4,991	4,992	4,992	4,992	4,992
9	5,000	4,996	4,995	4,993	4,996	4,994	4,993	4,996	4,996	4,997
10	5,002	4,997	4,998	4,995	4,996	4,997	4,994	4,996	4,997	4,999
11	4,997	4,998	4,997	4,995	4,997	4,995	4,993	4,995	4,997	4,997
12	4,999	4,996	4,996	4,994	4,994	4,992	4,992	4,993	4,995	4,995
13	4,998	4,996	4,996	4,994	4,995	4,991	4,992	4,990	4,993	4,993
14	4,999	4,998	4,998	4,996	4,995	4,991	4,991	4,992	4,992	4,992
15	4,997	4,999	4,998	4,996	4,995	4,994	4,994	4,994	4,991	4,991
16	4,998	4,999	4,999	4,997	4,996	4,994	4,991	4,991	4,991	4,991
17	4,994	4,996	4,996	4,995	4,993	4,988	4,988	4,991	4,991	4,990
18	4,996	4,994	4,996	4,996	4,995	4,992	4,993	4,993	4,992	4,995
19	4,994	4,992	4,992	4,991	4,991	4,991	4,991	4,991	4,991	4,993
20	4,990	4,989	4,991	4,988	4,989	4,990	4,992	4,994	4,991	4,992
21	4,991	4,988	4,989	4,988	4,987	4,985	4,987	4,992	4,992	4,991
22	4,992	4,987	4,990	4,986	4,986	4,987	4,990	4,992	4,993	4,993
23	4,992	4,987	4,987	4,988	4,987	4,987	4,989	4,990	4,993	4,994
24	4,992	4,987	4,986	4,987	4,984	4,989	4,988	4,992	4,991	4,991
25	4,988	4,985	4,989	4,982	4,985	4,984	4,990	4,993	4,991	4,991
26	4,990	4,990	4,983	4,983	4,984	4,986	4,990	4,991	4,992	4,994
27	4,995	4,987	4,985	4,985	4,985	4,987	4,990	4,992	4,992	4,994
28	4,994	4,989	4,986	4,985	4,987	4,990	4,991	4,992	4,996	4,995
29	4,998	4,993	4,989	4,989	4,988	4,991	4,993	4,991	4,997	5,000
30	5,002	4,996	4,992	4,993	4,990	4,992	4,997	4,991	4,991	4,994

RADIO 9 mm

Punto	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
	Radio real									
1	8,990	8,985	8,980	8,978	8,977	8,981	8,983	8,979	8,987	8,987
2	8,992	8,986	8,984	8,979	8,981	8,982	8,984	8,985	8,987	8,988
3	8,991	8,986	8,983	8,981	8,982	8,983	8,986	8,988	8,990	8,990
4	8,988	8,985	8,981	8,981	8,980	8,984	8,983	8,987	8,990	8,991
5	8,992	8,989	8,986	8,986	8,985	8,987	8,987	8,993	8,992	8,994
6	8,995	8,991	8,988	8,988	8,991	8,992	8,994	8,993	8,995	8,996
7	8,992	8,992	8,989	8,991	8,990	8,993	8,993	8,996	8,997	8,998
8	8,997	8,993	8,993	8,994	8,994	8,997	8,998	9,002	9,001	9,003
9	9,001	8,997	8,997	8,995	8,996	8,998	9,002	9,003	9,003	9,005
10	9,001	8,996	8,997	8,996	8,997	8,997	8,999	9,002	9,003	9,002
11	9,000	8,999	8,997	8,997	8,998	8,999	8,999	9,002	9,003	9,002
12	8,999	8,998	8,998	8,998	8,998	9,004	9,001	9,002	9,003	9,002
13	8,997	8,998	8,997	8,997	8,997	9,000	8,999	8,999	9,002	9,001
14	8,999	9,000	8,998	8,999	9,000	9,000	8,998	9,002	9,002	9,002
15	9,000	9,000	8,999	8,997	8,996	8,999	8,999	9,000	8,999	9,002
16	8,997	8,996	8,999	8,997	9,000	8,999	9,001	8,998	9,002	9,002
17	8,997	8,999	9,000	8,996	9,000	9,000	9,001	9,004	9,001	9,003
18	8,998	8,997	8,998	8,998	8,998	9,001	8,998	9,000	9,001	9,002
19	8,997	8,999	8,998	8,996	8,996	8,997	8,999	8,999	9,000	9,000
20	8,994	8,995	8,995	8,993	8,995	8,993	8,992	8,995	8,996	8,999
21	8,990	8,989	8,990	8,988	8,989	8,991	8,990	8,995	8,991	8,993
22	8,992	8,990	8,989	8,988	8,988	8,990	8,990	8,993	8,992	8,991
23	8,992	8,989	8,990	8,990	8,987	8,989	8,991	8,994	8,993	8,993
24	8,992	8,991	8,988	8,988	8,987	8,987	8,990	8,993	8,993	8,992
25	8,996	8,986	8,988	8,987	8,986	8,988	8,988	8,991	8,990	8,992
26	8,997	8,990	8,990	8,987	8,988	8,990	8,990	8,991	8,993	8,998
27	8,996	8,990	8,991	8,987	8,988	8,987	8,992	8,991	8,996	8,995
28	8,997	8,993	8,987	8,987	8,988	8,989	8,988	8,991	8,994	8,993
29	8,998	8,991	8,985	8,985	8,983	8,987	8,990	8,988	8,990	8,992
30	8,998	8,986	8,981	8,986	8,978	8,984	8,984	8,985	8,992	8,996

RADIO 12 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	11,990	11,984	11,982	11,981	11,982	11,981	11,979	11,986	11,986	11,989
2	11,989	11,982	11,981	11,982	11,980	11,980	11,983	11,986	11,987	11,990
3	11,990	11,984	11,983	11,981	11,980	11,983	11,982	11,986	11,987	11,987
4	11,990	11,986	11,985	11,983	11,985	11,987	11,987	11,989	11,993	11,995
5	11,992	11,987	11,986	11,986	11,985	11,987	11,989	11,991	11,993	11,992
6	11,994	11,990	11,990	11,989	11,990	11,991	11,994	11,994	11,998	11,997
7	11,995	11,994	11,994	11,993	11,993	11,996	11,998	12,003	12,003	12,004
8	11,997	11,993	11,991	11,995	11,993	11,997	11,998	12,000	12,002	12,005
9	12,001	11,996	11,997	11,996	11,998	12,003	12,003	12,004	12,005	12,007
10	12,001	11,998	11,998	11,999	11,999	12,003	12,004	12,004	12,006	12,007
11	12,000	11,997	12,000	11,997	11,999	12,001	12,003	12,003	12,006	12,004
12	12,000	12,000	11,999	11,997	12,001	12,003	12,001	12,006	12,005	12,005
13	11,998	11,996	11,993	11,992	11,993	11,994	11,989	11,997	11,996	11,995
14	12,002	11,997	11,997	11,995	11,993	11,993	11,991	11,991	11,991	11,994
15	12,001	11,996	11,994	11,994	11,992	11,990	11,989	11,992	11,991	11,990
16	11,997	11,996	11,994	11,993	11,992	11,992	11,991	11,992	11,992	11,993
17	11,997	11,995	11,993	11,994	11,994	11,994	11,992	11,993	11,990	11,993
18	11,996	11,994	11,994	11,991	11,992	11,991	11,992	11,989	11,991	11,992
19	11,995	11,993	11,994	11,992	11,992	11,990	11,990	11,992	11,991	11,993
20	11,995	11,993	11,991	11,989	11,990	11,990	11,988	11,990	11,993	11,992
21	11,994	11,991	11,988	11,987	11,988	11,988	11,988	11,989	11,990	11,992
22	11,994	11,988	11,992	11,989	11,987	11,991	11,990	11,992	11,993	11,993
23	11,996	11,990	11,990	11,988	11,989	11,989	11,991	11,993	11,994	11,997
24	11,995	11,988	11,989	11,986	11,987	11,988	11,989	11,992	11,996	11,996
25	11,998	11,994	11,993	11,991	11,992	11,996	11,996	12,000	12,000	12,002
26	11,998	11,990	11,991	11,989	11,993	11,995	11,995	11,998	12,003	12,008
27	11,998	11,993	11,993	11,991	11,994	11,995	11,998	12,000	12,005	12,008
28	12,002	11,996	11,996	11,992	11,995	11,998	11,999	12,003	12,005	12,010
29	12,001	11,992	11,992	11,991	11,993	11,995	11,996	12,002	12,005	12,005
30	12,002	11,996	11,994	11,991	11,991	11,994	11,995	12,005	12,009	12,000

RADIO 15 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1			14,982			14,978	14,980	14,980	14,989	14,984
2			14,982			14,983	14,982	14,983	14,987	14,986
3	14,988		14,982			14,981	14,982	14,984	14,988	14,988
4	14,994	14,988	14,990	14,986	14,987	14,980	14,986	14,983	14,988	14,984
5	14,995	14,990	14,986	14,986	14,987	14,985	14,983	14,986	14,988	14,989
6	14,990	14,989	14,986	14,988	14,986	14,986	14,991	14,989	14,989	14,989
7	14,992	14,988	14,985	14,988	14,987	14,990	14,993	14,992	14,994	14,992
8	14,991	14,989	14,988	14,991	14,990	14,992	14,996	14,991	14,993	14,996
9	14,993	14,988	14,987	14,989	14,990	14,992	14,995	14,994	14,995	14,996
10	14,995	14,995	14,991	14,993	14,991	14,995	14,996	14,995	14,994	14,997
11	14,996	14,995	14,993	14,995	14,997	14,997	14,998	14,998	14,999	14,999
12	14,995	14,992	14,993	14,993	14,993	14,993	14,995	14,996	14,997	14,998
13	14,999	14,998	14,999	14,999	14,996	14,996	14,995	14,998	14,999	14,999
14	14,993	14,996	14,997	14,994	14,995	14,998	14,996	14,995	14,996	14,996
15	14,996	15,000	14,998	14,999	14,997	14,995	14,994	14,995	14,996	14,995
16	14,997	14,994	14,998	14,996	15,000	14,993	14,993	14,993	14,993	14,992
17	15,000	15,001	15,002	15,000	15,001	14,995	14,992	14,993	14,994	14,997
18	14,997	14,998	14,996	14,998	15,000	14,995	14,992	14,995	14,993	14,992
19	15,000	14,998	14,998	14,999	15,000	14,991	14,991	14,991	14,991	14,990
20	14,997	14,998	14,998	14,998	14,998	14,991	14,991	14,994	14,993	14,992
21	14,995	14,994	14,996	14,995	14,997	14,991	14,989	14,990	14,994	14,992
22	14,996	14,995	14,994	14,993	14,995	14,986	14,988	14,988	14,990	14,988
23	14,996	14,993	14,992	14,993	14,991	14,987	14,986	14,986	14,990	14,987
24	14,991	14,989	14,989	14,988	14,987	14,986	14,986	14,986	14,991	14,986
25	14,989	14,987	14,984	14,983	14,984	14,994	14,996	14,988	14,993	15,000
26	14,986	14,983	14,980	14,981	14,980	14,986	14,983	14,988	14,990	14,991
27	14,983	14,981	14,978	14,976	14,975	14,988	14,987	14,986	14,990	14,993
28						14,984	14,984	14,991	14,991	14,991
29						14,982	14,986	14,984	14,989	14,990
30						14,980	14,990		14,986	14,993

RADIO 20 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	19,992	19,991	14,982	19,991	19,992		19,993	19,989		
2	19,987	19,990	14,982	19,988	19,987	19,987	19,990	19,991	19,993	19,996
3	19,990	19,991	14,982	19,992	19,989	19,991	19,996	19,994	19,995	19,999
4	19,990	19,993	14,990	19,991	19,991	19,990	19,994	19,995	19,998	19,999
5	19,988	19,989	14,986	19,989	19,988	19,990	19,992	19,993	19,994	19,997
6	19,991	19,990	14,986	19,990	19,990	19,989	19,993	19,992	19,994	19,996
7	19,991	19,989	14,985	19,990	19,990	19,989	19,992	19,993	19,994	19,995
8	19,989	19,990	14,988	19,989	19,988	19,989	19,990	19,991	19,991	19,995
9	19,993	19,994	14,987	19,992	19,990	19,992	19,994	19,997	19,998	19,996
10	19,993	19,994	14,991	19,993	19,993	19,996	19,994	19,996	19,995	19,998
11	19,996	19,997	14,993	19,996	19,994	19,996	19,998	19,999	19,999	20,001
12	19,994	19,996	14,993	19,994	19,994	19,995	19,996	19,998	19,999	20,001
13	19,995	19,996	14,999	19,997	19,997	19,994	19,997	19,997	19,999	20,000
14	19,997	19,997	14,997	19,995	19,994	19,994	19,999	19,999	20,001	20,000
15	19,996	19,996	14,998	19,995	19,995	19,994	19,998	19,995	19,995	19,996
16	19,998	19,997	14,998	19,994	19,994	19,996	19,997	19,996	19,994	19,997
17	19,997	19,997	15,002	19,995	19,995	19,994	19,996	19,994	19,993	19,995
18	19,997	20,000	14,996	19,998	19,997	19,995	19,997	20,002	19,996	19,997
19	19,996	19,995	14,998	19,994	19,993	19,997	19,997	19,995	19,994	19,998
20	19,996	19,996	14,998	19,995	19,996	19,992	19,998	19,996	19,997	19,996
21	19,995	19,995	14,996	19,994	19,995	19,993	19,996	19,994	19,997	19,998
22	19,995	19,996	14,994	19,993	19,993	19,993	19,996	19,996	20,001	19,999
23	19,992	19,993	14,992	19,991	19,992	19,992	19,994	19,994	19,994	19,997
24	19,994	19,993	14,989	19,994	19,995	19,994	19,998	19,997	19,997	19,998
25	19,989	19,990	14,984	19,990	19,990	19,991	19,990	19,991	19,995	19,994
26	19,986	19,984	14,980	19,986	19,986	19,988	19,992	19,989	19,993	19,995
27	19,986	19,989	14,978	19,987	19,987	19,991	19,993	19,993	19,995	19,998
28	19,985	19,987		19,985	19,987	19,989	19,994	19,995	19,997	19,996
29	19,991	19,986		19,985	19,986	19,987	19,990	19,993	19,997	19,998
30		19,980		19,980					19,996	20,001

5.2.1.2.2. H70 (Espesor 70 mm)

RADIO 3 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	2,980	2,970		2,942	2,948		2,955	2,957	2,963	2,979
2	2,978	2,971		2,948	2,950		2,956	2,958	2,964	2,978
3	2,976	2,972		2,954	2,953		2,957	2,959	2,965	2,977
4	2,975	2,973	2,964	2,961	2,957	2,955	2,957	2,960	2,966	2,976
5	2,975	2,973	2,966	2,964	2,961	2,958	2,958	2,961	2,967	2,976
6	2,975	2,973	2,966	2,966	2,964	2,963	2,962	2,966	2,969	2,980
7	2,977	2,977	2,969	2,970	2,972	2,969	2,968	2,970	2,977	2,982
8	2,980	2,980	2,973	2,976	2,980	2,978	2,975	2,980	2,980	2,985
9	2,981	2,984	2,980	2,982	2,986	2,985	2,983	2,985	2,987	2,989
10	2,986	2,989	2,986	2,987	2,988	2,990	2,990	2,994	2,991	2,992
11	2,989	2,991	2,990	2,992	2,994	2,995	2,993	2,995	2,995	2,994
12	2,995	2,998	2,996	2,996	2,998	3,000	3,000	3,002	2,999	2,996
13	2,999	3,001	2,999	3,002	3,001	3,006	3,003	3,005	3,002	2,998
14	3,000	3,003	3,004	3,002	3,005	3,006	3,005	3,006	3,004	2,997
15	3,002	2,999	3,004	3,001	3,000	3,003	3,005	3,006	3,003	3,000
16	3,001	2,997	3,003	2,999	3,000	3,008	3,007	3,004	3,004	3,001
17	3,002	3,000	3,003	3,000	2,999	3,004	3,006	3,008	3,003	2,999
18	3,001	3,001	3,003	3,000	2,997	3,001	3,003	3,005	3,003	2,997
19	3,001	2,998	3,002	2,998	2,993	3,001	3,000	3,003	3,002	2,999
20	3,002	2,996	2,999	2,996	2,992	2,993	2,996	2,995	2,997	2,999
21	2,997	2,992	2,995	2,987	2,988	2,989	2,991	2,992	2,995	2,997
22	2,994	2,985	2,989	2,980	2,978	2,984	2,983	2,984	2,989	2,993
23	2,989	2,980	2,982	2,977	2,969	2,974	2,977	2,978	2,982	2,991
24	2,985	2,973	2,977	2,964	2,962	2,961	2,968	2,968	2,976	2,989
25	2,976	2,969	2,965	2,957	2,952	2,955	2,959	2,964	2,972	2,984
26	2,972	2,959	2,956	2,950	2,946	2,961	2,952	2,958	2,967	2,981
27	2,968	2,955	2,953	2,940	2,934	2,966	2,948			
28	2,964	2,952	2,950	2,931						
29		2,949	2,947	2,921						
30		2,946	2,944	2,912						

RADIO 5 mm

Punto	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
1	4,966		4,948	4,952	4,944			4,940		4,957
2	4,969		4,952	4,954	4,947			4,945	4,954	4,956
3	4,972	4,965	4,955	4,956	4,950	4,943	4,945	4,950	4,964	4,956
4	4,976	4,970	4,959	4,958	4,955	4,951	4,953	4,954	4,970	4,961
5	4,979	4,973	4,965	4,960	4,963	4,957	4,956	4,960	4,975	4,964
6	4,984	4,977	4,969	4,964	4,967	4,966	4,962	4,965	4,977	4,967
7	4,985	4,978	4,972	4,971	4,973	4,967	4,968	4,969	4,982	4,967
8	4,988	4,981	4,976	4,976	4,981	4,972	4,972	4,974	4,988	4,974
9	4,990	4,986	4,982	4,981	4,985	4,980	4,977	4,981	4,993	4,981
10	4,992	4,986	4,984	4,988	4,990	4,983	4,983	4,983	4,998	4,984
11	4,991	4,988	4,987	4,988	4,992	4,991	4,984	4,987	5,001	4,986
12	4,996	4,991	4,995	4,996	4,997	4,993	4,991	4,989	5,004	4,988
13	5,000	4,993	4,996	4,996	4,998	4,998	4,994	4,993	5,007	4,997
14	5,003	4,997	4,998	5,000	5,001	4,997	4,995	4,995	5,004	4,995
15	4,998	4,996	4,996	5,000	4,997	4,998	4,996	4,996	5,001	4,995
16	5,000	4,996	4,996	4,997	4,995	4,998	4,996	4,996	5,001	4,994
17	5,000	4,996	4,999	5,002	4,998	4,999	4,998	4,997	5,001	4,999
18	5,002	4,998	4,998	5,000	4,998	4,997	4,999	4,998	4,999	5,001
19	4,999	4,998	4,997	4,997	4,995	4,995	4,996	4,997	4,995	5,000
20	4,999	4,997	4,995	4,997	4,992	4,992	4,994	4,999	4,993	5,000
21	4,997	4,992	4,993	4,993	4,988	4,992	4,994	4,997	4,994	5,001
22	4,996	4,989	4,989	4,991	4,983	4,987	4,992	4,991	4,991	5,001
23	4,992	4,987	4,985	4,985	4,980	4,983	4,986	4,988	4,983	4,996
24	4,988	4,983	4,979	4,980	4,975	4,979	4,980	4,987	4,976	4,991
25	4,987	4,976	4,973	4,973	4,969	4,975	4,974	4,978	4,971	4,984
26	4,984	4,974	4,971	4,972	4,962	4,964	4,968	4,973	4,964	4,982
27	4,979	4,970	4,964		4,959	4,963	4,967	4,973	4,966	4,981
28	4,980		4,959			4,958	4,965	4,970	4,960	4,981
29	4,981		4,954			4,953	4,962	4,967		4,979
30	4,982		4,949			4,949	4,959	4,964		4,977

RADIO 9 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	8,967	8,956	8,956	8,939	8,947	8,939	8,948	8,955	8,967	8,966
2	8,977	8,963	8,959	8,947	8,953	8,950	8,952	8,962	8,974	8,972
3	8,982	8,970	8,963	8,955	8,961	8,956	8,961	8,966	8,980	8,974
4	8,979	8,972	8,968	8,961	8,969	8,964	8,965	8,972	8,985	8,978
5	8,983	8,976	8,969	8,969	8,969	8,970	8,967	8,972	8,989	8,981
6	8,985	8,982	8,977	8,972	8,977	8,971	8,974	8,977	8,990	8,983
7	8,987	8,981	8,980	8,979	8,981	8,979	8,976	8,980	8,994	8,983
8	8,988	8,984	8,985	8,983	8,986	8,982	8,986	8,987	8,999	8,989
9	8,991	8,990	8,991	8,989	8,993	8,990	8,989	8,994	9,006	8,995
10	8,995	8,994	8,991	8,992	8,996	8,994	8,994	8,997	9,008	8,998
11	8,996	8,993	8,994	8,995	8,997	8,993	8,993	8,997	9,007	8,996
12	8,994	8,994	8,994	8,994	8,997	8,993	8,992	8,995	9,004	8,994
13	8,998	8,997	8,996	8,998	9,000	8,996	8,992	8,996	9,002	8,998
14	8,998	8,996	8,997	8,999	8,998	8,995	8,994	8,992	8,999	8,997
15	8,998	8,991	8,995	8,997	8,996	8,989	8,991	8,991	8,997	8,994
16	9,000	8,997	8,998	9,000	8,994	8,993	8,993	8,995	8,998	8,993
17	9,003	8,998	9,002	8,999	8,998	8,995	8,993	8,996	8,995	8,995
18	8,999	8,996	8,995	8,998	8,992	8,990	8,988	8,990	8,988	8,989
19	8,995	8,992	8,993	8,996	8,990	8,986	8,986	8,986	8,980	8,987
20	8,996	8,993	8,995	8,992	8,989	8,990	8,989	8,991	8,985	8,994
21	8,998	8,990	8,989	8,988	8,988	8,988	8,987	8,988	8,982	8,988
22	8,989	8,986	8,987	8,985	8,983	8,984	8,983	8,984	8,977	8,988
23	8,991	8,986	8,983	8,981	8,977	8,979	8,977	8,981	8,971	8,981
24	8,991	8,980	8,976	8,974	8,972	8,974	8,976	8,973	8,966	8,977
25	8,987	8,980	8,974	8,972	8,970	8,969	8,972	8,973	8,962	8,975
26	8,979	8,972	8,972	8,965	8,960	8,963	8,962	8,967	8,955	8,970
27	8,975	8,967	8,962	8,960	8,956	8,957	8,959	8,963	8,954	8,977
28	8,972	8,967	8,959	8,956	8,956	8,957	8,960	8,962	8,955	8,970
29	8,975	8,969	8,958	8,954	8,956	8,952	8,957	8,963	8,952	8,967
30	8,978	8,972	8,957	8,952	8,956	8,947	8,958	8,962	8,948	8,962

RADIO 12 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1		11,958	11,952	11,958		11,956	11,955	11,965	11,979	11,974
2		11,969	11,961	11,960		11,961	11,963	11,968	11,982	11,977
3	11,984	11,972	11,969	11,961	11,969	11,964	11,966	11,973	11,988	11,980
4	11,983	11,978	11,969	11,964	11,971	11,966	11,970	11,973	11,989	11,985
5	11,985	11,980	11,975	11,971	11,975	11,970	11,976	11,979	11,993	11,983
6	11,986	11,980	11,975	11,976	11,978	11,974	11,975	11,978	11,994	11,984
7	11,988	11,982	11,979	11,975	11,983	11,973	11,975	11,978	11,993	11,983
8	11,988	11,985	11,981	11,979	11,985	11,980	11,983	11,985	11,998	11,988
9	11,993	11,991	11,987	11,990	11,991	11,982	11,986	11,988	11,998	11,992
10	11,995	11,990	11,994	11,990	11,995	11,986	11,988	11,988	12,001	11,992
11	11,996	11,992	11,991	11,991	11,993	11,984	11,986	11,989	11,998	11,990
12	11,997	11,993	11,990	11,993	11,995	11,987	11,984	11,988	11,998	11,991
13	12,001	11,998	11,995	11,998	11,997	11,987	11,986	11,998	12,000	11,992
14	11,995	11,992	11,993	11,994	11,990	11,983	11,984	11,986	11,989	11,988
15	11,996	11,994	11,997	11,993	11,992	11,983	11,985	11,986	11,988	11,989
16	11,997	11,994	11,993	11,993	11,991	11,984	11,984	11,985	11,986	11,989
17	11,997	11,993	11,992	11,996	11,989	11,982	11,986	11,986	11,984	11,985
18	11,997	11,993	11,992	11,991	11,988	11,983	11,983	11,983	11,982	11,987
19	11,994	11,989	11,988	11,990	11,983	11,977	11,978	11,980	11,972	11,983
20	11,992	11,987	11,987	11,985	11,983	11,976	11,977	11,978	11,974	11,981
21	11,989	11,985	11,983	11,985	11,979	11,980	11,980	11,980	11,976	11,985
22	11,990	11,984	11,984	11,984	11,982	11,979	11,980	11,982	11,974	11,984
23	11,985	11,979	11,978	11,977	11,973	11,973	11,977	11,979	11,969	11,979
24	11,982	11,977	11,975	11,974	11,970	11,972	11,976	11,976	11,964	11,977
25	11,982	11,976	11,970	11,970	11,967	11,969	11,969	11,971	11,963	11,975
26	11,978	11,973	11,966	11,964	11,960	11,964	11,968	11,975	11,961	11,975
27	11,974	11,966	11,965	11,958	11,958	11,961	11,963	11,967	11,959	11,969
28	11,972	11,965	11,959	11,960	11,955	11,962	11,965	11,972	11,963	11,973
29	11,972	11,963	11,962	11,960	11,953	11,962	11,966	11,971	11,963	11,973
30	11,972	11,962	11,966	11,961	11,951	11,958	11,961	11,966	11,964	11,971

RADIO 15 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	14,984	14,972	14,959	14,954	14,952	14,950	14,949	14,951	14,958	14,960
2	14,983	14,968	14,959	14,953	14,950	14,944	14,949	14,950	14,956	14,958
3	14,982	14,971	14,960	14,954	14,948	14,945	14,950	14,949	14,955	14,957
4	14,982	14,969	14,963	14,958	14,957	14,950	14,953	14,954	14,958	14,960
5	14,981	14,972	14,967	14,962	14,960	14,960	14,962	14,961	14,970	14,973
6	14,989	14,981	14,974	14,973	14,974	14,974	14,977	14,985	14,988	14,990
7	14,992	14,986	14,986	14,983	14,984	14,990	14,995	14,999	15,006	15,012
8	14,993	14,991	14,990	14,990	14,992	14,996	15,003	15,009	15,013	15,016
9	14,991	14,990	14,991	14,994	14,994	15,000	15,001	15,008	15,015	15,015
10	14,996	14,993	14,994	14,994	14,998	15,003	15,006	15,008	15,015	15,016
11	14,997	14,996	14,996	14,996	15,001	15,003	15,004	15,009	15,008	15,014
12	14,994	14,997	14,996	14,996	14,996	15,002	15,003	15,005	15,009	15,009
13	14,995	14,993	14,994	14,997	14,995	14,996	14,997	15,001	15,001	15,003
14	14,994	14,994	14,993	14,994	14,994	14,995	14,993	14,997	14,994	14,998
15	14,996	14,993	14,991	14,994	14,990	14,993	14,992	14,994	14,993	14,996
16	14,996	14,993	14,986	14,988	14,988	14,988	14,985	14,988	14,988	14,990
17	14,997	14,990	14,987	14,985	14,985	14,984	14,983	14,985	14,981	14,987
18	14,996	14,988	14,985	14,983	14,982	14,979	14,976	14,983	14,978	14,982
19	14,996	14,987	14,987	14,983	14,980	14,976	14,974	14,979	14,976	14,976
20	14,994	14,985	14,981	14,977	14,973	14,975	14,968	14,978	14,971	14,974
21	14,991	14,980	14,977	14,975	14,970	14,967	14,967	14,972	14,966	14,972
22	14,984	14,981	14,972	14,968	14,963	14,963	14,961	14,967	14,968	14,967
23	14,983	14,972	14,966	14,963	14,961	14,959	14,958	14,964	14,962	14,966
24	14,983	14,976	14,968	14,966	14,961	14,960	14,961	14,968	14,966	14,972
25	14,984	14,975	14,972	14,971	14,971	14,977	14,976	14,985	14,986	14,995
26	14,991	14,985	14,980	14,979	14,982	14,988	14,994	15,007	15,006	15,014
27	14,987	14,979	14,977	14,978	14,979	14,985	14,993	15,003	15,009	15,016
28	14,987	14,980	14,979	14,982	14,982	14,988	14,995	15,005	15,011	15,020
29	14,985	14,980	14,976	14,977	14,982	14,991	14,995	15,007	15,013	15,022
30	14,982	14,984	14,970	14,978	14,988	14,984	14,992	15,007	15,012	15,023

RADIO 20 mm

	z-1,5	z-4	z-8	z-12	z-16	z-24	z-28	z-32	z-36	z-38,5
Punto	Radio real									
1	19,871	19,863	19,856	19,850	19,860	19,854	19,854	19,867	19,869	19,874
2	19,875	19,866	19,860	19,859	19,858	19,864	19,857	19,865	19,875	19,881
3	19,881	19,876	19,869	19,866	19,867	19,868	19,866	19,874	19,883	19,891
4	19,891	19,887	19,880	19,878	19,877	19,878	19,871	19,885	19,892	19,894
5	19,896	19,892	19,890	19,888	19,887	19,886	19,882	19,891	19,894	19,901
6	19,910	19,902	19,900	19,900	19,898	19,899	19,896	19,899	19,907	19,909
7	19,916	19,912	19,911	19,909	19,908	19,908	19,905	19,908	19,916	19,917
8	19,927	19,922	19,917	19,916	19,917	19,917	19,916	19,920	19,924	19,923
9	19,937	19,935	19,932	19,932	19,933	19,933	19,929	19,935	19,937	19,937
10	19,946	19,940	19,939	19,939	19,940	19,941	19,940	19,943	19,945	19,943
11	19,954	19,955	19,953	19,954	19,952	19,952	19,953	19,955	19,952	19,954
12	19,961	19,959	19,960	19,959	19,959	19,957	19,959	19,958	19,956	19,960
13	19,968	19,968	19,967	19,971	19,966	19,966	19,969	19,967	19,961	19,961
14	19,970	19,973	19,976	19,971	19,974	19,968	19,972	19,970	19,964	19,963
15	19,975	19,975	19,977	19,976	19,978	19,973	19,980	19,973	19,967	19,968
16	19,975	19,978	19,977	19,977	19,978	19,973	19,979	19,974	19,966	19,965
17	19,975	19,976	19,974	19,973	19,975	19,971	19,978	19,972	19,965	19,967
18	19,970	19,968	19,970	19,969	19,973	19,968	19,972	19,966	19,962	19,957
19	19,961	19,962	19,961	19,964	19,960	19,960	19,967	19,960	19,956	19,949
20	19,954	19,953	19,953	19,955	19,955	19,953	19,959	19,952	19,949	19,945
21	19,947	19,943	19,943	19,944	19,942	19,946	19,949	19,946	19,940	19,942
22	19,937	19,938	19,934	19,935	19,937	19,935	19,941	19,939	19,933	19,935
23	19,925	19,926	19,920	19,922	19,922	19,921	19,925	19,926	19,924	19,925
24	19,919	19,915	19,914	19,915	19,913	19,911	19,919	19,913	19,915	19,915
25	19,907	19,904	19,901	19,901	19,899	19,900	19,906	19,908	19,909	19,910
26	19,895	19,893	19,888	19,888	19,886	19,889	19,897	19,893	19,895	19,901
27	19,889	19,887	19,879	19,880	19,880	19,883	19,885	19,887	19,890	19,895
28	19,885	19,874	19,870	19,869	19,871	19,873	19,877	19,879	19,886	19,890
29	19,874	19,865	19,865	19,862	19,863	19,866	19,870	19,875	19,882	19,889
30	19,871	19,859	19,850	19,850	19,855	19,861	19,864	19,867	19,878	19,887

5.2.1.2.3. H100 (Espesor 100 mm)

RADIO 3 mm

	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	3,009		2,958	2,941	2,948					2,979
2	3,008		2,958	2,947	2,948					2,982
3	3,006	2,969	2,959	2,953	2,948	2,946	2,953			2,985
4	3,000	2,973	2,960	2,958	2,951	2,955	2,954	2,959	2,971	2,987
5	2,999	2,975	2,967	2,959	2,959	2,959	2,958	2,967	2,977	2,987
6	2,997	2,978	2,969	2,968	2,965	2,966	2,971	2,975	2,987	2,991
7	3,001	2,983	2,973	2,970	2,970	2,973	2,974	2,980	2,989	2,995
8	2,998	2,985	2,978	2,977	2,976	2,980	2,980	2,986	2,991	2,995
9	2,996	2,990	2,984	2,985	2,984	2,987	2,984	2,990	2,997	2,996
10	3,001	2,995	2,990	2,988	2,991	2,993	2,990	2,994	2,998	3,000
11	3,000	2,999	2,994	2,992	2,995	2,996	2,993	3,001	3,001	3,002
12	2,998	3,001	2,997	3,000	2,999	3,003	3,002	3,000	3,005	3,002
13	3,000	3,003	3,001	3,000	3,003	3,003	3,000	3,003	3,003	3,000
14	2,997	3,004	3,000	3,000	3,006	3,006	3,004	3,003	3,001	3,004
15	2,999	3,003	3,000	3,003	3,006	3,008	3,006	3,009	3,007	3,007
16	2,998	3,004	3,000	3,001	3,003	3,005	3,001	3,006	3,005	3,003
17	2,995	2,999	2,996	3,001	3,001	3,006	2,999	3,002	3,004	2,999
18	2,992	2,999	2,993	2,999	2,998	2,998	2,998	2,998	3,000	3,001
19	2,994	2,995	2,992	2,994	2,993	2,992	2,993	2,997	2,997	2,995
20	2,991	2,990	2,985	2,987	2,988	2,985	2,990	2,990	2,993	2,991
21	2,992	2,986	2,986	2,983	2,988	2,984	2,985	2,989	2,990	2,987
22	2,991	2,984	2,981	2,980	2,979	2,977	2,979	2,984	2,985	2,989
23	2,989	2,980	2,976	2,975	2,973	2,974	2,976	2,982	2,981	2,985
24	2,988	2,977	2,970	2,967	2,965	2,964	2,968	2,975	2,980	2,982
25	2,987	2,973	2,966	2,963	2,958	2,956	2,964	2,971	2,974	2,982
26	2,986	2,970	2,965	2,960	2,953	2,951	2,959	2,969	2,977	2,983
27	2,985	2,973	2,963	2,954	2,945	2,949	2,954	2,962	2,978	2,984
28	2,992		2,961	2,951	2,939	2,947	2,948		2,980	2,988
29			2,959	2,951		2,946			2,981	
30			2,958	2,951		2,944			2,983	

RADIO 5 mm

	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	4,998	4,963	4,941	4,946	4,939	4,937	4,945	4,951	4,964	4,967
2	4,996	4,965	4,951	4,945	4,943	4,941	4,944	4,951	4,962	4,972
3	5,000	4,970	4,957	4,951	4,949	4,945	4,951	4,955	4,962	4,975
4	5,005	4,971	4,962	4,956	4,955	4,949	4,956	4,959	4,966	4,980
5	5,005	4,973	4,965	4,959	4,959	4,955	4,961	4,964	4,972	4,984
6	5,006	4,974	4,965	4,961	4,962	4,962	4,964	4,972	4,978	4,984
7	5,005	4,973	4,971	4,968	4,964	4,965	4,969	4,975	4,984	4,985
8	5,006	4,977	4,975	4,972	4,972	4,974	4,974	4,982	4,984	4,988
9	5,014	4,985	4,982	4,980	4,979	4,979	4,983	4,987	4,989	4,993
10	5,009	4,986	4,984	4,982	4,981	4,986	4,986	4,991	4,991	4,995
11	5,006	4,988	4,988	4,985	4,982	4,985	4,987	4,992	4,993	4,993
12	5,004	4,986	4,988	4,988	4,986	4,988	4,990	4,994	4,994	4,998
13	5,007	4,988	4,989	4,988	4,986	4,991	4,992	4,996	4,996	4,998
14	5,008	4,994	4,992	4,990	4,990	4,994	4,994	4,999	5,000	5,003
15	5,006	4,996	4,994	4,993	4,992	4,995	4,999	5,006	5,002	5,010
16	5,003	4,996	4,993	4,993	4,990	4,996	4,998	5,003	5,002	5,006
17	5,003	4,996	4,994	4,994	4,984	4,991	4,992	4,999	5,000	5,004
18	5,002	4,995	4,993	4,991	4,986	4,993	4,991	4,998	5,001	5,002
19	4,994	4,994	4,992	4,990	4,984	4,989	4,985	4,995	4,995	5,001
20	4,994	4,994	4,991	4,986	4,980	4,985	4,986	4,992	4,997	5,003
21	4,996	4,993	4,990	4,986	4,981	4,985	4,987	4,992	4,996	5,000
22	4,991	4,993	4,988	4,984	4,984	4,985	4,984	4,990	5,003	5,002
23	4,990	4,994	4,986	4,982	4,979	4,982	4,985	4,994	4,995	5,004
24	4,989	4,992	4,982	4,979	4,977	4,978	4,985	4,989	4,993	5,004
25	4,985	4,985	4,978	4,974	4,972	4,975	4,980	4,983	4,993	5,003
26	4,987	4,984	4,976	4,977	4,971	4,970	4,975	4,986	4,991	5,001
27	4,987	4,986	4,974	4,972	4,967	4,969	4,971	4,981	4,988	5,001
28	4,984	4,979	4,971	4,968	4,963	4,960	4,967	4,976	4,983	4,997
29	4,985	4,980	4,968	4,963	4,960	4,958	4,965	4,966	4,979	4,993
30	4,987	4,973	4,968	4,963	4,960	4,958	4,967	4,956	4,976	4,990

RADIO 9 mm

	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	9,003	8,976	8,957	8,951	8,946	8,944	8,950	8,960	8,974	8,987
2	9,004	8,974	8,961	8,953	8,951	8,952	8,955	8,963	8,973	8,986
3	9,008	8,975	8,963	8,957	8,956	8,958	8,957	8,964	8,974	8,986
4	9,006	8,974	8,965	8,957	8,960	8,956	8,962	8,968	8,977	8,990
5	9,010	8,976	8,966	8,965	8,962	8,961	8,968	8,975	8,978	8,990
6	9,012	8,982	8,974	8,970	8,972	8,970	8,972	8,978	8,986	8,991
7	9,014	8,986	8,980	8,974	8,975	8,977	8,978	8,983	8,987	8,992
8	9,013	8,987	8,983	8,982	8,981	8,979	8,983	8,989	8,988	8,993
9	9,017	8,990	8,988	8,984	8,983	8,984	8,984	8,990	8,990	8,995
10	9,015	8,992	8,987	8,988	8,984	8,987	8,985	8,989	8,989	8,997
11	9,014	8,995	8,991	8,986	8,987	8,987	8,984	8,991	8,988	8,991
12	9,009	8,998	8,994	8,989	8,987	8,988	8,986	8,992	8,993	8,998
13	9,010	9,001	8,995	8,994	8,987	8,990	8,990	8,993	8,996	8,994
14	9,005	8,994	8,996	8,995	8,990	8,987	8,991	8,992	8,993	8,996
15	9,005	8,995	8,994	8,992	8,988	8,988	8,990	8,992	8,992	8,995
16	9,002	8,996	8,993	8,989	8,990	8,986	8,992	8,991	8,992	8,996
17	8,996	8,992	8,990	8,989	8,987	8,982	8,985	8,984	8,985	8,990
18	8,993	8,994	8,990	8,989	8,982	8,984	8,984	8,988	8,987	8,991
19	8,993	8,995	8,990	8,988	8,985	8,982	8,985	8,987	8,986	8,988
20	8,987	8,991	8,986	8,985	8,979	8,980	8,981	8,981	8,982	8,988
21	8,984	8,985	8,982	8,978	8,977	8,977	8,979	8,981	8,986	8,988
22	8,982	8,987	8,983	8,982	8,977	8,976	8,979	8,983	8,987	8,992
23	8,982	8,988	8,984	8,983	8,976	8,978	8,979	8,985	8,990	8,994
24	8,980	8,983	8,980	8,978	8,970	8,971	8,976	8,982	8,987	8,996
25	8,980	8,983	8,977	8,972	8,971	8,974	8,975	8,981	8,990	8,996
26	8,982	8,986	8,981	8,976	8,976	8,975	8,980	8,988	8,992	9,002
27	8,983	8,985	8,981	8,975	8,971	8,973	8,976	8,984	8,995	9,002
28	8,982	8,982	8,973	8,971	8,965	8,965	8,973	8,978	8,987	8,999
29	8,984	8,979	8,970	8,964	8,962	8,963	8,969	8,977	8,984	8,998
30	8,992	8,977	8,968	8,965	8,962	8,959	8,960	8,975	8,987	9,000

RADIO 12 mm

	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	12,002	11,985	11,973	11,963	11,959	11,963	11,960	11,974	11,979	11,992
2	11,999	11,982	11,974	11,967	11,965	11,961	11,967	11,975	11,980	11,992
3	11,999	11,982	11,977	11,967	11,966	11,966	11,967	11,975	11,982	11,993
4	11,999	11,984	11,978	11,972	11,971	11,973	11,970	11,976	11,985	11,992
5	11,998	11,987	11,980	11,974	11,973	11,975	11,971	11,978	11,988	11,994
6	11,999	11,989	11,982	11,977	11,980	11,981	11,976	11,985	11,987	11,994
7	11,999	11,992	11,985	11,982	11,981	11,987	11,980	11,986	11,986	11,993
8	12,001	11,995	11,986	11,981	11,980	11,985	11,979	11,978	11,986	11,990
9	11,998	11,994	11,987	11,982	11,983	11,990	11,979	11,983	11,990	11,989
10	12,002	11,997	11,992	11,989	11,987	11,993	11,986	11,985	11,993	11,996
11	12,006	11,999	11,994	11,995	11,993	12,002	11,990	11,991	11,992	11,999
12	11,996	11,995	11,991	11,989	11,994	12,000	11,993	11,988	11,993	11,997
13	11,998	11,995	11,993	11,995	11,998	12,004	11,993	11,991	11,993	12,001
14	12,001	11,999	11,993	11,993	11,996	12,006	11,994	11,994	11,998	12,000
15	11,995	11,994	11,992	11,989	11,991	11,998	11,991	11,987	11,990	11,994
16	11,999	11,995	11,994	11,990	11,993	11,998	11,990	11,989	11,990	11,996
17	11,998	11,993	11,990	11,988	11,988	11,994	11,990	11,987	11,991	11,996
18	12,000	11,987	11,985	11,985	11,984	11,989	11,986	11,981	11,986	11,996
19	12,003	11,995	11,989	11,985	11,984	11,986	11,988	11,986	11,989	11,997
20	11,998	11,993	11,988	11,983	11,979	11,983	11,981	11,982	11,987	11,996
21	12,003	11,991	11,983	11,982	11,974	11,977	11,981	11,984	11,985	11,994
22	12,000	11,990	11,984	11,982	11,973	11,974	11,981	11,983	11,989	12,000
23	11,998	11,991	11,981	11,982	11,973	11,971	11,982	11,982	11,986	11,996
24	12,001	11,989	11,978	11,976	11,969	11,963	11,976	11,981	11,987	11,991
25	11,999	11,982	11,975	11,969	11,961	11,956	11,972	11,977	11,981	11,989
26	11,999	11,982	11,977	11,969	11,958	11,949	11,971	11,978	11,981	11,989
27	12,004	11,985	11,977	11,968	11,960	11,943	11,971	11,978	11,982	11,994
28	12,003	11,981	11,978	11,967	11,960	11,937	11,977	11,980	11,987	11,998
29	12,001	11,976	11,977	11,968	11,960	11,931	11,968	11,978	11,989	11,997
30	12,000	11,972	11,975	11,968	11,959	11,925	11,972	11,980	11,987	11,996

RADIO 15 mm

	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	15,008	14,992	14,985	14,979	14,970	14,973	14,973	14,982	14,988	15,001
2	15,005	14,990	14,980	14,978	14,971	14,971	14,973	14,980	14,987	14,995
3	15,003	14,993	14,982	14,975	14,972	14,970	14,974	14,987	14,988	14,999
4	14,999	14,986	14,977	14,973	14,969	14,971	14,975	14,983	14,990	14,998
5	14,999	14,989	14,980	14,976	14,972	14,970	14,976	14,985	14,990	14,998
6	14,995	14,985	14,975	14,971	14,969	14,967	14,976	14,979	14,986	14,993
7	15,000	14,990	14,978	14,974	14,971	14,971	14,978	14,983	14,991	14,996
8	14,999	14,985	14,980	14,972	14,970	14,970	14,978	14,981	14,987	14,994
9	15,005	14,988	14,981	14,977	14,976	14,977	14,980	14,987	14,991	14,999
10	15,002	14,990	14,984	14,980	14,980	14,981	14,986	14,991	14,997	15,001
11	15,004	14,989	14,987	14,983	14,984	14,981	14,991	14,989	14,996	14,998
12	15,001	14,991	14,990	14,987	14,985	14,987	14,994	14,996	14,998	15,000
13	15,006	14,992	14,988	14,987	14,988	14,990	14,994	14,994	15,001	15,003
14	15,002	14,992	14,989	14,989	14,988	14,991	14,993	14,993	14,996	15,000
15	15,002	14,992	14,990	14,989	14,989	14,989	14,995	14,994	14,995	14,998
16	15,001	14,993	14,993	14,991	14,991	14,992	14,993	14,993	14,997	14,998
17	14,996	14,992	14,990	14,992	14,987	14,987	14,990	14,991	14,993	14,996
18	14,998	14,992	14,988	14,991	14,992	14,989	14,993	14,995	14,997	14,996
19	14,998	14,994	14,992	14,989	14,991	14,992	14,991	14,998	14,995	14,999
20	15,000	14,994	14,993	14,990	14,989	14,989	14,990	14,994	14,998	14,995
21	15,000	14,990	14,985	14,985	14,980	14,983	14,987	14,992	14,992	14,997
22	15,007	14,992	14,989	14,984	14,980	14,983	14,983	14,990	14,993	14,999
23	15,001	14,988	14,985	14,981	14,978	14,976	14,978	14,986	14,991	14,996
24	15,002	14,990	14,980	14,979	14,971	14,971	14,975	14,981	14,990	14,994
25	14,999	14,985	14,977	14,970	14,969	14,968	14,973	14,978	14,987	14,994
26	15,000	14,988	14,976	14,973	14,968	14,969	14,972	14,981	14,986	14,999
27	15,001	14,986	14,978	14,970	14,964	14,964	14,968	14,983	14,987	14,997
28	15,005	14,985	14,975	14,968	14,963	14,964	14,970	14,980	14,987	14,999
29	15,001	14,986	14,974	14,971	14,965	14,966	14,972	14,981	14,996	15,008
30	15,006	14,986	14,972	14,970	14,961	14,966	14,965	14,985	14,990	15,023

RADIO 20 mm

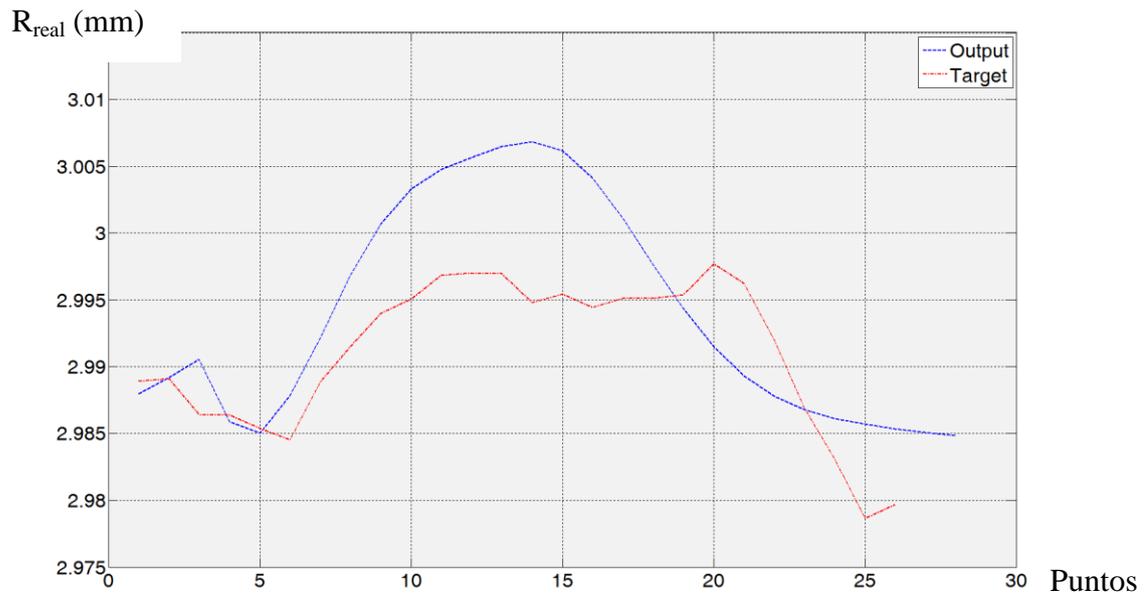
	z-1,5	z-10	z-20	z-30	z-40	z-60	z-70	z-80	z-90	z-98,5
Punto	Radio real									
1	19,997	19,979	19,969	19,962	19,963	19,962	19,966	19,972	19,982	19,988
2	19,996	19,981	19,970	19,966	19,964	19,965	19,966	19,982	19,983	19,986
3	19,997	19,982	19,974	19,970	19,965	19,966	19,972	19,975	19,985	19,991
4	19,999	19,984	19,975	19,971	19,966	19,969	19,971	19,978	19,985	19,992
5	19,997	19,985	19,975	19,973	19,968	19,969	19,969	19,979	19,985	19,991
6	19,998	19,989	19,979	19,974	19,973	19,972	19,976	19,982	19,985	19,990
7	19,998	19,990	19,980	19,975	19,971	19,976	19,975	19,982	19,988	19,992
8	19,999	19,991	19,983	19,977	19,976	19,971	19,974	19,979	19,982	19,986
9	20,000	19,992	19,984	19,981	19,976	19,974	19,979	19,982	19,987	19,990
10	19,999	19,990	19,986	19,979	19,977	19,975	19,977	19,980	19,984	19,990
11	20,001	19,990	19,989	19,983	19,980	19,977	19,983	19,983	19,987	19,994
12	19,995	19,987	19,988	19,982	19,980	19,982	19,984	19,985	19,988	19,992
13	19,998	19,992	19,989	19,988	19,985	19,985	19,985	19,989	19,993	19,994
14	19,999	19,993	19,990	19,987	19,987	19,987	19,985	19,988	19,996	19,994
15	19,992	19,986	19,984	19,981	19,984	19,983	19,983	19,985	19,988	19,992
16	19,993	19,987	19,982	19,984	19,981	19,980	19,984	19,989	19,987	19,991
17	19,996	19,984	19,981	19,979	19,976	19,978	19,979	19,981	19,986	19,991
18	19,998	19,990	19,984	19,982	19,982	19,979	19,981	19,987	19,988	19,993
19	19,998	19,986	19,985	19,982	19,978	19,977	19,982	19,984	19,985	19,993
20	20,001	19,988	19,984	19,981	19,977	19,977	19,980	19,984	19,988	19,994
21	19,999	19,986	19,981	19,979	19,973	19,977	19,980	19,981	19,983	19,994
22	19,995	19,987	19,982	19,976	19,974	19,975	19,979	19,982	19,990	19,994
23	19,997	19,987	19,980	19,977	19,976	19,977	19,976	19,982	19,987	19,989
24	19,996	19,987	19,979	19,973	19,975	19,973	19,979	19,981	19,988	19,992
25	19,993	19,986	19,975	19,968	19,969	19,967	19,971	19,974	19,979	19,985
26	19,997	19,983	19,977	19,970	19,968	19,970	19,972	19,977	19,982	19,988
27	19,998	19,983	19,977	19,975	19,973	19,967	19,971	19,973	19,982	19,990
28	19,996	19,984	19,974	19,964	19,963	19,967	19,967	19,973	19,982	19,988
29	20,000	19,985	19,977	19,970	19,968	19,969	19,970	19,976	19,988	19,993
30	19,999	19,982	19,971	19,966	19,967	19,964	19,966	19,984	19,984	19,990

5.2.2. RESULTADOS DE LA RNA

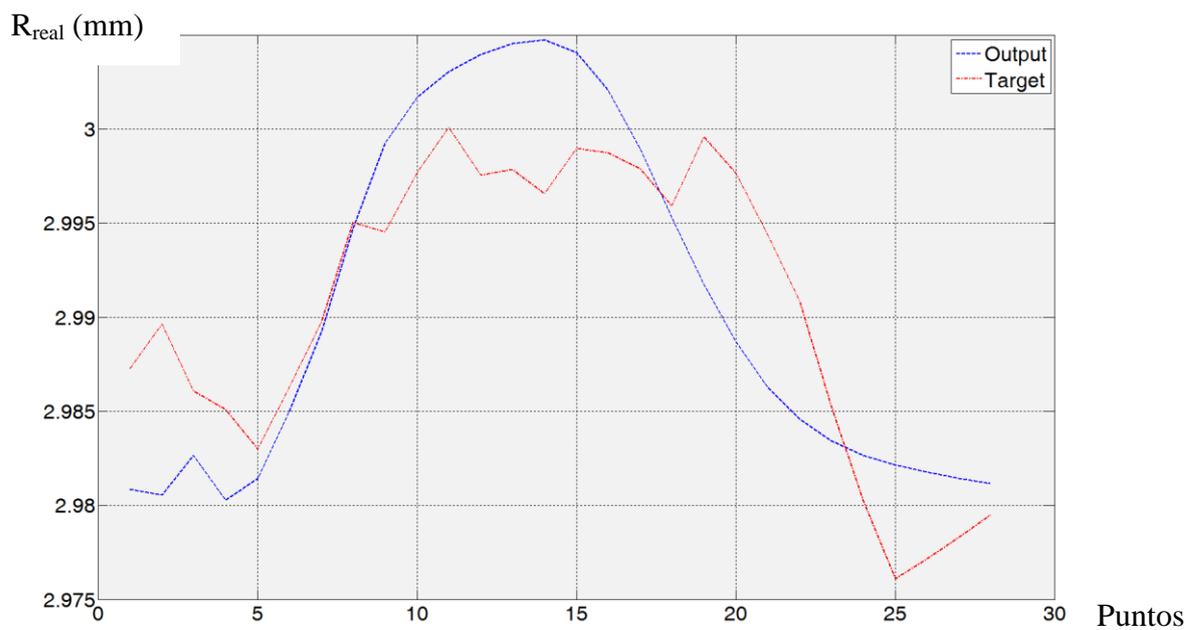
5.2.2.1. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE LA RNA

5.2.2.1.1. H40 R3 (Espesor 40 mm y radio 3 mm)

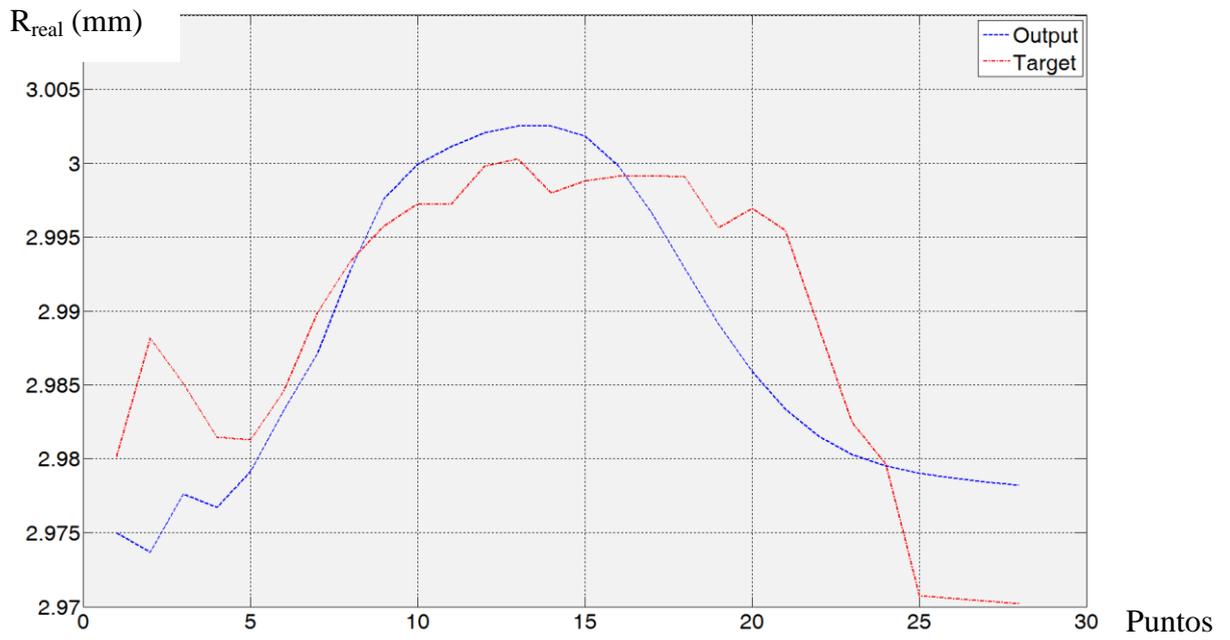
H40R3z-1.5



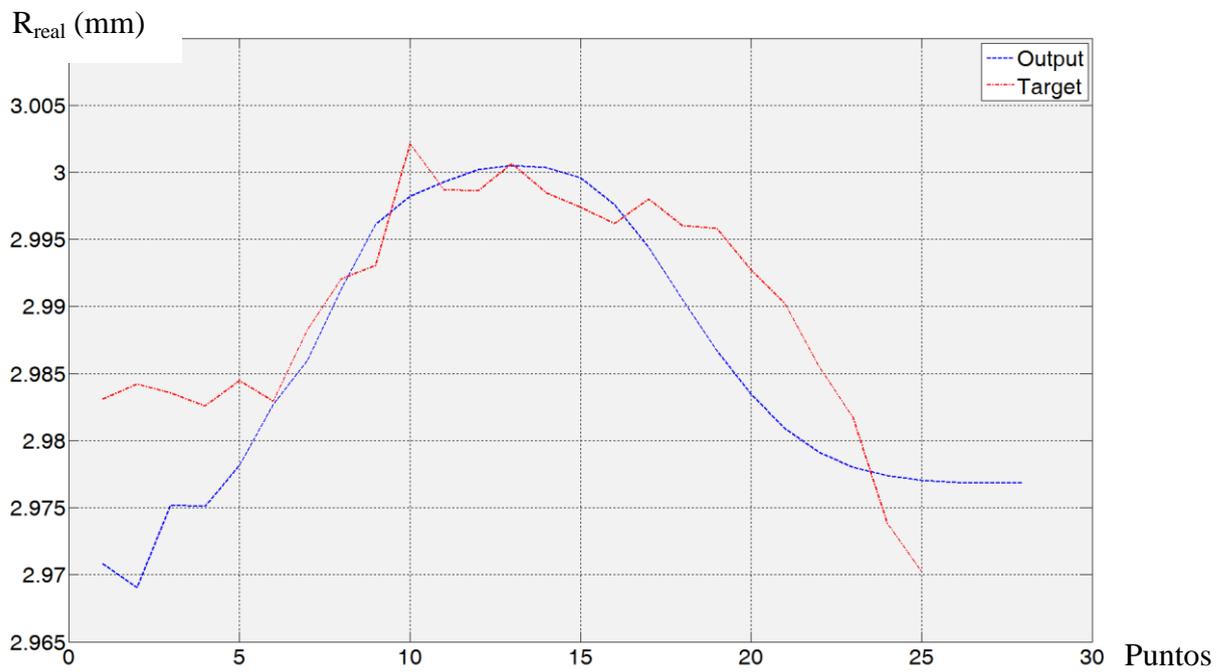
H40R3z-4



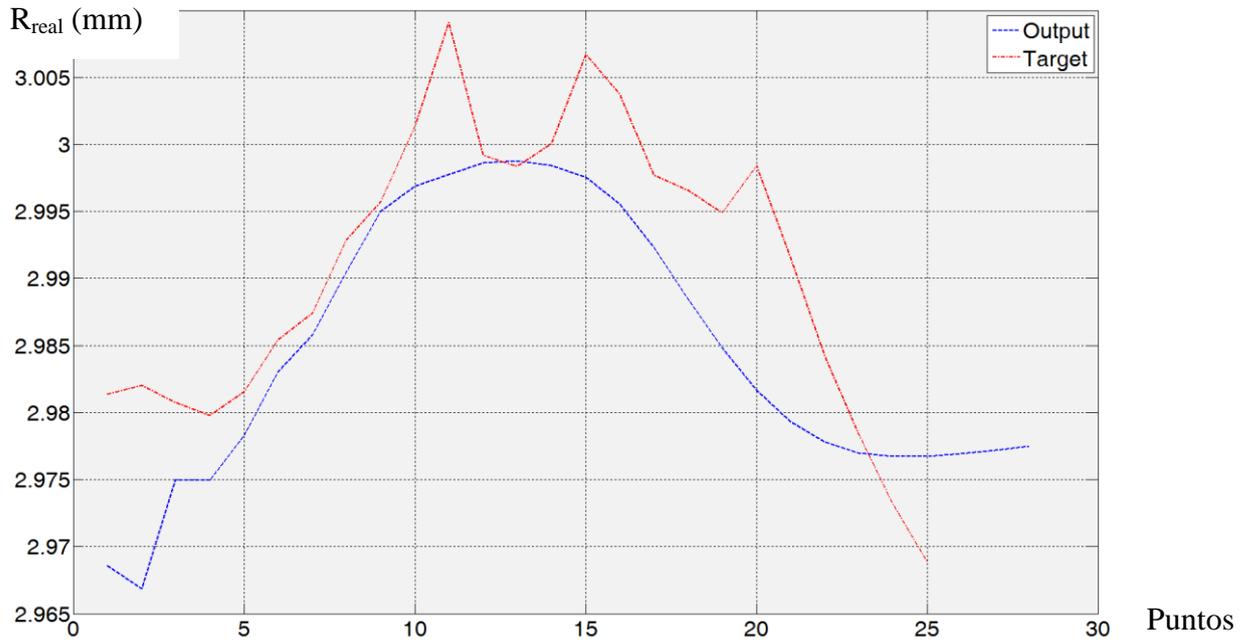
H40R3z-8



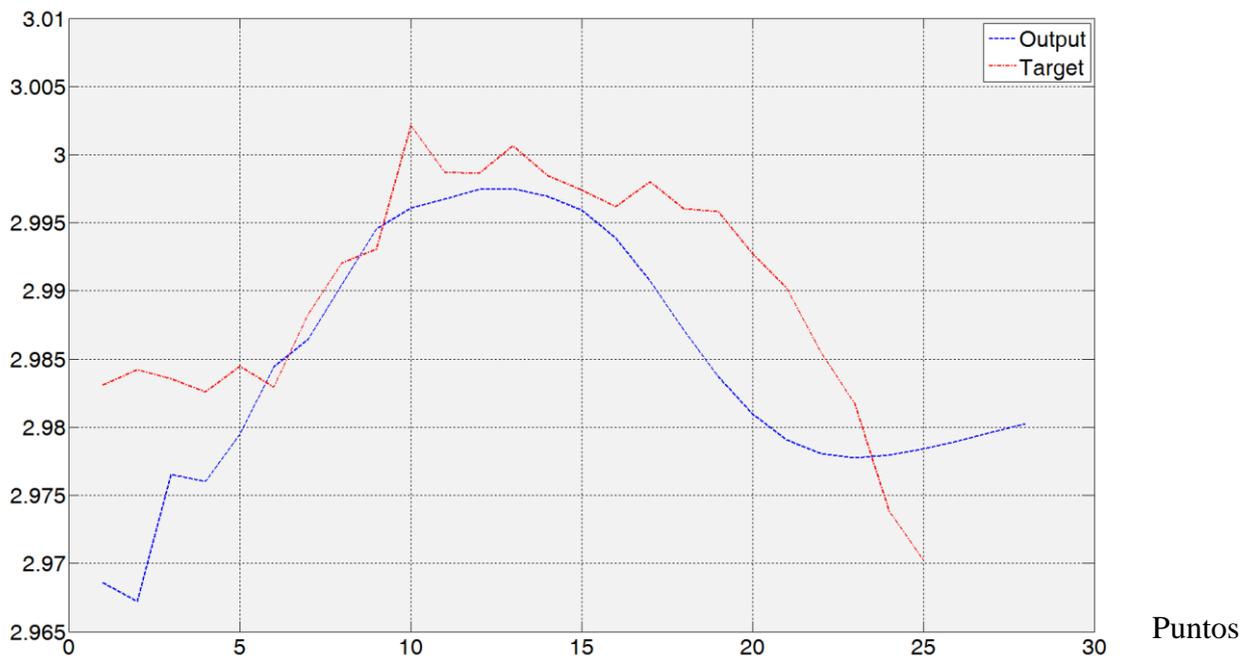
H40R3z-12



H40R3z-16

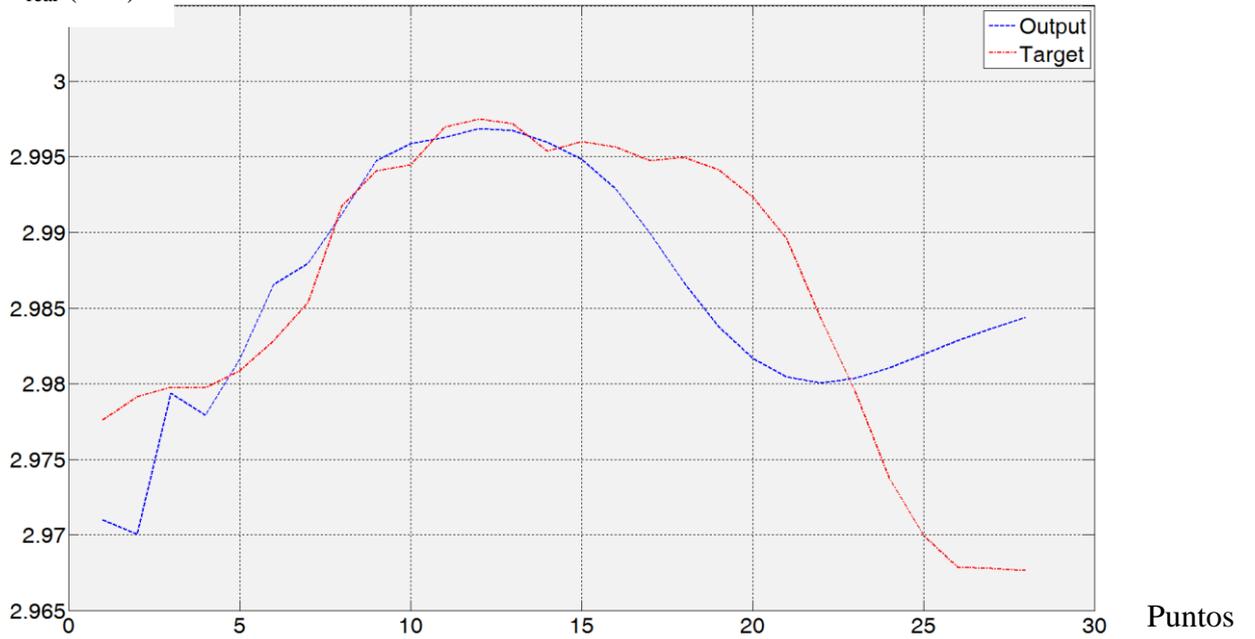


H40R3z-24



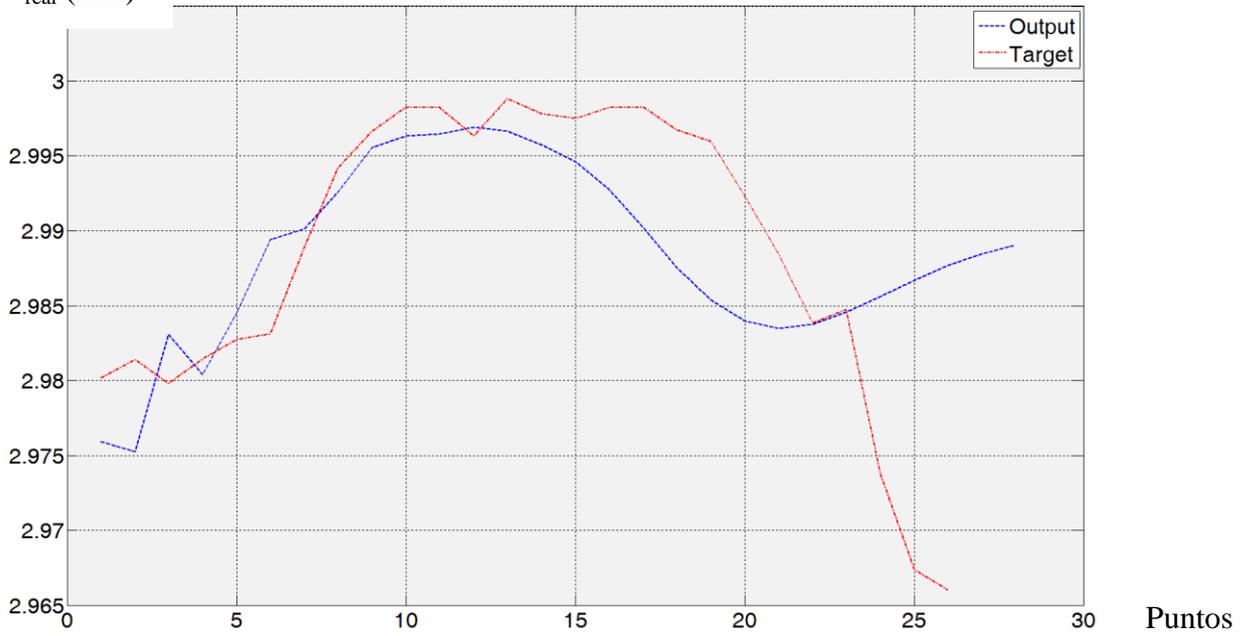
H40R3z-28

R_{real} (mm)

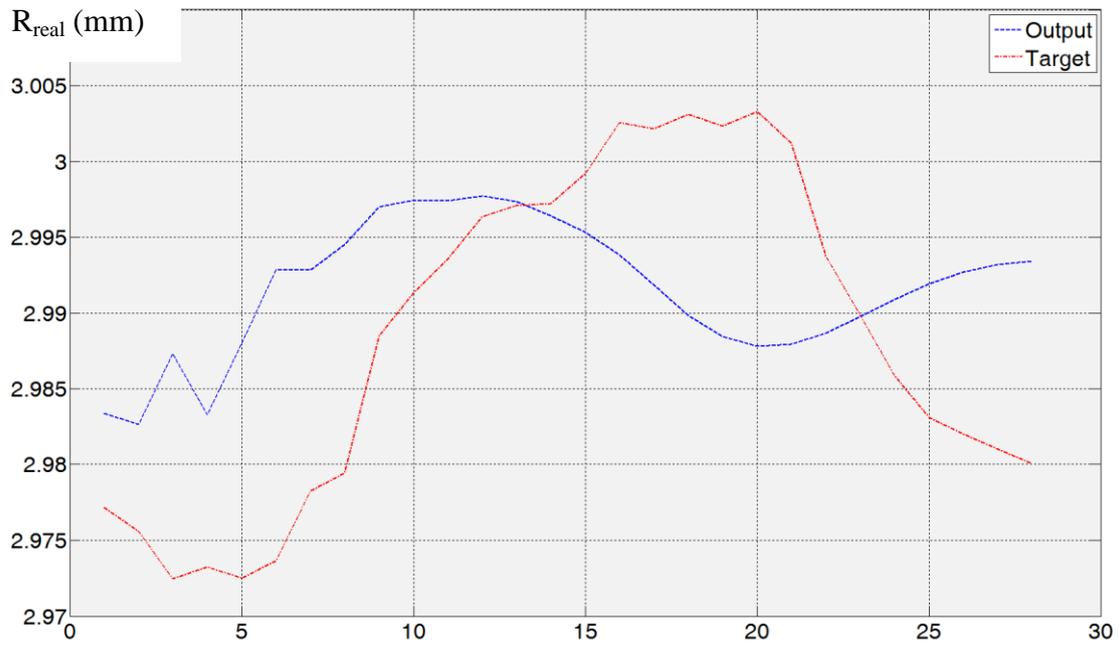


H40R3z-32

R_{real} (mm)

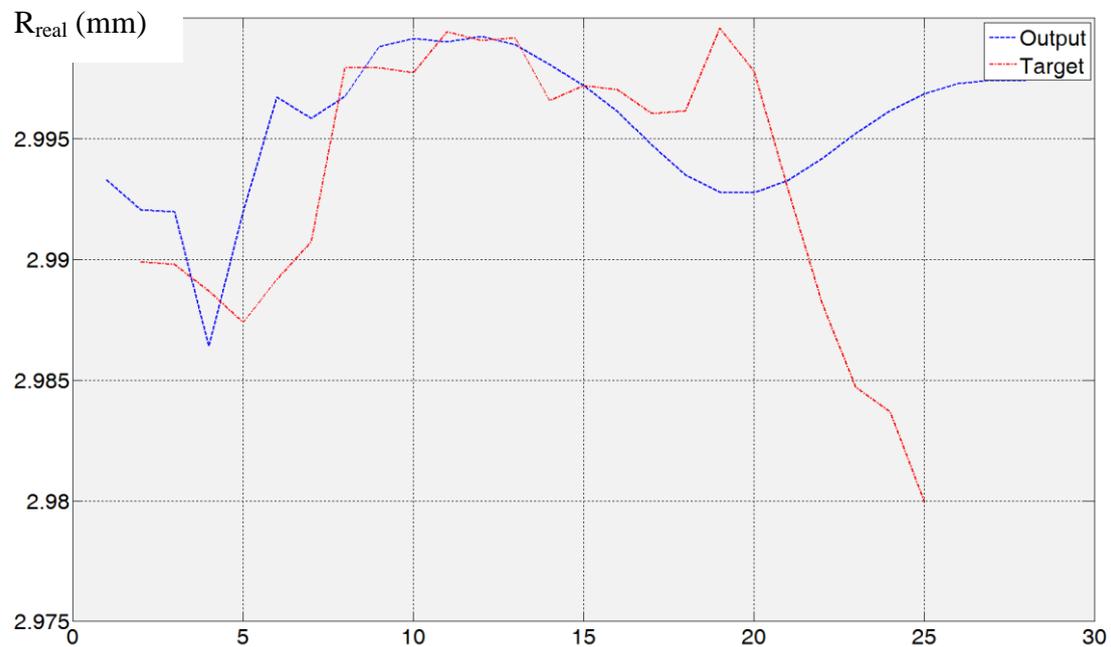


H40R3z-36



Puntos

H40R3z-38.5



Puntos

RESULTADOS DEL RADIO Y ERROR TABULADOS

A continuación se presentan ordenados por planos de medición los resultados de radio real medido mediante la MMC, y los predichos por la red (predicted), así como la diferencia entre ambos valores, es decir, el error.

z-1,5			z-4			z-8		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
2,984		2,984	2,983		2,983			0,000
2,987		2,987	2,985		2,985			0,000
2,989	2,988	-0,002	2,987	2,981	0,006	2,980	2,975	0,005
2,989	2,989	0,003	2,990	2,981	0,009	2,988	2,974	0,014
2,986	2,991	0,001	2,986	2,983	0,003	2,985	2,978	0,008
2,986	2,986	-0,001	2,985	2,980	0,005	2,981	2,977	0,005
2,985	2,985	-0,007	2,983	2,981	0,002	2,981	2,979	0,002
2,985	2,988	-0,012	2,986	2,985	0,001	2,985	2,983	0,001
2,989	2,992	-0,012	2,990	2,989	0,001	2,990	2,987	0,003
2,991	2,997	-0,012	2,995	2,995	0,000	2,993	2,993	0,001
2,994	3,001	-0,011	2,995	2,999	-0,005	2,996	2,998	-0,002
2,995	3,003	-0,011	2,998	3,002	-0,004	2,997	3,000	-0,003
2,997	3,005	-0,010	3,000	3,003	-0,003	2,997	3,001	-0,004
2,997	3,006	-0,010	2,998	3,004	-0,006	3,000	3,002	-0,002
2,997	3,006	-0,009	2,998	3,005	-0,007	3,000	3,002	-0,002
2,995	3,007	-0,009	2,997	3,005	-0,008	2,998	3,003	-0,005
2,995	3,006	-0,006	2,999	3,004	-0,005	2,999	3,002	-0,003
2,994	3,004	-0,003	2,999	3,002	-0,003	2,999	3,000	-0,001
2,995	3,001	0,001	2,998	2,999	-0,001	2,999	2,997	0,003
2,995	2,998	0,004	2,996	2,995	0,001	2,999	2,993	0,006
2,995	2,994	0,006	3,000	2,992	0,008	2,996	2,989	0,007
2,998	2,991	0,010	2,998	2,989	0,009	2,997	2,986	0,011
2,996	2,989	0,009	2,994	2,986	0,008	2,995	2,983	0,012
2,992	2,988	0,006	2,991	2,985	0,006	2,989	2,982	0,007
2,987	2,987	0,001	2,985	2,983	0,002	2,982	2,980	0,002
2,983	2,986	-0,002	2,980	2,983	-0,002	2,980	2,980	0,000
2,979	2,986	-0,006	2,976	2,982	-0,006	2,971	2,979	-0,008
2,980	2,985	-0,005	2,977	2,982	-0,005	2,971	2,979	-0,008
	2,985	-2,985	2,978	2,981	-0,003	2,970	2,978	-0,008
	2,985	-2,985	2,979	2,981	-0,002	2,970	2,978	-0,008

z-12			z-16			z-24		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
2,987		2,987	2,980		2,980	2,987		2,987
2,985		2,985	2,981		2,981	2,985		2,985
2,983	2,971	0,012	2,981	2,969	0,013	2,983	2,969	0,015
2,984	2,969	0,015	2,982	2,967	0,015	2,984	2,967	0,017
2,984	2,975	0,008	2,981	2,975	0,006	2,984	2,977	0,007
2,983	2,975	0,008	2,980	2,975	0,005	2,983	2,976	0,007
2,984	2,978	0,006	2,982	2,978	0,003	2,984	2,980	0,005
2,983	2,983	0,000	2,985	2,983	0,002	2,983	2,984	-0,001
2,988	2,986	0,002	2,987	2,986	0,002	2,988	2,986	0,002
2,992	2,991	0,001	2,993	2,990	0,002	2,992	2,990	0,002
2,993	2,996	-0,003	2,996	2,995	0,001	2,993	2,995	-0,001
3,002	2,998	0,004	3,001	2,997	0,004	3,002	2,996	0,006
2,999	2,999	-0,001	3,009	2,998	0,011	2,999	2,997	0,002
2,999	3,000	-0,002	2,999	2,999	0,001	2,999	2,997	0,001
3,001	3,001	0,000	2,998	2,999	0,000	3,001	2,997	0,003
2,998	3,000	-0,002	3,000	2,998	0,002	2,998	2,997	0,002
2,997	3,000	-0,002	3,007	2,998	0,009	2,997	2,996	0,001
2,996	2,998	-0,001	3,004	2,996	0,008	2,996	2,994	0,002
2,998	2,994	0,004	2,998	2,992	0,005	2,998	2,991	0,007
2,996	2,991	0,006	2,997	2,988	0,008	2,996	2,987	0,009
2,996	2,987	0,009	2,995	2,985	0,010	2,996	2,984	0,012
2,993	2,983	0,009	2,998	2,982	0,017	2,993	2,981	0,012
2,990	2,981	0,009	2,992	2,979	0,012	2,990	2,979	0,011
2,986	2,979	0,006	2,984	2,978	0,006	2,986	2,978	0,007
2,982	2,978	0,004	2,978	2,977	0,001	2,982	2,978	0,004
2,974	2,977	-0,004	2,973	2,977	-0,004	2,974	2,978	-0,004
2,970	2,977	-0,007	2,969	2,977	-0,008	2,970	2,978	-0,008
	2,977	-2,977		2,977	-2,977		2,979	-2,979
	2,977	-2,977		2,977	-2,977		2,980	-2,980
	2,977	-2,977		2,978	-2,978		2,980	-2,980

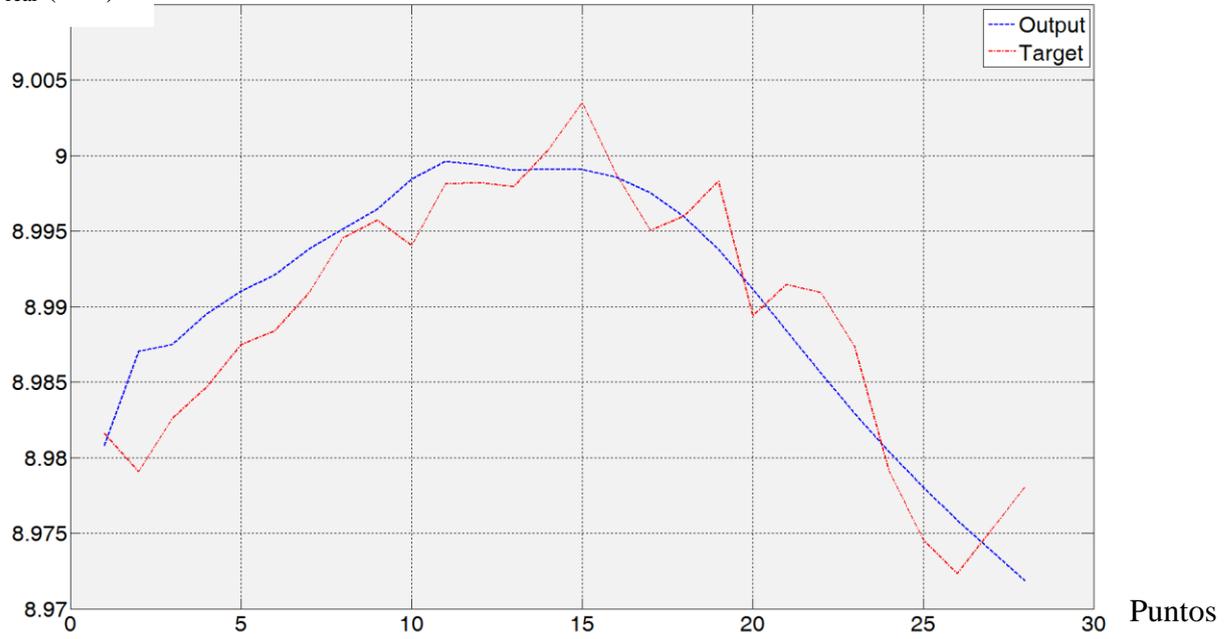
z-28			z-32			z-36		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
2,976		2,976			0,000			0,000
2,977		2,977	2,977		2,977			0,000
2,978	2,971	0,007	2,980	2,976	0,004	2,977	2,983	-0,006
2,979	2,970	0,009	2,981	2,975	0,006	2,976	2,983	-0,007
2,980	2,979	0,000	2,980	2,983	-0,003	2,972	2,987	-0,015
2,980	2,978	0,002	2,981	2,980	0,001	2,973	2,983	-0,010
2,981	2,982	-0,001	2,983	2,985	-0,002	2,972	2,988	-0,016
2,983	2,987	-0,004	2,983	2,989	-0,006	2,974	2,993	-0,019
2,985	2,988	-0,003	2,989	2,990	-0,001	2,978	2,993	-0,015
2,992	2,991	0,001	2,994	2,993	0,002	2,979	2,995	-0,015
2,994	2,995	-0,001	2,997	2,996	0,001	2,988	2,997	-0,009
2,994	2,996	-0,001	2,998	2,996	0,002	2,991	2,997	-0,006
2,997	2,996	0,001	2,998	2,996	0,002	2,994	2,997	-0,004
2,998	2,997	0,001	2,996	2,997	-0,001	2,996	2,998	-0,001
2,997	2,997	0,000	2,999	2,997	0,002	2,997	2,997	0,000
2,995	2,996	-0,001	2,998	2,996	0,002	2,997	2,996	0,001
2,996	2,995	0,001	2,997	2,995	0,003	2,999	2,995	0,004
2,996	2,993	0,003	2,998	2,993	0,005	3,003	2,994	0,009
2,995	2,990	0,005	2,998	2,990	0,008	3,002	2,992	0,010
2,995	2,987	0,008	2,997	2,988	0,009	3,003	2,990	0,013
2,994	2,984	0,010	2,996	2,985	0,011	3,002	2,988	0,014
2,992	2,982	0,011	2,992	2,984	0,008	3,003	2,988	0,015
2,990	2,980	0,009	2,988	2,983	0,005	3,001	2,988	0,013
2,984	2,980	0,004	2,984	2,984	0,000	2,994	2,989	0,005
2,980	2,980	-0,001	2,985	2,985	0,000	2,990	2,990	0,000
2,974	2,981	-0,007	2,974	2,986	-0,012	2,986	2,991	-0,005
2,970	2,982	-0,012	2,967	2,987	-0,019	2,983	2,992	-0,009
2,968	2,983	-0,015	2,966	2,988	-0,022	2,982	2,993	-0,011
2,968	2,984	-0,016		2,988	-2,988	2,981	2,993	-0,012
2,968	2,984	-0,017		2,989	-2,989	2,980	2,993	-0,013

z-38,5		
Real	Predicted	Error
		0,000
		0,000
	2,993	-2,993
2,990	2,992	-0,002
2,990	2,992	-0,002
2,989	2,986	0,002
2,987	2,992	-0,005
2,989	2,997	-0,008
2,991	2,996	-0,005
2,998	2,997	0,001
2,998	2,999	-0,001
2,998	2,999	-0,001
2,999	2,999	0,000
2,999	2,999	0,000
2,999	2,999	0,000
2,997	2,998	-0,002
2,997	2,997	0,000
2,997	2,996	0,001
2,996	2,995	0,001
2,996	2,994	0,003
3,000	2,993	0,007
2,998	2,993	0,005
2,993	2,993	0,000
2,988	2,994	-0,006
2,985	2,995	-0,011
2,984	2,996	-0,012
2,980	2,997	-0,017
	2,997	-2,997
	2,997	-2,997
	2,997	-2,997

5.2.2.1.2. H70 R9 (Espesor 70 mm y radio 9 mm)

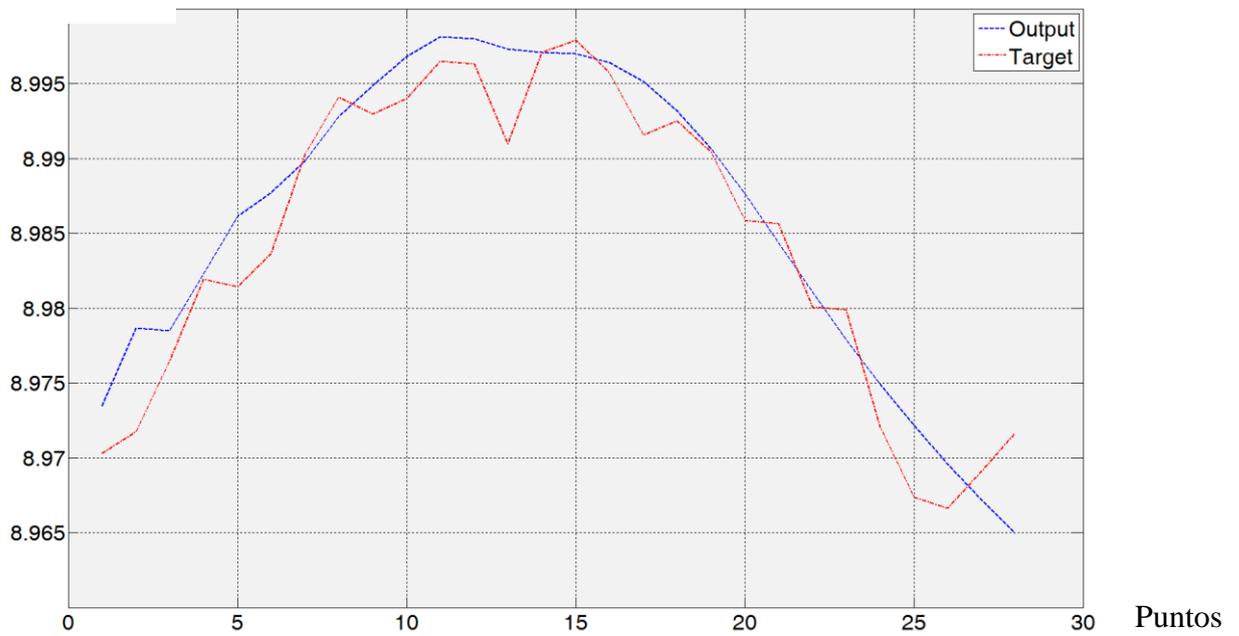
H70R9z-1.5

R_{real} (mm)

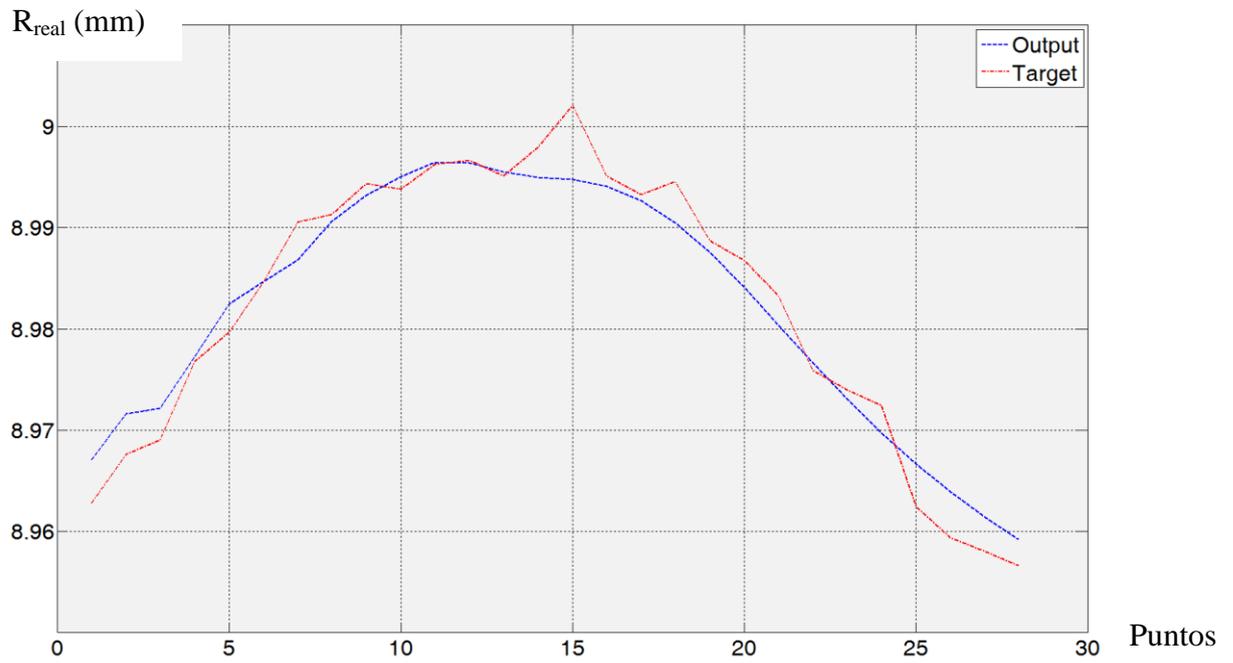


H70R9z-7

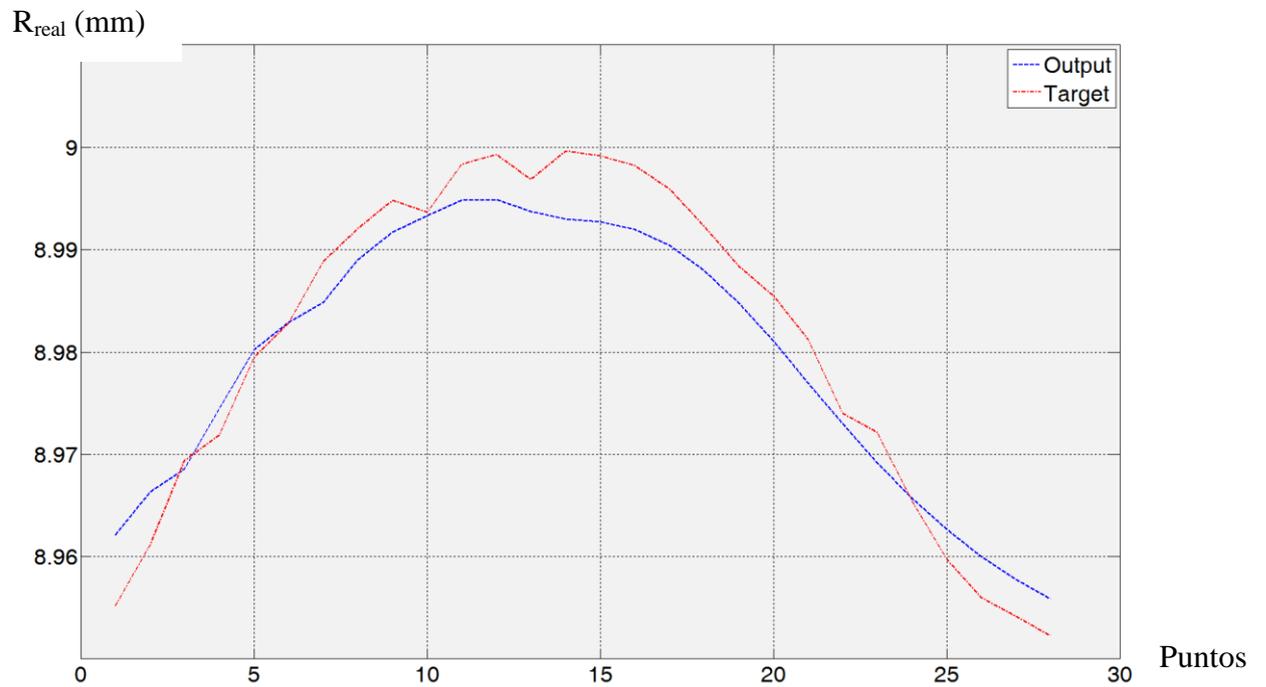
R_{real} (mm)



H70R9z-14

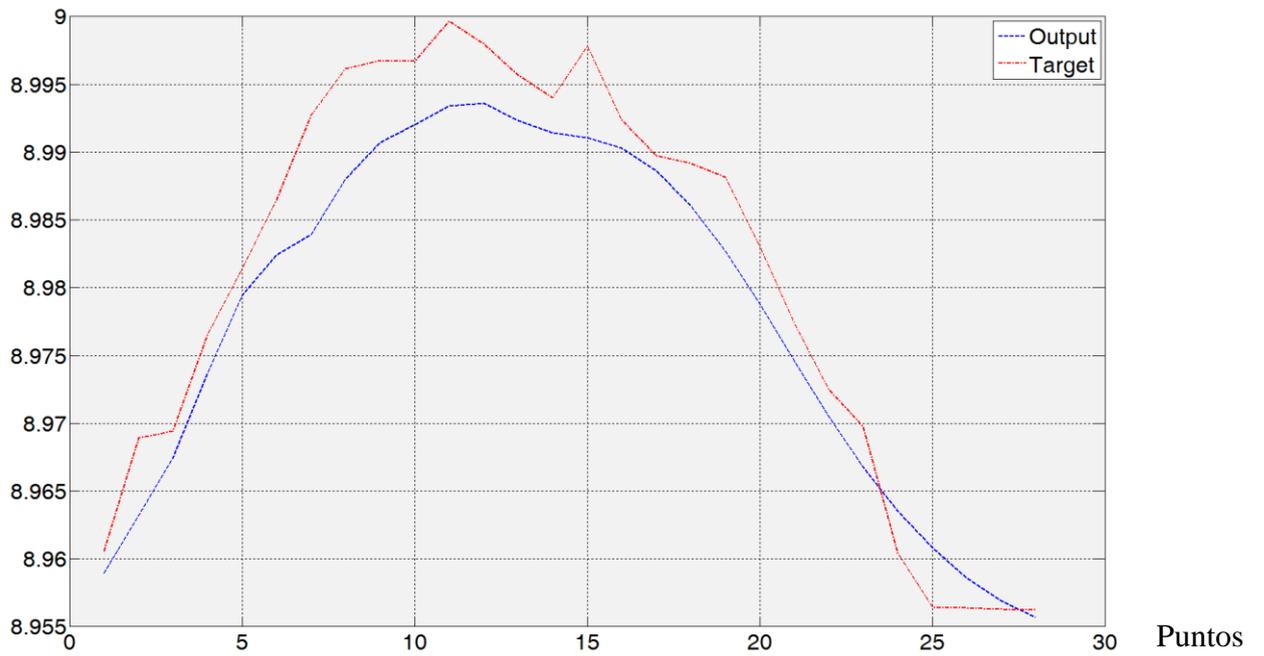


H70R9z-21



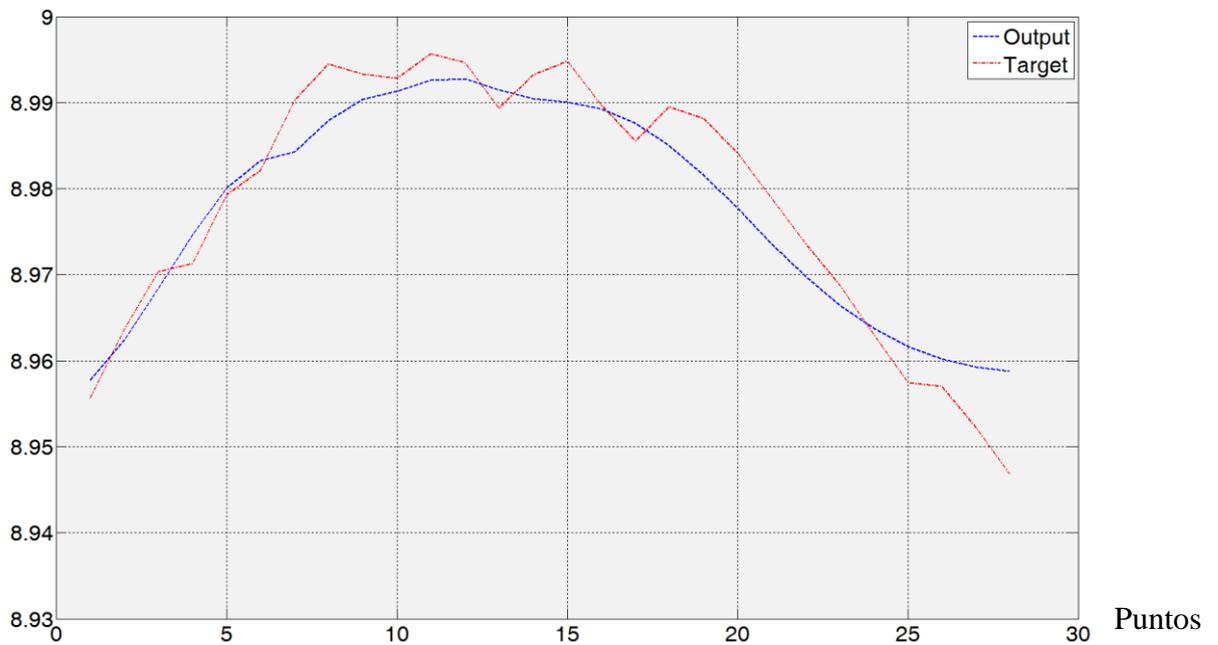
H70R9z-28

R_{real} (mm)



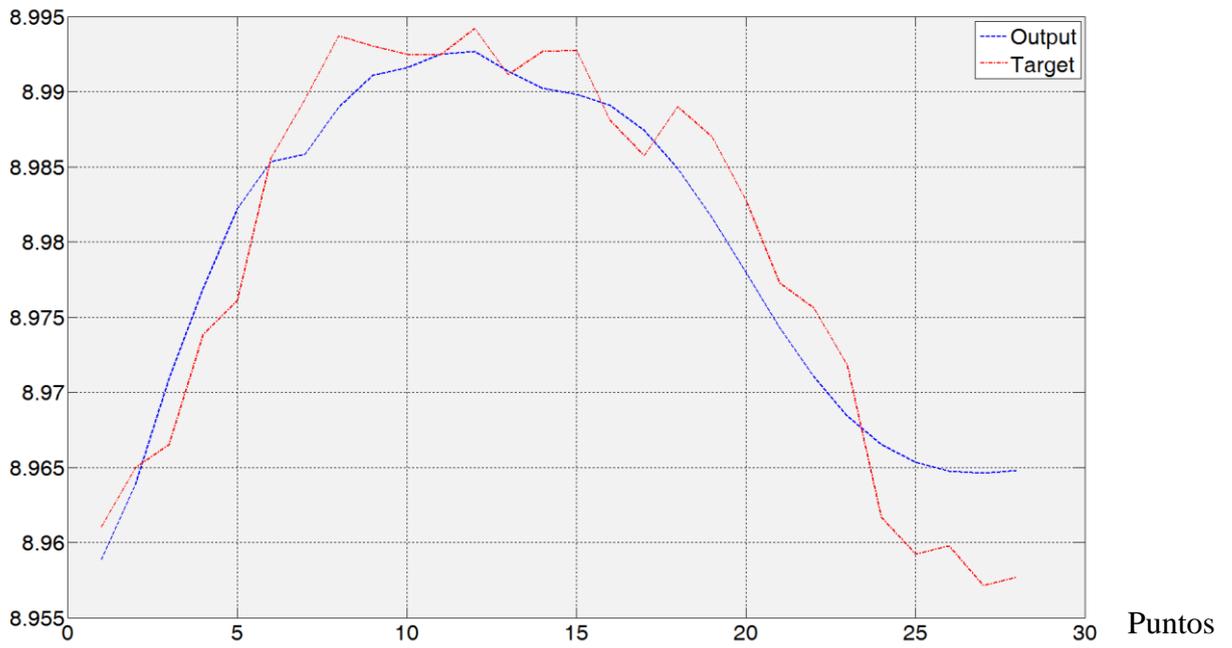
H70R9z-42

R_{real} (mm)



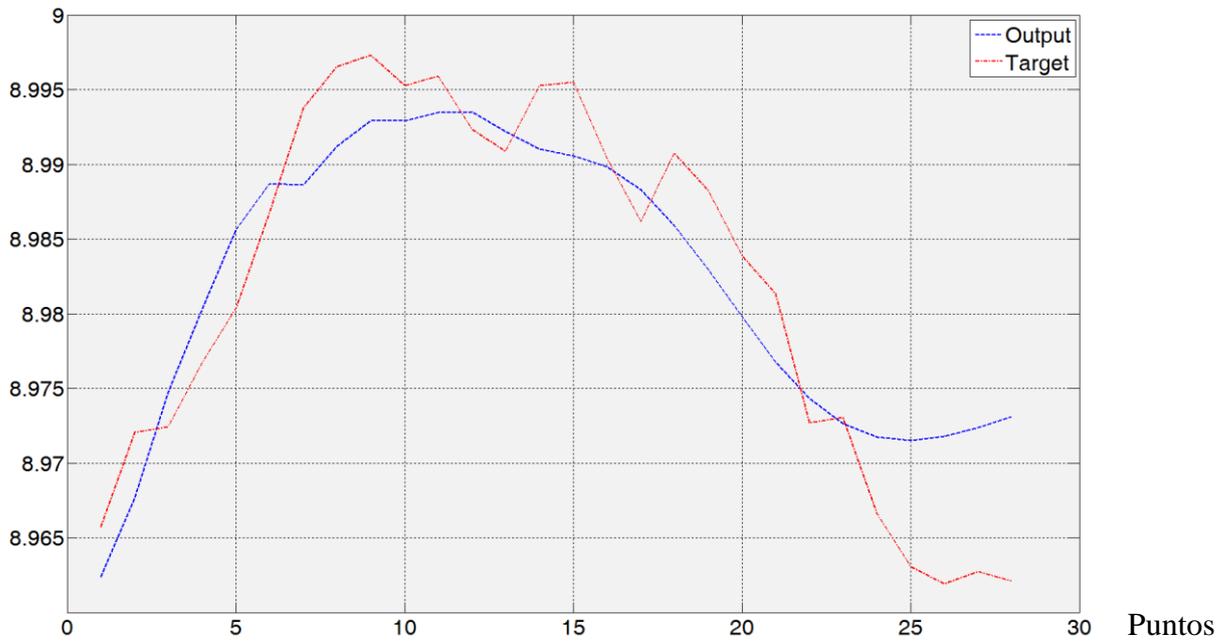
H70R9z-49

R_{real} (mm)



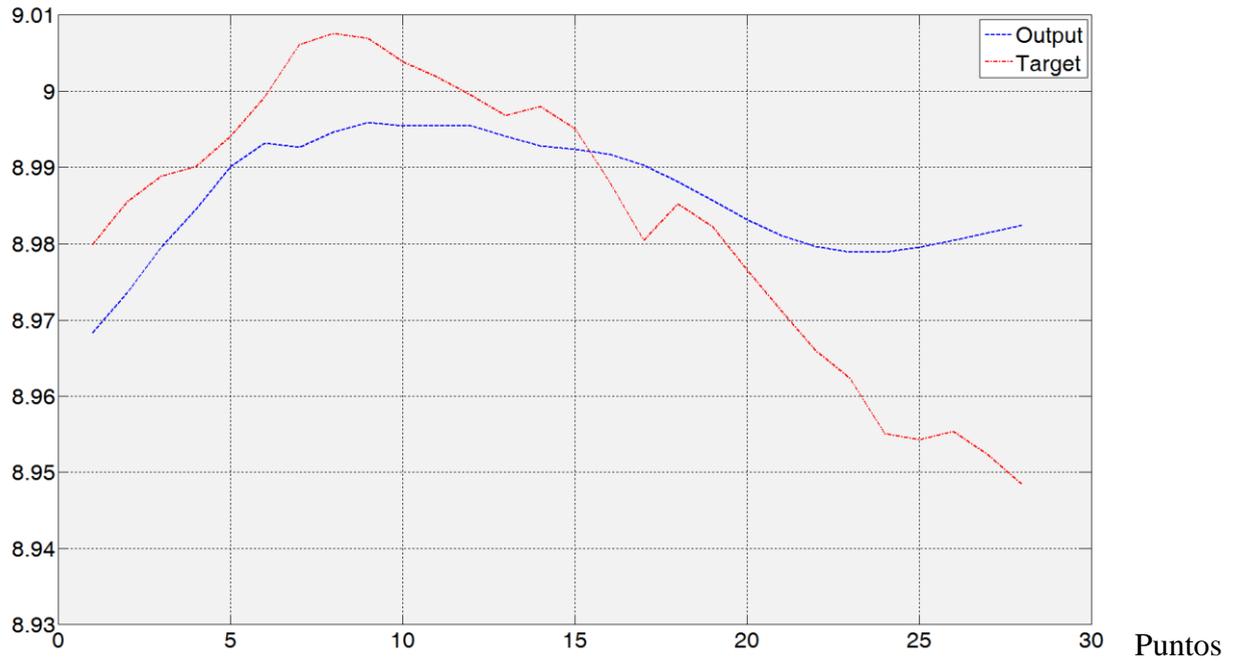
H70R9z-56

R_{real} (mm)



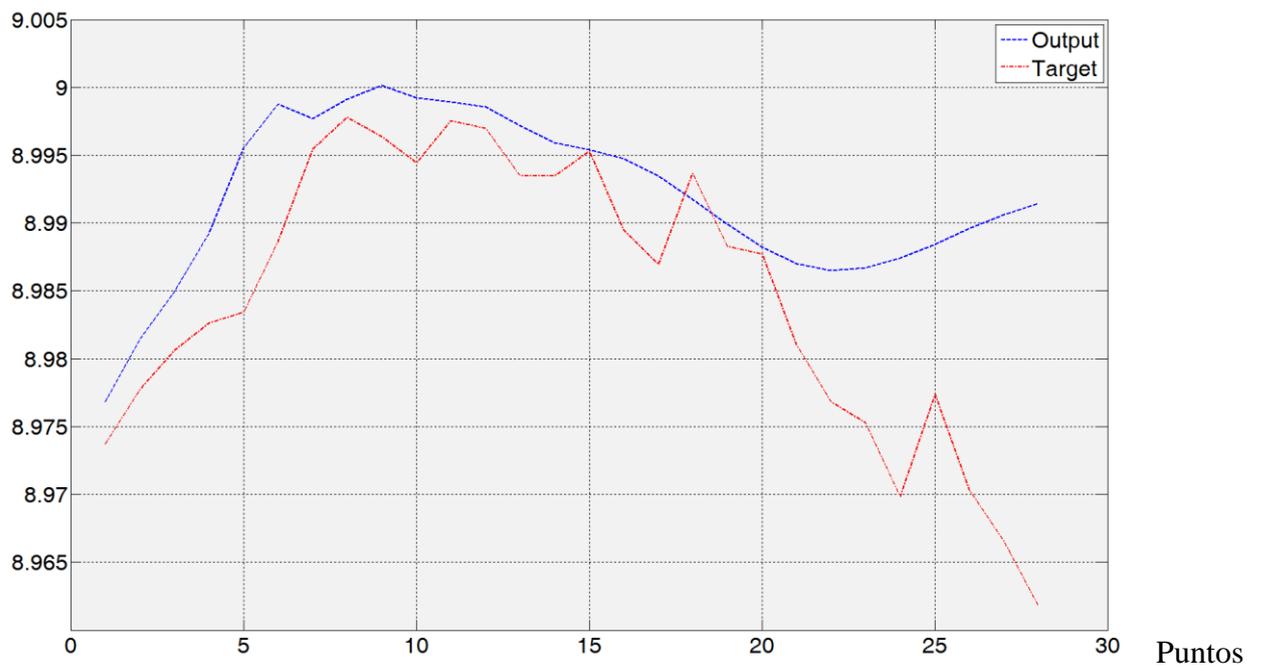
H70R9z-63

R_{real} (mm)



H70R9z-68.5

R_{real} (mm)



RESULTADOS DEL RADIO Y ERROR TABULADOS

A continuación se presentan ordenados por planos de medición los resultados de radio real medido mediante la MMC, y los predichos por la red (predicted), así como la diferencia entre ambos valores, es decir, el error.

z-1,5			z-7			z-14		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
8,967		8,967	8,956		8,956	8,956		8,956
8,977		8,977	8,963		8,963	8,959		8,959
8,982	8,981	-0,006	8,970	8,973	-0,003	8,963	8,967	-0,004
8,979	8,987	-0,010	8,972	8,979	-0,007	8,968	8,972	-0,004
8,983	8,987	-0,008	8,976	8,979	-0,002	8,969	8,972	-0,003
8,985	8,990	-0,007	8,982	8,982	0,000	8,977	8,977	0,000
8,987	8,991	-0,006	8,981	8,986	-0,005	8,980	8,982	-0,003
8,988	8,992	-0,007	8,984	8,988	-0,004	8,985	8,985	0,000
8,991	8,994	-0,006	8,990	8,990	0,000	8,991	8,987	0,004
8,995	8,995	-0,004	8,994	8,993	0,001	8,991	8,991	0,001
8,996	8,996	-0,004	8,993	8,995	-0,002	8,994	8,993	0,001
8,994	8,998	-0,005	8,994	8,997	-0,003	8,994	8,995	-0,001
8,998	9,000	-0,001	8,997	8,998	-0,002	8,996	8,996	0,000
8,998	8,999	-0,001	8,996	8,998	-0,002	8,997	8,996	0,000
8,998	8,999	-0,001	8,991	8,997	-0,006	8,995	8,995	0,000
9,000	8,999	0,002	8,997	8,997	0,000	8,998	8,995	0,003
9,003	8,999	0,006	8,998	8,997	0,001	9,002	8,995	0,007
8,999	8,999	0,003	8,996	8,996	-0,001	8,995	8,994	0,001
8,995	8,998	0,001	8,992	8,995	-0,004	8,993	8,993	0,001
8,996	8,996	0,005	8,993	8,993	-0,001	8,995	8,990	0,004
8,998	8,994	0,010	8,990	8,991	0,000	8,989	8,988	0,001
8,989	8,991	0,004	8,986	8,988	-0,002	8,987	8,984	0,003
8,991	8,988	0,009	8,986	8,984	0,001	8,983	8,980	0,003
8,991	8,986	0,011	8,980	8,981	-0,001	8,976	8,977	-0,001
8,987	8,983	0,009	8,980	8,978	0,002	8,974	8,973	0,001
8,979	8,980	0,003	8,972	8,975	-0,003	8,972	8,970	0,003
8,975	8,978	0,001	8,967	8,972	-0,005	8,962	8,967	-0,004
8,972	8,976	0,000	8,967	8,970	-0,003	8,959	8,964	-0,004
8,975	8,974	0,001	8,969	8,967	0,002	8,958	8,961	-0,003
8,978	8,972	0,006	8,972	8,965	0,007	8,957	8,959	-0,003

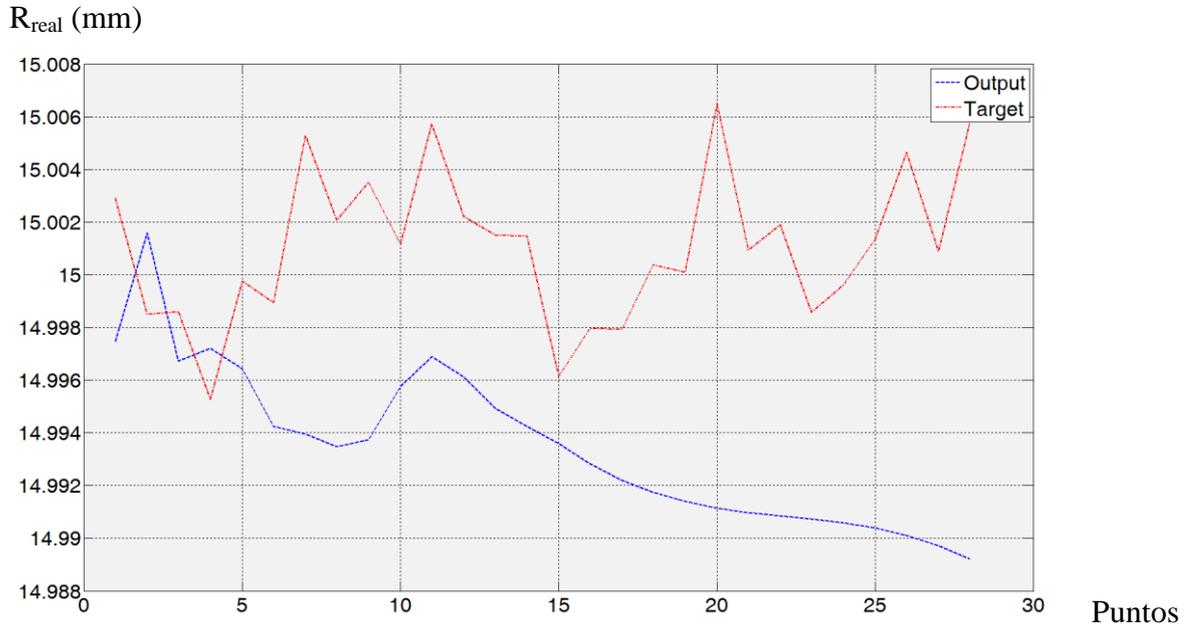
z-21			z-28			z-42		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
8,939		8,939	8,947		8,947	8,939		8,939
8,947		8,947	8,953		8,953	8,950		8,950
8,955	8,962	-0,007	8,961	8,959	0,002	8,956	8,958	-0,002
8,961	8,966	-0,005	8,969	8,963	0,006	8,964	8,962	0,001
8,969	8,969	0,001	8,969	8,967	0,002	8,970	8,968	0,002
8,972	8,974	-0,003	8,977	8,974	0,003	8,971	8,975	-0,003
8,979	8,980	-0,001	8,981	8,979	0,002	8,979	8,980	-0,001
8,983	8,983	0,000	8,986	8,982	0,004	8,982	8,983	-0,001
8,989	8,985	0,004	8,993	8,984	0,009	8,990	8,984	0,006
8,992	8,989	0,003	8,996	8,988	0,008	8,994	8,988	0,007
8,995	8,992	0,003	8,997	8,991	0,006	8,993	8,990	0,003
8,994	8,993	0,000	8,997	8,992	0,005	8,993	8,991	0,002
8,998	8,995	0,004	9,000	8,993	0,006	8,996	8,993	0,003
8,999	8,995	0,004	8,998	8,994	0,004	8,995	8,993	0,002
8,997	8,994	0,003	8,996	8,992	0,003	8,989	8,991	-0,002
9,000	8,993	0,007	8,994	8,991	0,003	8,993	8,990	0,003
8,999	8,993	0,006	8,998	8,991	0,007	8,995	8,990	0,005
8,998	8,992	0,006	8,992	8,990	0,002	8,990	8,989	0,000
8,996	8,990	0,005	8,990	8,989	0,001	8,986	8,988	-0,002
8,992	8,988	0,004	8,989	8,986	0,003	8,990	8,985	0,005
8,988	8,985	0,004	8,988	8,983	0,005	8,988	8,982	0,007
8,985	8,981	0,004	8,983	8,979	0,004	8,984	8,978	0,006
8,981	8,977	0,004	8,977	8,975	0,003	8,979	8,974	0,005
8,974	8,973	0,001	8,972	8,971	0,002	8,974	8,970	0,004
8,972	8,969	0,003	8,970	8,967	0,003	8,969	8,966	0,002
8,965	8,966	0,000	8,960	8,964	-0,003	8,963	8,964	-0,001
8,960	8,963	-0,003	8,956	8,961	-0,004	8,957	8,962	-0,004
8,956	8,960	-0,004	8,956	8,959	-0,002	8,957	8,960	-0,003
8,954	8,958	-0,004	8,956	8,957	-0,001	8,952	8,959	-0,007
8,952	8,956	-0,004	8,956	8,956	0,001	8,947	8,959	-0,012

z-49			z-56			z-63		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
8,948		8,948	8,955		8,955	8,967		8,967
8,952		8,952	8,962		8,962	8,974		8,974
8,961	8,959	0,002	8,966	8,962	0,003	8,980	8,968	0,012
8,965	8,964	0,001	8,972	8,968	0,004	8,985	8,974	0,012
8,967	8,971	-0,004	8,972	8,975	-0,002	8,989	8,980	0,009
8,974	8,977	-0,003	8,977	8,980	-0,004	8,990	8,985	0,006
8,976	8,982	-0,006	8,980	8,986	-0,005	8,994	8,990	0,004
8,986	8,985	0,000	8,987	8,989	-0,002	8,999	8,993	0,006
8,989	8,986	0,004	8,994	8,989	0,005	9,006	8,993	0,013
8,994	8,989	0,005	8,997	8,991	0,005	9,008	8,995	0,013
8,993	8,991	0,002	8,997	8,993	0,004	9,007	8,996	0,011
8,992	8,992	0,001	8,995	8,993	0,002	9,004	8,995	0,008
8,992	8,993	0,000	8,996	8,993	0,002	9,002	8,996	0,006
8,994	8,993	0,002	8,992	8,994	-0,001	8,999	8,995	0,004
8,991	8,991	0,000	8,991	8,992	-0,001	8,997	8,994	0,003
8,993	8,990	0,002	8,995	8,991	0,004	8,998	8,993	0,005
8,993	8,990	0,003	8,996	8,991	0,005	8,995	8,992	0,003
8,988	8,989	-0,001	8,990	8,990	0,001	8,988	8,992	-0,003
8,986	8,987	-0,002	8,986	8,988	-0,002	8,980	8,990	-0,010
8,989	8,985	0,004	8,991	8,986	0,005	8,985	8,988	-0,003
8,987	8,982	0,005	8,988	8,983	0,005	8,982	8,986	-0,003
8,983	8,978	0,005	8,984	8,980	0,004	8,977	8,983	-0,007
8,977	8,974	0,003	8,981	8,977	0,005	8,971	8,981	-0,010
8,976	8,971	0,005	8,973	8,974	-0,002	8,966	8,980	-0,014
8,972	8,968	0,003	8,973	8,973	0,000	8,962	8,979	-0,017
8,962	8,967	-0,005	8,967	8,972	-0,005	8,955	8,979	-0,024
8,959	8,965	-0,006	8,963	8,971	-0,008	8,954	8,980	-0,025
8,960	8,965	-0,005	8,962	8,972	-0,010	8,955	8,980	-0,025
8,957	8,965	-0,007	8,963	8,972	-0,010	8,952	8,981	-0,029
8,958	8,965	-0,007	8,962	8,973	-0,011	8,948	8,982	-0,034

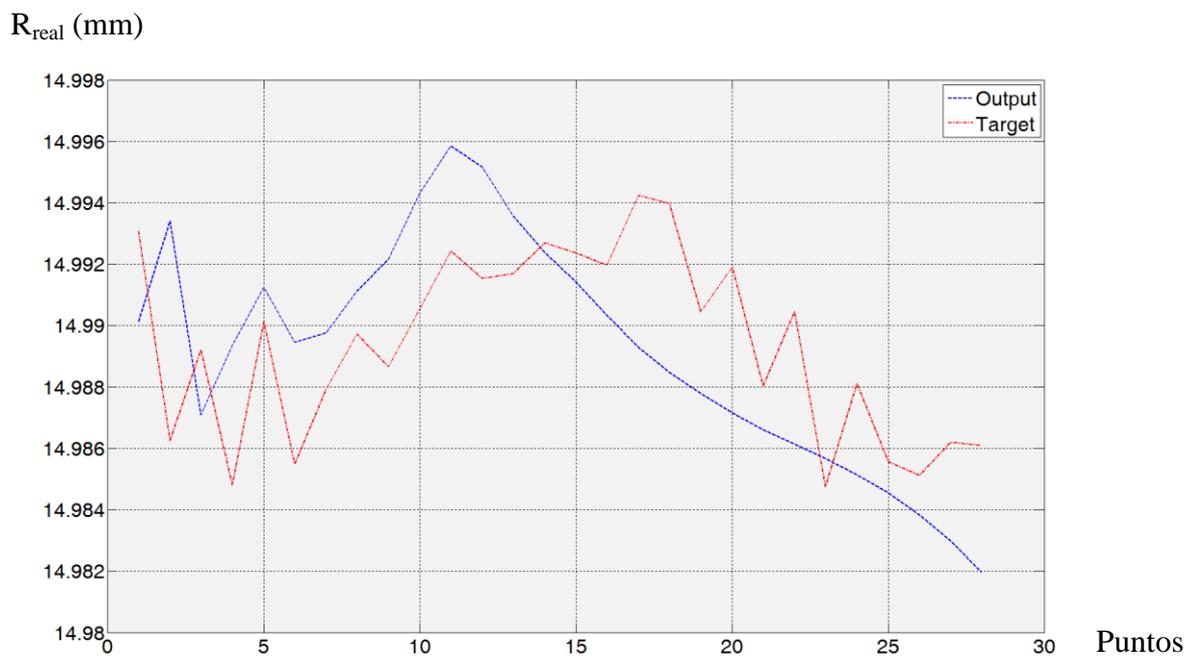
z-68,5		
Real	Predicted	Error
8,966		8,966
8,972		8,972
8,974	8,977	-0,003
8,978	8,981	-0,004
8,981	8,985	-0,004
8,983	8,989	-0,007
8,983	8,996	-0,012
8,989	8,999	-0,010
8,995	8,998	-0,002
8,998	8,999	-0,001
8,996	9,000	-0,004
8,994	8,999	-0,005
8,998	8,999	-0,001
8,997	8,999	-0,002
8,994	8,997	-0,004
8,993	8,996	-0,002
8,995	8,995	0,000
8,989	8,995	-0,005
8,987	8,993	-0,006
8,994	8,992	0,002
8,988	8,990	-0,002
8,988	8,988	-0,001
8,981	8,987	-0,006
8,977	8,986	-0,010
8,975	8,987	-0,011
8,970	8,987	-0,018
8,977	8,988	-0,011
8,970	8,990	-0,019
8,967	8,991	-0,024
8,962	8,991	-0,030

5.2.2.1.3. H100 R15 (Espesor 100 mm y radio 15 mm)

H100R15z-1.5

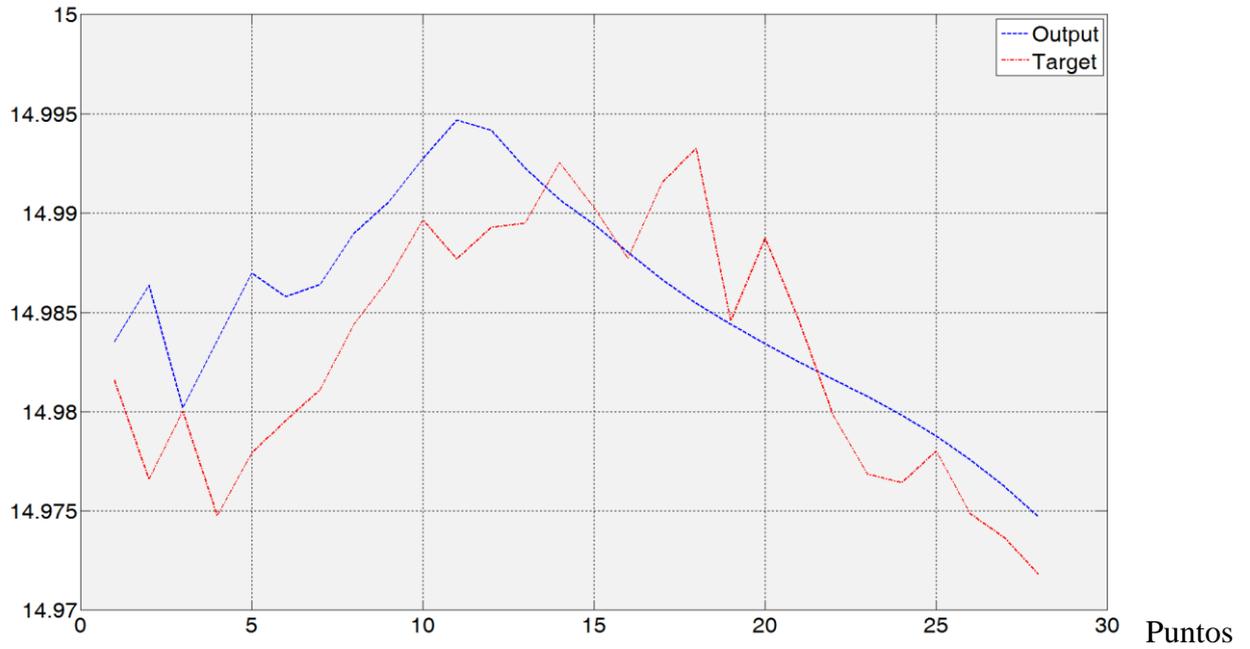


H100R15z-10



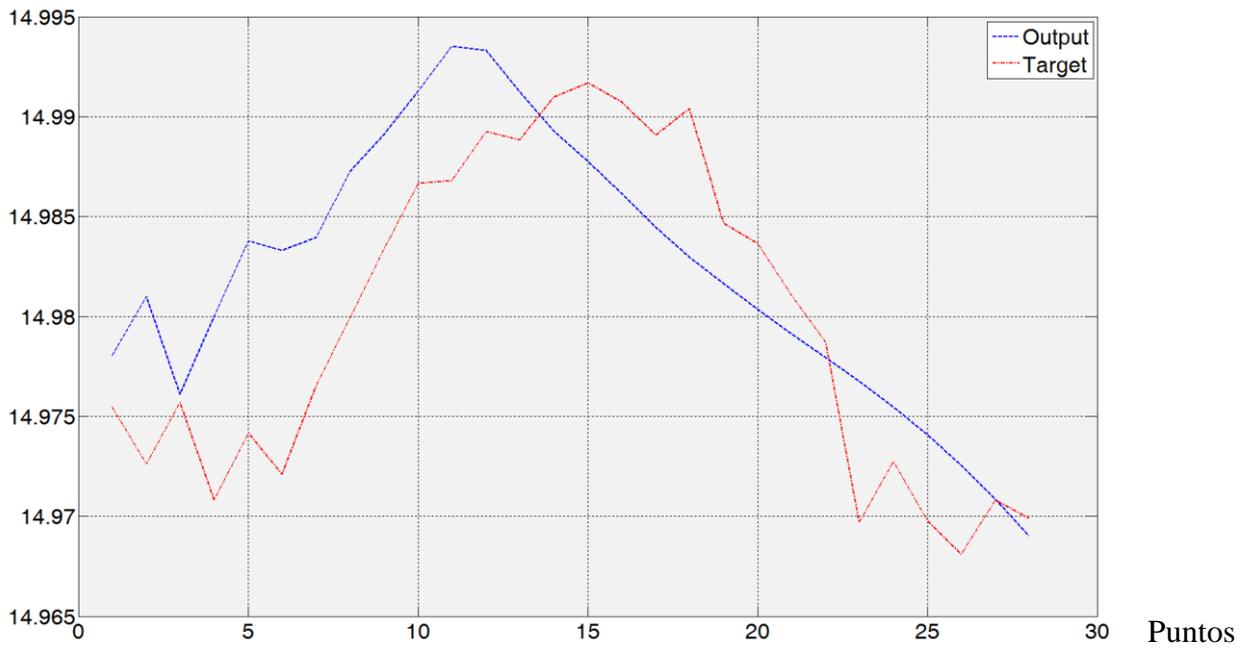
H100R15z-20

R_{real} (mm)

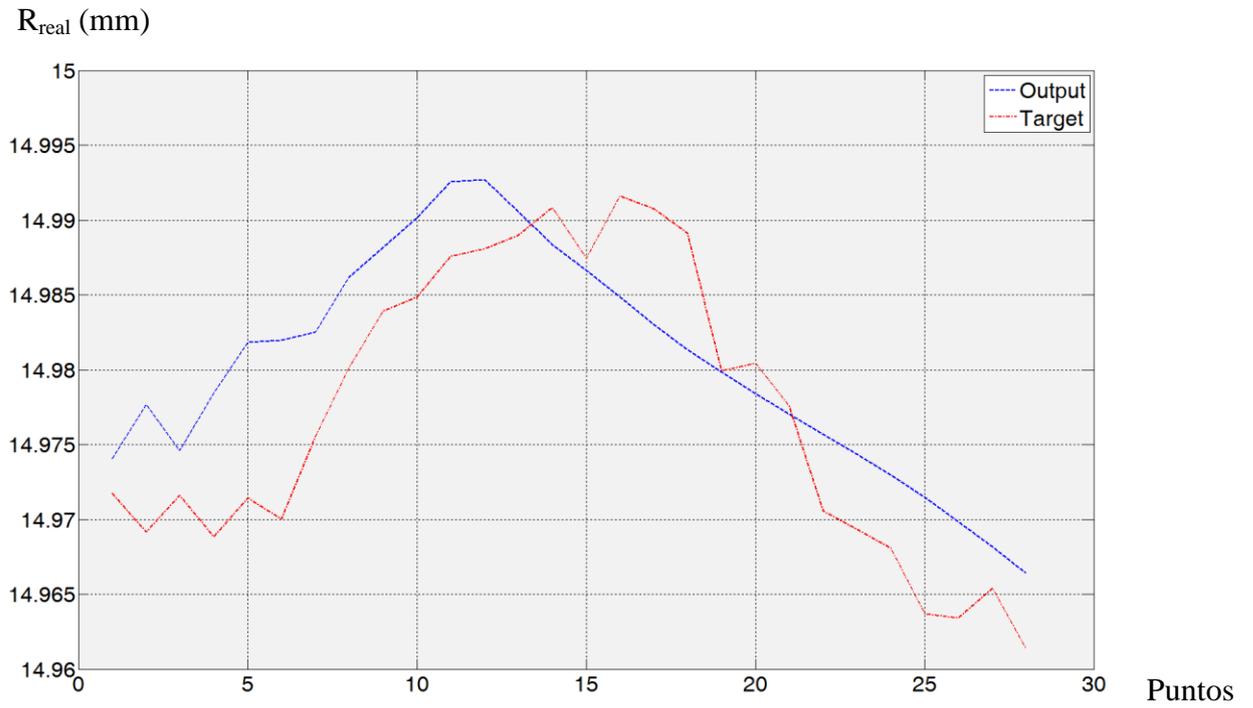


H100R15z-30

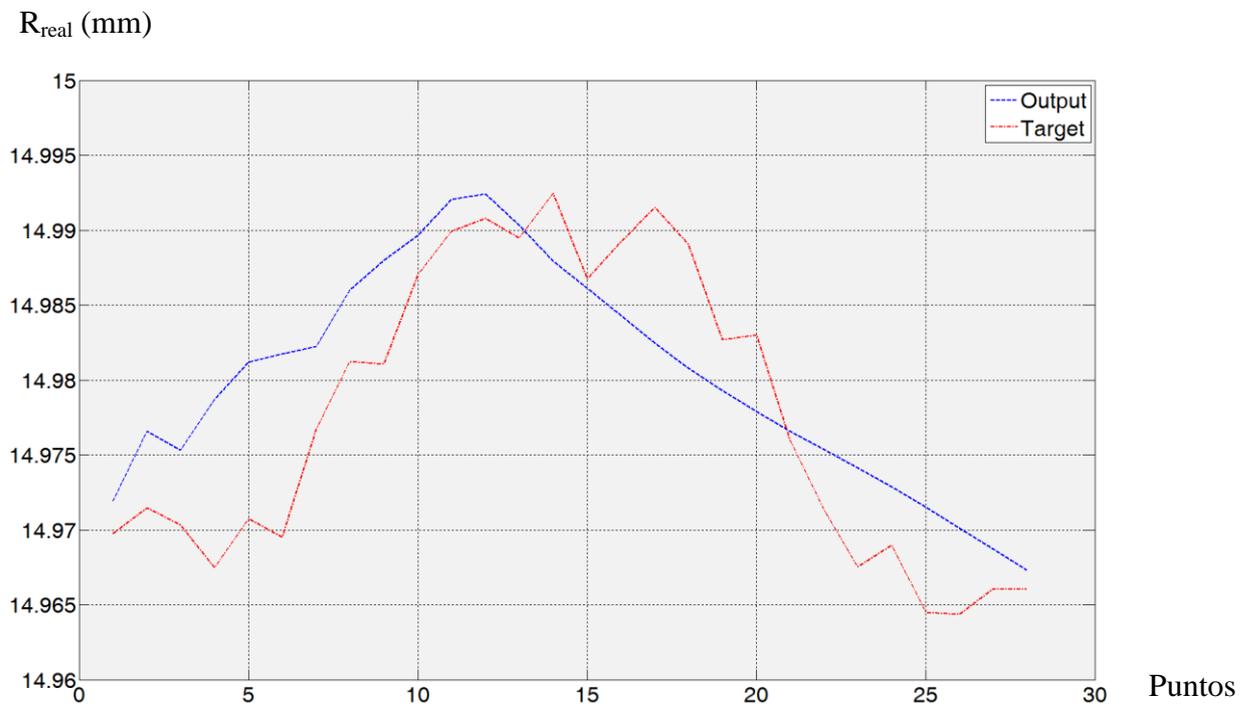
R_{real} (mm)



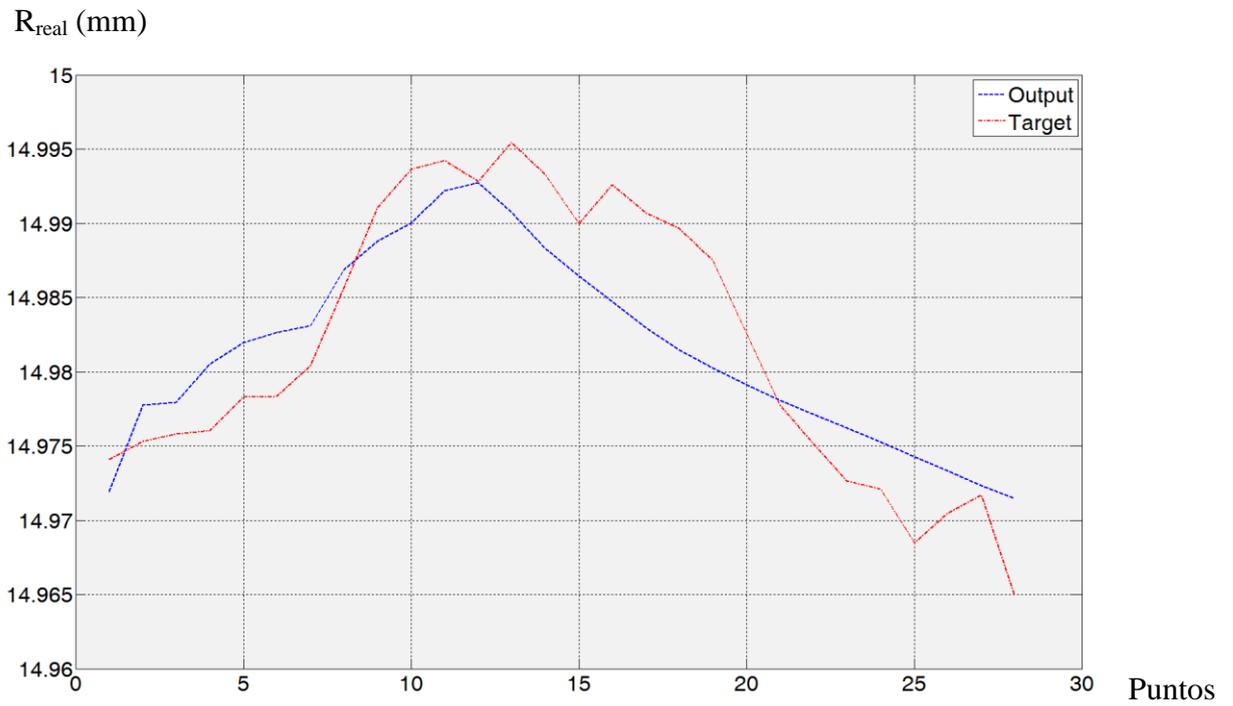
H100R15z-40



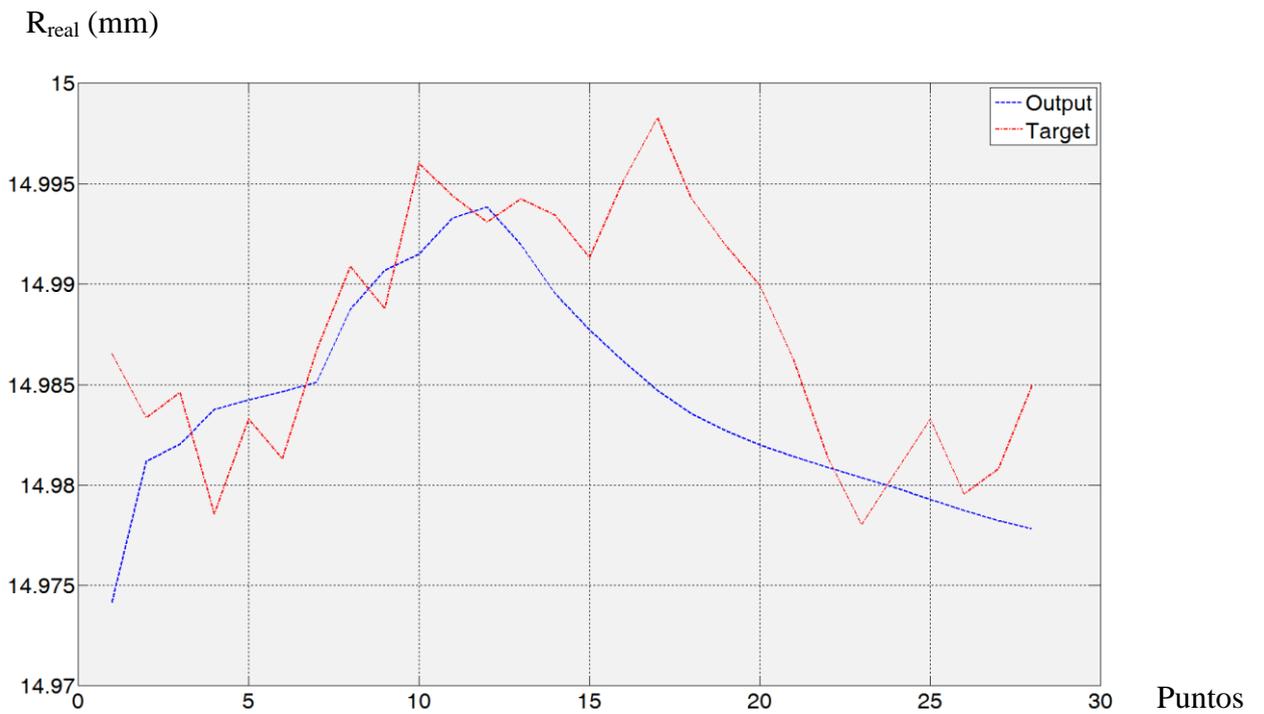
H100R15z-60



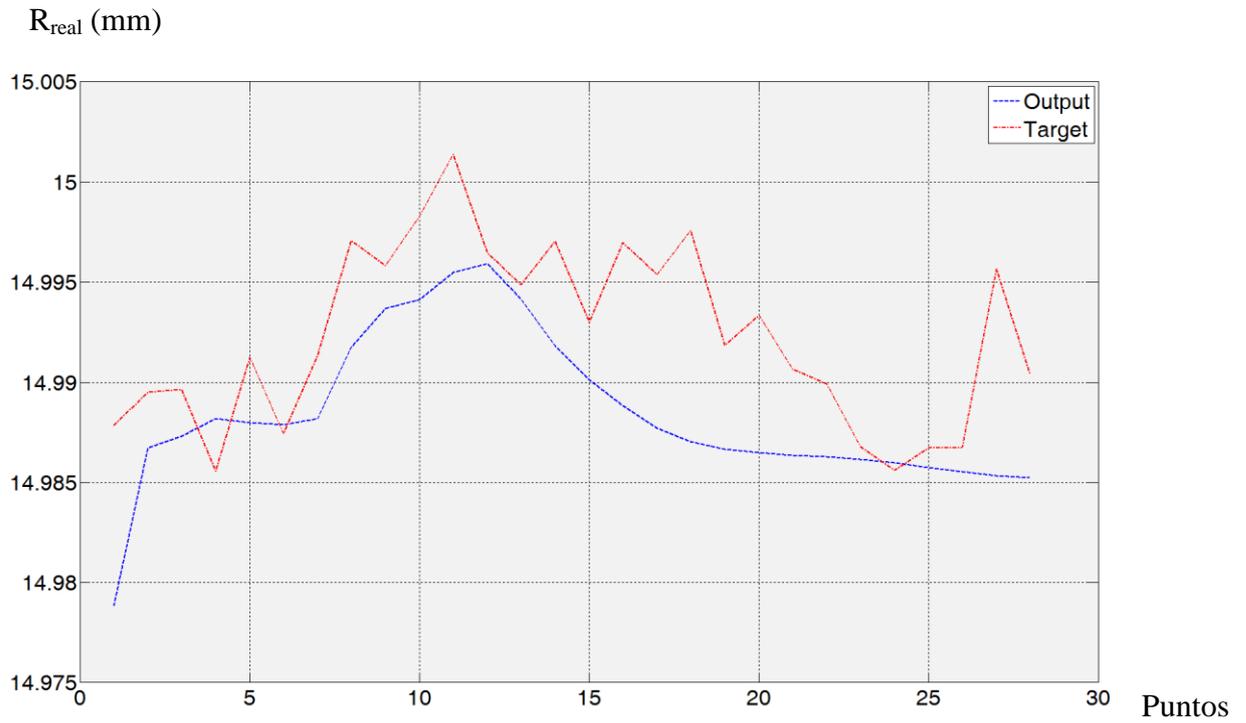
H100R15z-70



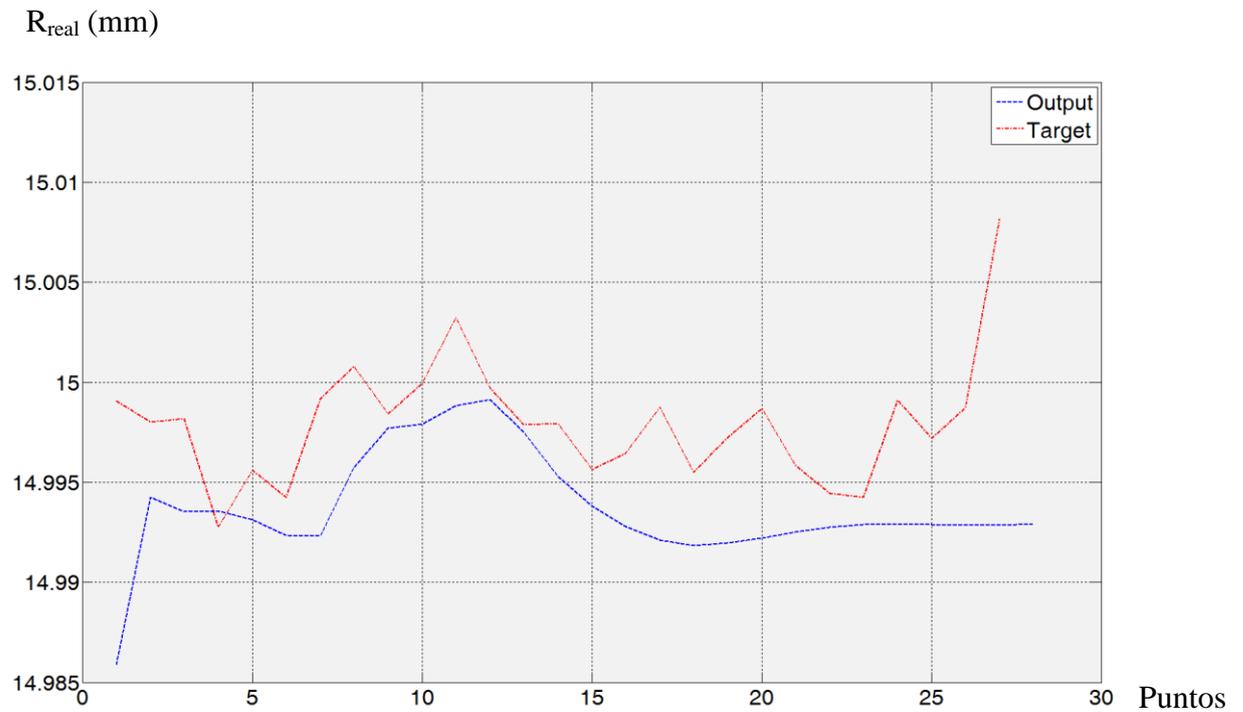
H100R15z-80



H100R15z-90



H100R15z-98.5



RESULTADOS DEL RADIO Y ERROR TABULADOS

A continuación se presentan ordenados por planos de medición los resultados de radio real medido mediante la MMC, y los predichos por la red (predicted), así como la diferencia entre ambos valores, es decir, el error.

z-1,5			z-10			z-20		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
15,008		15,008	14,992		14,992	14,985		14,985
15,005		15,005	14,990		14,990	14,980		14,980
15,003	14,997	0,006	14,993	14,990	0,003	14,982	14,984	-0,002
14,999	15,002	0,001	14,986	14,993	-0,007	14,977	14,986	-0,010
14,999	14,997	0,002	14,989	14,987	0,002	14,980	14,980	0,000
14,995	14,997	0,001	14,985	14,989	-0,005	14,975	14,984	-0,009
15,000	14,996	0,006	14,990	14,991	-0,001	14,978	14,987	-0,009
14,999	14,994	0,005	14,985	14,989	-0,004	14,980	14,986	-0,006
15,005	14,994	0,012	14,988	14,990	-0,002	14,981	14,986	-0,005
15,002	14,993	0,006	14,990	14,991	-0,001	14,984	14,989	-0,005
15,004	14,994	0,007	14,989	14,992	-0,004	14,987	14,991	-0,004
15,001	14,996	0,005	14,991	14,994	-0,004	14,990	14,993	-0,003
15,006	14,997	0,011	14,992	14,996	-0,003	14,988	14,995	-0,007
15,002	14,996	0,008	14,992	14,995	-0,004	14,989	14,994	-0,005
15,002	14,995	0,008	14,992	14,994	-0,002	14,990	14,992	-0,003
15,001	14,994	0,009	14,993	14,992	0,000	14,993	14,991	0,002
14,996	14,994	0,004	14,992	14,991	0,001	14,990	14,989	0,001
14,998	14,993	0,006	14,992	14,990	0,002	14,988	14,988	0,000
14,998	14,992	0,007	14,994	14,989	0,005	14,992	14,987	0,005
15,000	14,992	0,009	14,994	14,988	0,006	14,993	14,985	0,008
15,000	14,991	0,009	14,990	14,988	0,003	14,985	14,984	0,000
15,007	14,991	0,016	14,992	14,987	0,005	14,989	14,983	0,005
15,001	14,991	0,010	14,988	14,987	0,001	14,985	14,982	0,002
15,002	14,991	0,011	14,990	14,986	0,004	14,980	14,982	-0,002
14,999	14,991	0,008	14,985	14,986	-0,001	14,977	14,981	-0,004
15,000	14,991	0,010	14,988	14,985	0,003	14,976	14,980	-0,003
15,001	14,990	0,012	14,986	14,985	0,001	14,978	14,979	-0,001
15,005	14,990	0,015	14,985	14,984	0,001	14,975	14,978	-0,003
15,001	14,990	0,011	14,986	14,983	0,003	14,974	14,976	-0,003
15,006	14,989	0,017	14,986	14,982	0,004	14,972	14,975	-0,003

z-30			z-40			z-60		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
14,979		14,979	14,970		14,970	14,973		14,973
14,978		14,978	14,971		14,971	14,971		14,971
14,975	14,978	-0,003	14,972	14,974	-0,002	14,970	14,972	-0,002
14,973	14,981	-0,008	14,969	14,978	-0,009	14,971	14,977	-0,005
14,976	14,976	0,000	14,972	14,975	-0,003	14,970	14,975	-0,005
14,971	14,980	-0,009	14,969	14,978	-0,010	14,967	14,979	-0,011
14,974	14,984	-0,010	14,971	14,982	-0,010	14,971	14,981	-0,010
14,972	14,983	-0,011	14,970	14,982	-0,012	14,970	14,982	-0,012
14,977	14,984	-0,007	14,976	14,983	-0,007	14,977	14,982	-0,006
14,980	14,987	-0,007	14,980	14,986	-0,006	14,981	14,986	-0,005
14,983	14,989	-0,006	14,984	14,988	-0,004	14,981	14,988	-0,007
14,987	14,991	-0,005	14,985	14,990	-0,005	14,987	14,990	-0,003
14,987	14,994	-0,007	14,988	14,993	-0,005	14,990	14,992	-0,002
14,989	14,993	-0,004	14,988	14,993	-0,005	14,991	14,992	-0,002
14,989	14,991	-0,002	14,989	14,991	-0,002	14,989	14,990	-0,001
14,991	14,989	0,002	14,991	14,988	0,003	14,992	14,988	0,005
14,992	14,988	0,004	14,987	14,987	0,001	14,987	14,986	0,001
14,991	14,986	0,005	14,992	14,985	0,007	14,989	14,984	0,005
14,989	14,984	0,005	14,991	14,983	0,008	14,992	14,982	0,009
14,990	14,983	0,007	14,989	14,981	0,008	14,989	14,981	0,008
14,985	14,982	0,003	14,980	14,980	0,000	14,983	14,979	0,003
14,984	14,980	0,003	14,980	14,978	0,002	14,983	14,978	0,005
14,981	14,979	0,002	14,978	14,977	0,001	14,976	14,977	-0,001
14,979	14,978	0,001	14,971	14,976	-0,005	14,971	14,975	-0,004
14,970	14,977	-0,007	14,969	14,974	-0,005	14,968	14,974	-0,007
14,973	14,975	-0,003	14,968	14,973	-0,005	14,969	14,973	-0,004
14,970	14,974	-0,004	14,964	14,971	-0,008	14,964	14,972	-0,007
14,968	14,973	-0,004	14,963	14,970	-0,006	14,964	14,970	-0,006
14,971	14,971	0,000	14,965	14,968	-0,003	14,966	14,969	-0,003
14,970	14,969	0,001	14,961	14,966	-0,005	14,966	14,967	-0,001

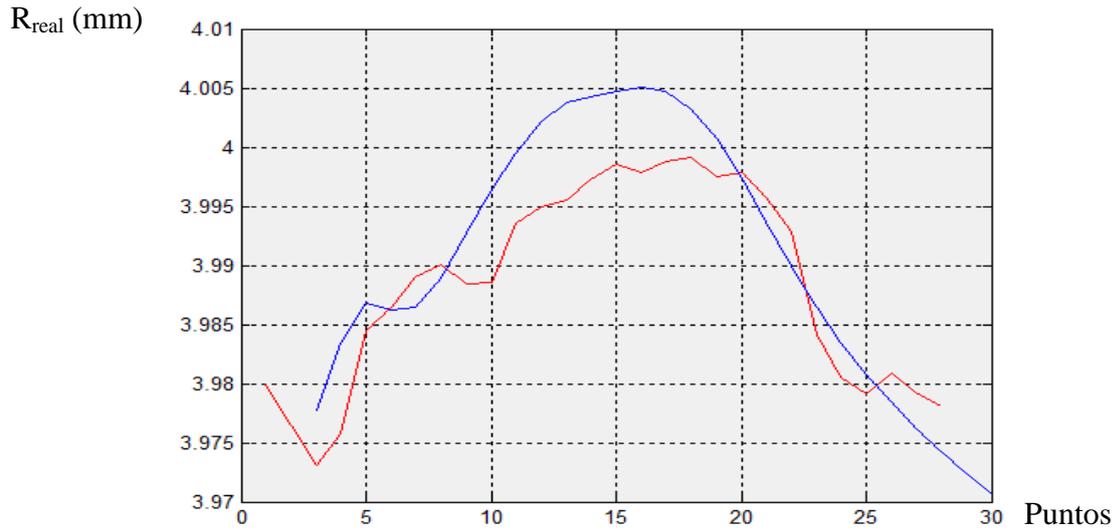
z-70			z-80			z-90		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
14,973		14,973	14,982		14,982	14,988		14,988
14,973		14,973	14,980		14,980	14,987		14,987
14,974	14,972	0,002	14,987	14,974	0,012	14,988	14,979	0,009
14,975	14,978	-0,002	14,983	14,981	0,002	14,990	14,987	0,003
14,976	14,978	-0,002	14,985	14,982	0,003	14,990	14,987	0,002
14,976	14,981	-0,005	14,979	14,984	-0,005	14,986	14,988	-0,003
14,978	14,982	-0,004	14,983	14,984	-0,001	14,991	14,988	0,003
14,978	14,983	-0,004	14,981	14,985	-0,003	14,987	14,988	0,000
14,980	14,983	-0,003	14,987	14,985	0,002	14,991	14,988	0,003
14,986	14,987	-0,001	14,991	14,989	0,002	14,997	14,992	0,005
14,991	14,989	0,002	14,989	14,991	-0,002	14,996	14,994	0,002
14,994	14,990	0,004	14,996	14,991	0,005	14,998	14,994	0,004
14,994	14,992	0,002	14,994	14,993	0,001	15,001	14,995	0,006
14,993	14,993	0,000	14,993	14,994	-0,001	14,996	14,996	0,001
14,995	14,991	0,005	14,994	14,992	0,002	14,995	14,994	0,001
14,993	14,988	0,005	14,993	14,990	0,004	14,997	14,992	0,005
14,990	14,986	0,004	14,991	14,988	0,004	14,993	14,990	0,003
14,993	14,985	0,008	14,995	14,986	0,009	14,997	14,989	0,008
14,991	14,983	0,008	14,998	14,985	0,014	14,995	14,988	0,008
14,990	14,981	0,008	14,994	14,984	0,011	14,998	14,987	0,011
14,987	14,980	0,007	14,992	14,983	0,009	14,992	14,987	0,005
14,983	14,979	0,003	14,990	14,982	0,008	14,993	14,986	0,007
14,978	14,978	0,000	14,986	14,981	0,005	14,991	14,986	0,004
14,975	14,977	-0,002	14,981	14,981	0,000	14,990	14,986	0,004
14,973	14,976	-0,004	14,978	14,980	-0,002	14,987	14,986	0,001
14,972	14,975	-0,003	14,981	14,980	0,001	14,986	14,986	0,000
14,968	14,974	-0,006	14,983	14,979	0,004	14,987	14,986	0,001
14,970	14,973	-0,003	14,980	14,979	0,001	14,987	14,986	0,001
14,972	14,972	-0,001	14,981	14,978	0,003	14,996	14,985	0,010
14,965	14,971	-0,006	14,985	14,978	0,007	14,990	14,985	0,005

z-98,5		
Real	Predicted	Error
15,001		15,001
14,995		14,995
14,999	14,986	0,013
14,998	14,994	0,004
14,998	14,994	0,005
14,993	14,994	-0,001
14,996	14,993	0,002
14,994	14,992	0,002
14,999	14,992	0,007
15,001	14,996	0,005
14,998	14,998	0,001
15,000	14,998	0,002
15,003	14,999	0,004
15,000	14,999	0,001
14,998	14,998	0,000
14,998	14,995	0,003
14,996	14,994	0,002
14,996	14,993	0,004
14,999	14,992	0,007
14,995	14,992	0,004
14,997	14,992	0,005
14,999	14,992	0,006
14,996	14,993	0,003
14,994	14,993	0,002
14,994	14,993	0,001
14,999	14,993	0,006
14,997	14,993	0,004
14,999	14,993	0,006
15,008	14,993	0,015
	14,993	-14,993

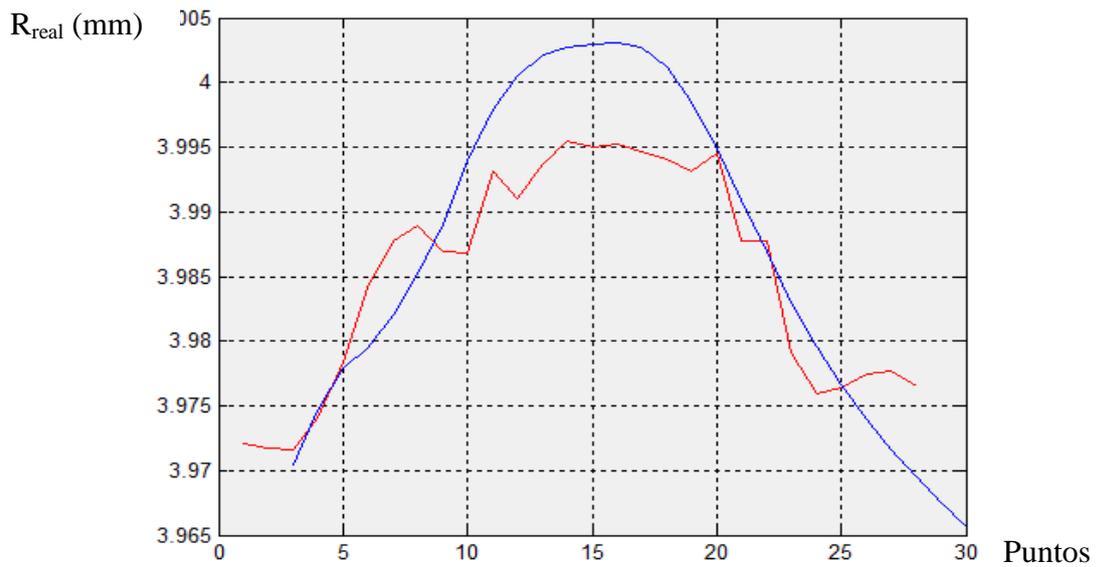
5.2.2.2. RESULTADOS DE GENERALIZACIÓN DE LA RNA

5.2.2.2.1. H50 R4 (Espesor 50 mm y radio 4 mm)

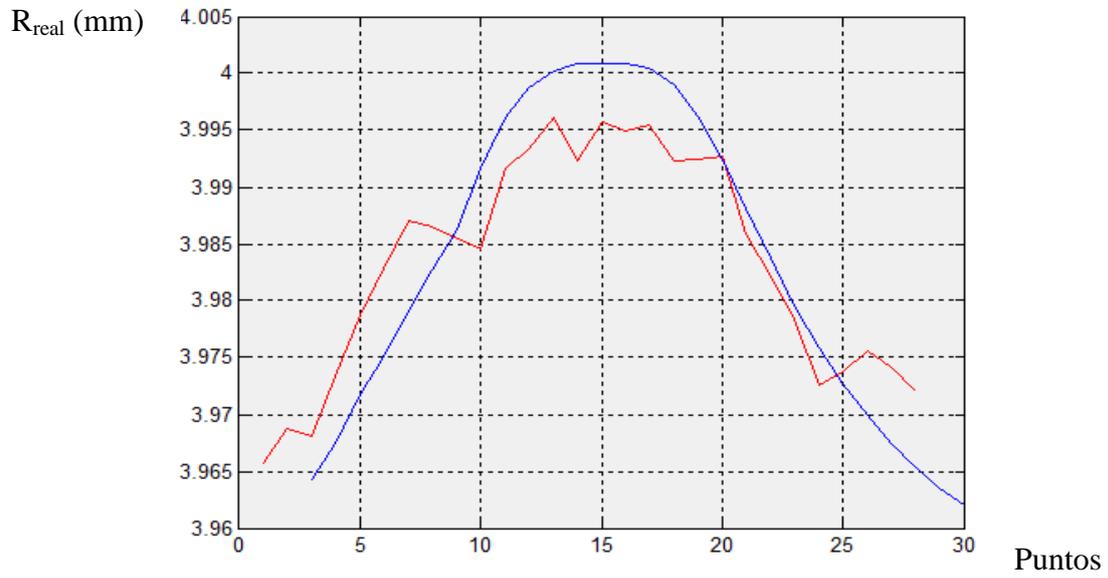
H50R4z-1.5



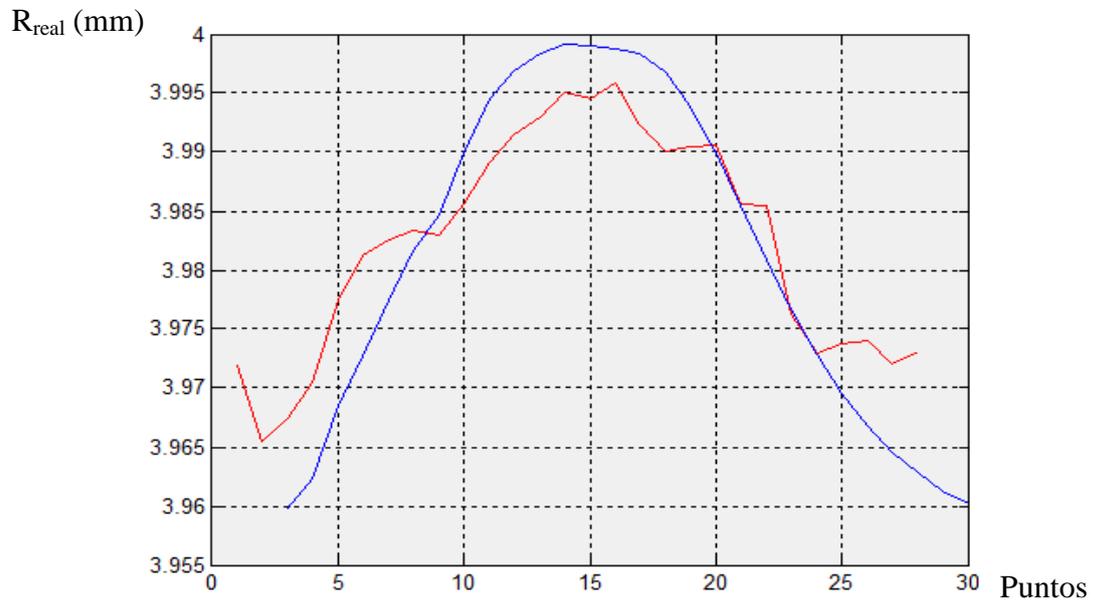
H50R4z-5



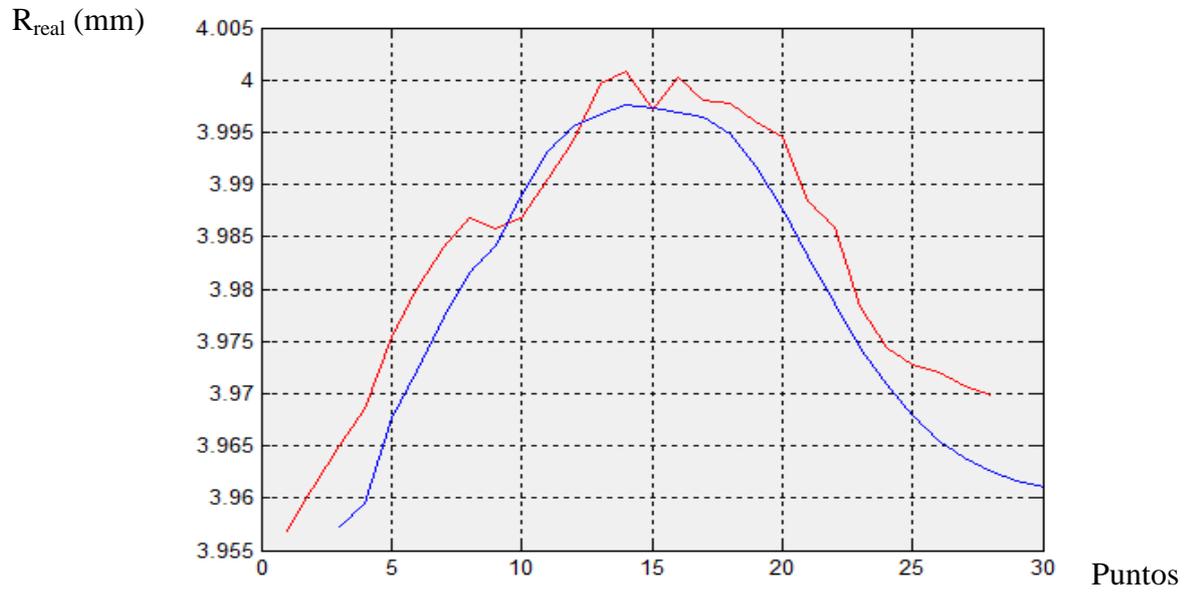
H50R4z-10



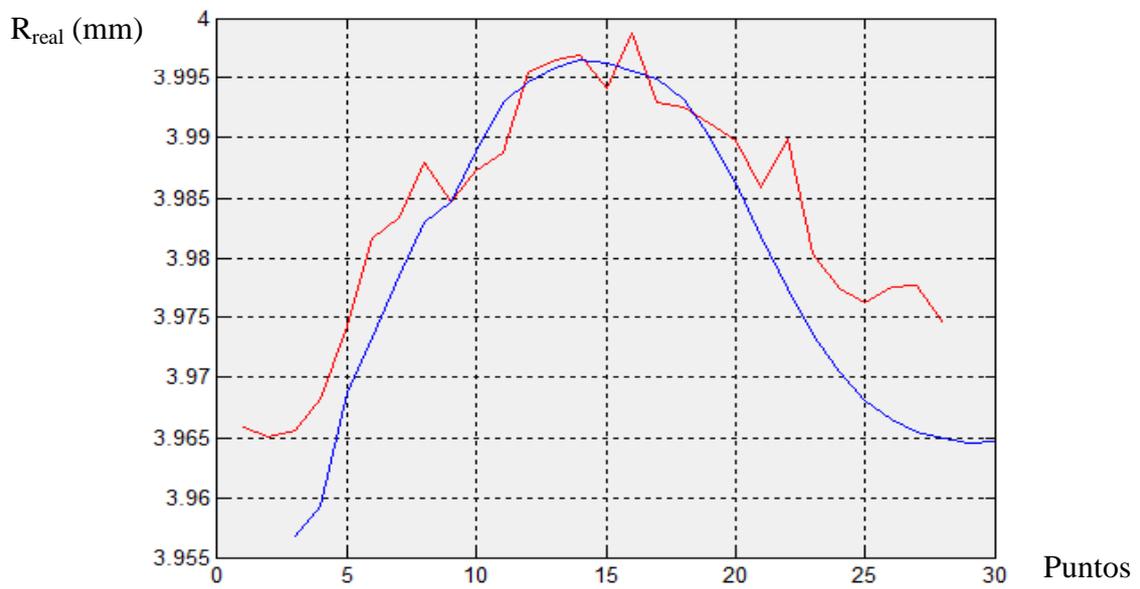
H50R4z-15



H50R4z-20



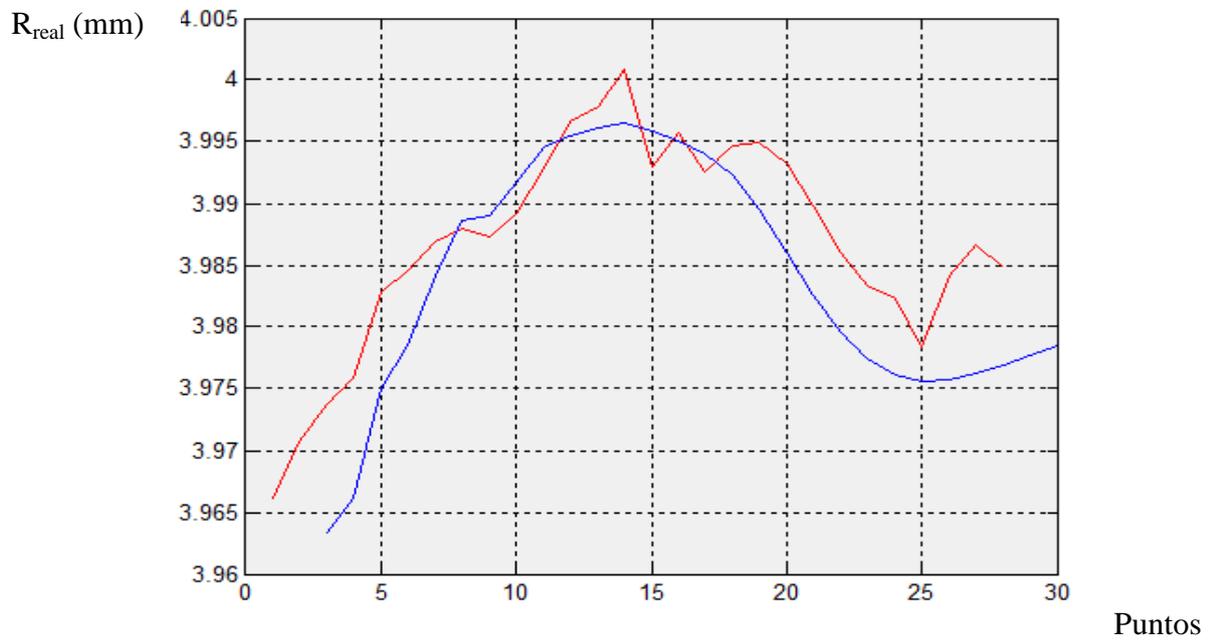
H50R4z-30



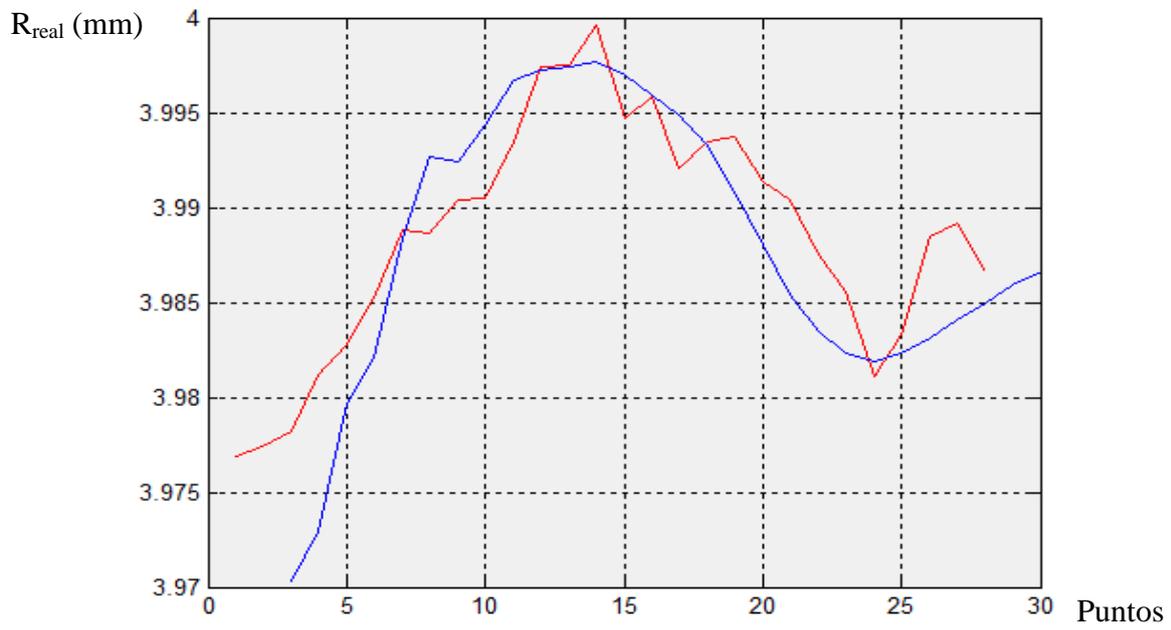
H50R4z-35



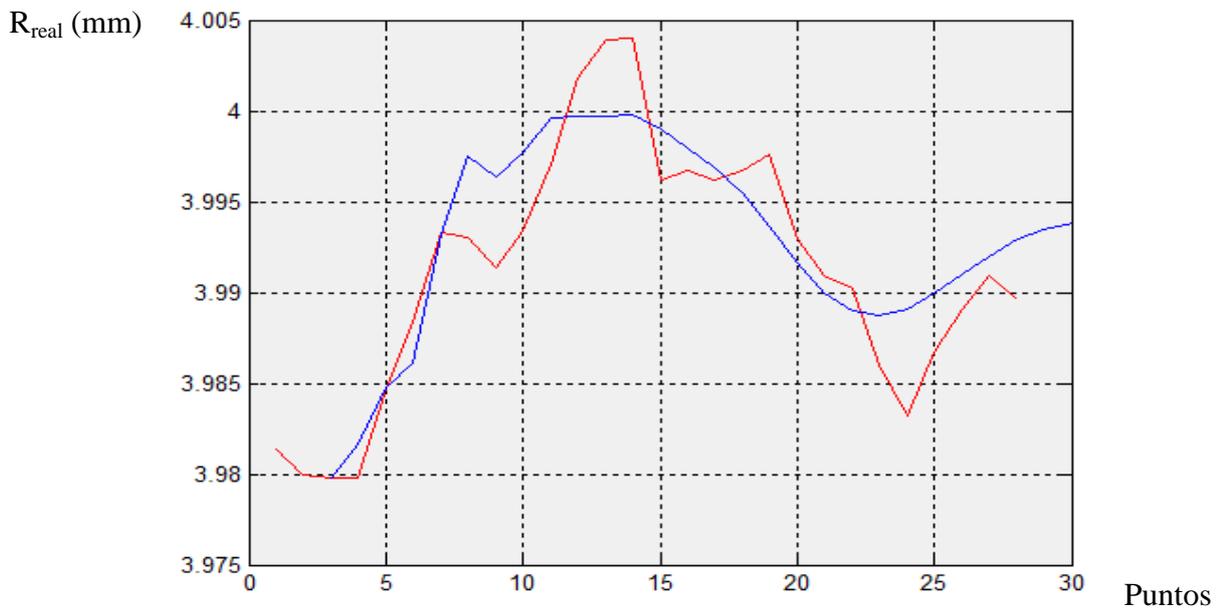
H50R4z-40



H50R4z-45



H50R4z-48.5



RESULTADOS DEL RADIO Y ERROR TABULADOS

A continuación se presentan ordenados por planos de medición los resultados de radio real medido mediante la MMC, y los predichos por la red (predicted), así como la diferencia entre ambos valores, es decir, el error.

z-1,5			z-5			z-10		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
3,9799		3,980	3,972		3,972	3,966		3,966
3,9765		3,977	3,972		3,972	3,969		3,969
3,9731	3,978	-0,014	3,972	3,970	0,001	3,968	3,964	0,004
3,9757	3,983	-0,011	3,974	3,975	-0,001	3,973	3,967	0,006
3,9845	3,987	-0,002	3,978	3,978	0,001	3,979	3,972	0,007
3,9865	3,986	-0,002	3,984	3,979	0,005	3,983	3,975	0,008
3,9890	3,986	-0,004	3,988	3,982	0,006	3,987	3,979	0,008
3,9901	3,989	-0,006	3,989	3,985	0,004	3,987	3,983	0,004
3,9884	3,993	-0,011	3,987	3,989	-0,002	3,985	3,986	-0,001
3,9885	3,996	-0,014	3,987	3,994	-0,007	3,985	3,992	-0,007
3,9935	4,000	-0,010	3,993	3,998	-0,005	3,992	3,996	-0,004
3,9949	4,002	-0,009	3,991	4,001	-0,010	3,993	3,999	-0,005
3,9955	4,004	-0,009	3,994	4,002	-0,008	3,996	4,000	-0,004
3,9973	4,004	-0,008	3,995	4,003	-0,007	3,992	4,001	-0,009
3,9986	4,005	-0,006	3,995	4,003	-0,008	3,996	4,001	-0,005
3,9979	4,005	-0,005	3,995	4,003	-0,008	3,995	4,001	-0,006
3,9988	4,005	-0,002	3,995	4,003	-0,008	3,995	4,001	-0,005
3,9991	4,003	0,002	3,994	4,001	-0,007	3,992	3,999	-0,007
3,9975	4,001	0,004	3,993	3,999	-0,005	3,992	3,996	-0,004
3,9978	3,997	0,008	3,994	3,995	0,000	3,993	3,992	0,000
3,9958	3,994	0,009	3,988	3,991	-0,003	3,986	3,988	-0,002
3,9929	3,990	0,009	3,988	3,987	0,001	3,982	3,984	-0,002
3,9841	3,986	0,003	3,979	3,983	-0,004	3,978	3,980	-0,001
3,9805	3,983	0,002	3,976	3,980	-0,004	3,973	3,976	-0,003
3,9791	3,981	0,003	3,976	3,977	0,000	3,974	3,973	0,001
3,9809	3,978	0,007	3,978	3,974	0,004	3,976	3,970	0,006
3,9792	3,976	0,007	3,978	3,972	0,006	3,974	3,967	0,007
3,9781	3,974	0,008	3,977	3,969	0,007	3,972	3,965	0,007
3,9774	3,972	0,005	3,978	3,968	0,010	3,963	3,963	0,000
3,9767	3,971	0,006	3,977	3,966	0,012	3,954	3,962	-0,008

z-15			z-20			z-30		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
3,9719		3,972	3,957		3,957	3,966		3,966
3,9655		3,965	3,961		3,961	3,965		3,965
3,9675	3,960	0,008	3,965	3,957	0,008	3,966	3,957	0,009
3,9704	3,962	0,008	3,968	3,960	0,009	3,968	3,959	0,009
3,9775	3,969	0,009	3,975	3,968	0,008	3,974	3,969	0,006
3,9813	3,973	0,009	3,980	3,972	0,008	3,982	3,973	0,008
3,9826	3,977	0,005	3,984	3,977	0,007	3,983	3,978	0,005
3,9833	3,982	0,002	3,987	3,982	0,005	3,988	3,983	0,005
3,9830	3,985	-0,002	3,986	3,984	0,002	3,985	3,985	0,000
3,9856	3,990	-0,004	3,987	3,989	-0,002	3,987	3,989	-0,002
3,9891	3,994	-0,005	3,991	3,993	-0,003	3,989	3,993	-0,004
3,9915	3,997	-0,005	3,994	3,995	-0,001	3,996	3,995	0,001
3,9929	3,998	-0,006	4,000	3,997	0,003	3,996	3,996	0,001
3,9951	3,999	-0,004	4,001	3,998	0,003	3,997	3,997	0,000
3,9946	3,999	-0,004	3,997	3,997	0,000	3,994	3,996	-0,002
3,9958	3,999	-0,003	4,000	3,997	0,003	3,999	3,996	0,003
3,9923	3,998	-0,006	3,998	3,996	0,002	3,993	3,995	-0,002
3,9900	3,997	-0,007	3,998	3,995	0,003	3,993	3,993	-0,001
3,9904	3,994	-0,003	3,996	3,992	0,004	3,991	3,990	0,001
3,9906	3,990	0,001	3,995	3,988	0,007	3,990	3,986	0,004
3,9856	3,985	0,000	3,988	3,983	0,005	3,986	3,982	0,004
3,9854	3,981	0,005	3,986	3,979	0,007	3,990	3,977	0,012
3,9762	3,977	0,000	3,978	3,974	0,004	3,980	3,974	0,007
3,9729	3,973	0,000	3,974	3,971	0,004	3,977	3,970	0,007
3,9737	3,970	0,004	3,973	3,968	0,005	3,976	3,968	0,008
3,9740	3,967	0,007	3,972	3,966	0,007	3,978	3,966	0,011
3,9721	3,965	0,007	3,971	3,964	0,007	3,978	3,965	0,012
3,9731	3,963	0,010	3,970	3,962	0,007	3,975	3,965	0,010
3,9706	3,961	0,009	3,968	3,962	0,007	3,974	3,965	0,010
3,9682	3,960	0,008	3,967	3,961	0,006	3,975	3,965	0,010

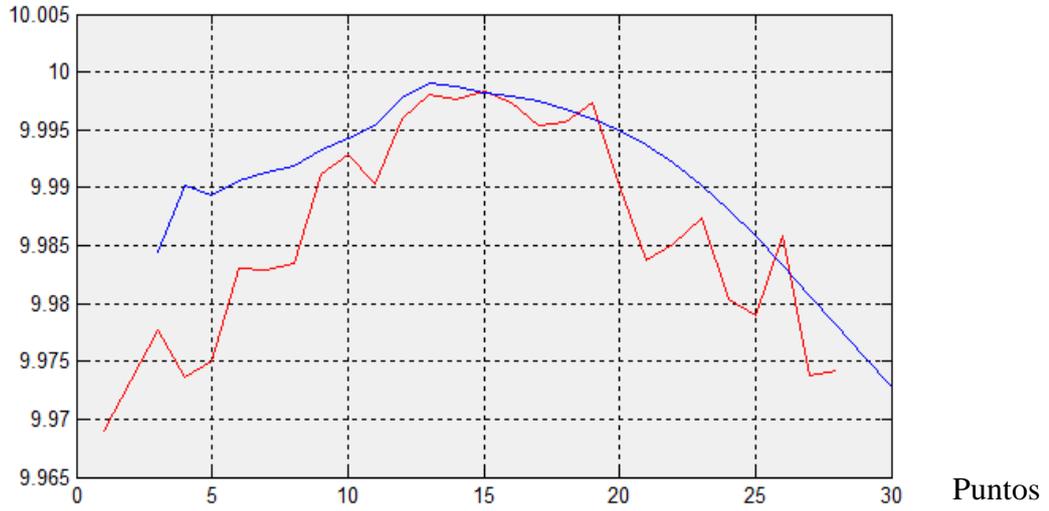
z-35			z-40			z-45		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
3,980		3,980	3,966		3,966	3,977		3,977
3,974		3,974	3,971		3,971	3,977		3,977
3,969	3,959	0,010	3,974	3,963	0,010	3,978	3,970	0,008
3,974	3,961	0,012	3,976	3,966	0,010	3,981	3,973	0,008
3,977	3,971	0,006	3,983	3,975	0,008	3,983	3,980	0,003
3,985	3,975	0,009	3,985	3,978	0,006	3,985	3,982	0,003
3,986	3,981	0,005	3,987	3,984	0,003	3,989	3,988	0,000
3,988	3,985	0,002	3,988	3,989	-0,001	3,989	3,993	-0,004
3,987	3,986	0,001	3,987	3,989	-0,002	3,990	3,992	-0,002
3,988	3,990	-0,002	3,989	3,992	-0,002	3,991	3,994	-0,004
3,995	3,993	0,001	3,993	3,995	-0,002	3,993	3,997	-0,003
3,996	3,995	0,001	3,997	3,995	0,001	3,997	3,997	0,000
4,001	3,996	0,005	3,998	3,996	0,002	3,998	3,997	0,000
4,001	3,996	0,005	4,001	3,996	0,004	4,000	3,998	0,002
3,994	3,996	-0,002	3,993	3,996	-0,003	3,995	3,997	-0,002
3,999	3,995	0,004	3,996	3,995	0,001	3,996	3,996	0,000
3,994	3,994	0,000	3,993	3,994	-0,001	3,992	3,995	-0,003
3,995	3,992	0,003	3,995	3,992	0,002	3,994	3,993	0,000
3,995	3,989	0,006	3,995	3,989	0,005	3,994	3,991	0,003
3,989	3,986	0,003	3,993	3,986	0,007	3,991	3,988	0,003
3,989	3,981	0,007	3,990	3,983	0,007	3,990	3,985	0,005
3,983	3,978	0,006	3,986	3,980	0,006	3,988	3,983	0,004
3,981	3,975	0,006	3,983	3,977	0,006	3,986	3,982	0,003
3,977	3,972	0,005	3,982	3,976	0,006	3,981	3,982	-0,001
3,977	3,971	0,007	3,978	3,976	0,003	3,983	3,982	0,001
3,980	3,970	0,010	3,984	3,976	0,008	3,988	3,983	0,005
3,979	3,970	0,009	3,987	3,976	0,010	3,989	3,984	0,005
3,977	3,970	0,007	3,985	3,977	0,008	3,987	3,985	0,002
3,975	3,970	0,005	3,981	3,978	0,003	3,983	3,986	-0,003
3,973	3,971	0,002	3,976	3,978	-0,003	3,979	3,987	-0,007

z-48,5		
Real	Predicted	Error
3,981		3,981
3,980		3,980
3,980	3,980	0,000
3,980	3,982	-0,002
3,985	3,985	0,000
3,988	3,986	0,002
3,993	3,993	0,000
3,993	3,997	-0,005
3,991	3,996	-0,005
3,993	3,998	-0,004
3,997	4,000	-0,002
4,002	4,000	0,002
4,004	4,000	0,004
4,004	4,000	0,004
3,996	3,999	-0,003
3,997	3,998	-0,001
3,996	3,997	-0,001
3,997	3,996	0,001
3,998	3,994	0,004
3,993	3,992	0,001
3,991	3,990	0,001
3,990	3,989	0,001
3,986	3,989	-0,003
3,983	3,989	-0,006
3,987	3,990	-0,003
3,989	3,991	-0,002
3,991	3,992	-0,001
3,990	3,993	-0,003
3,985	3,993	-0,008
3,981	3,994	-0,013

5.2.2.2.2. H80 R10 (Espesor 80 mm y radio 10 mm)

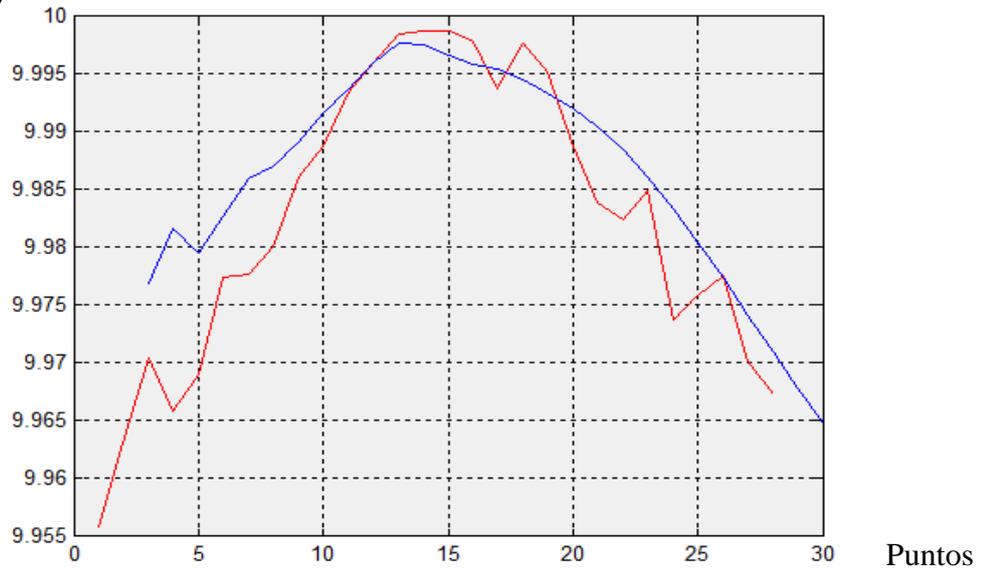
H80R10z-1.5

R_{real} (mm)

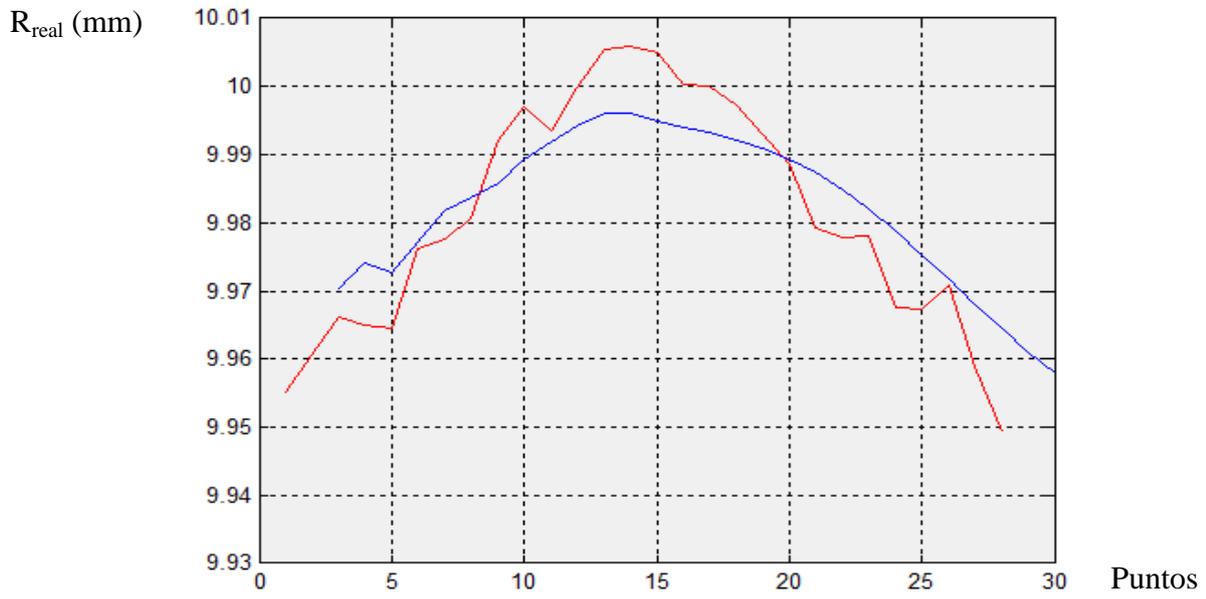


H80R10z-8

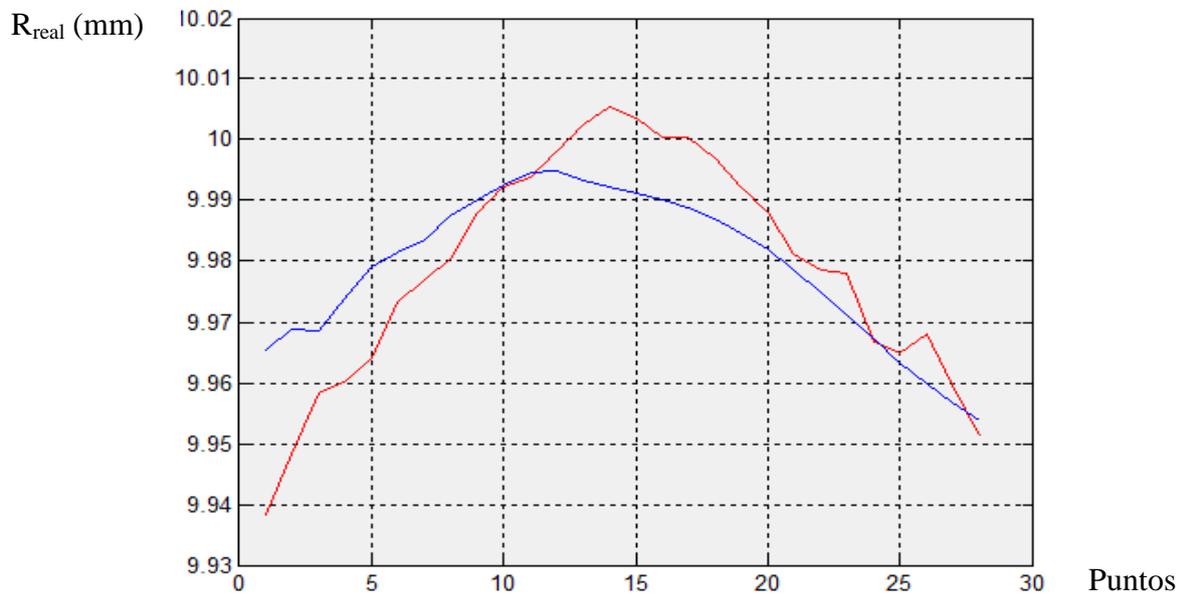
R_{real} (mm)



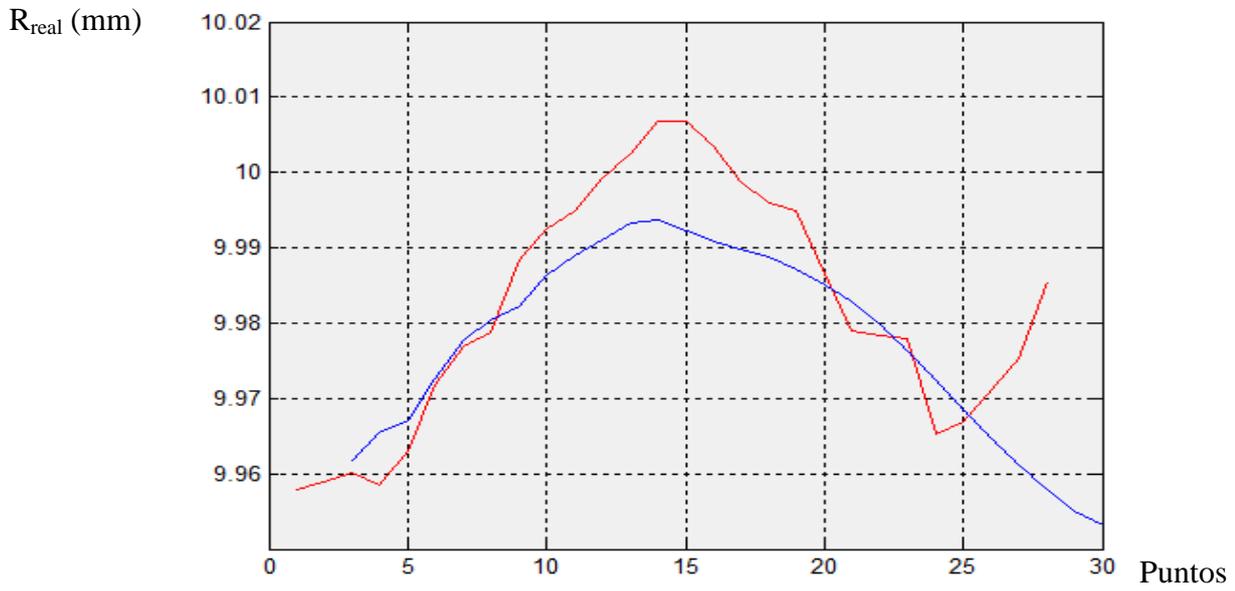
H80R10z-16



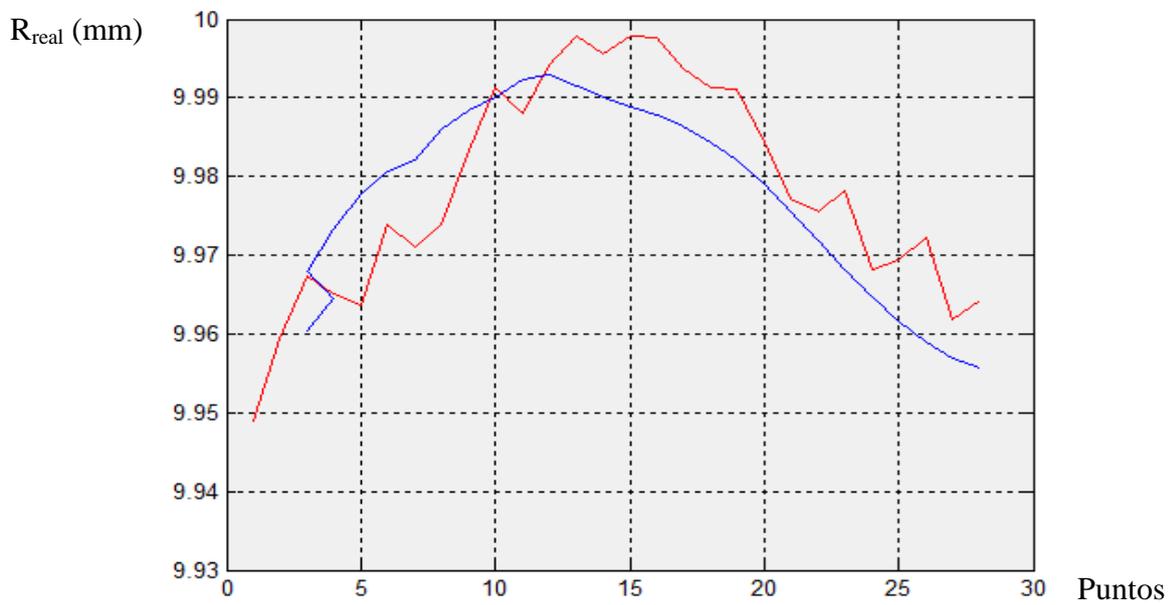
H80R10z-24



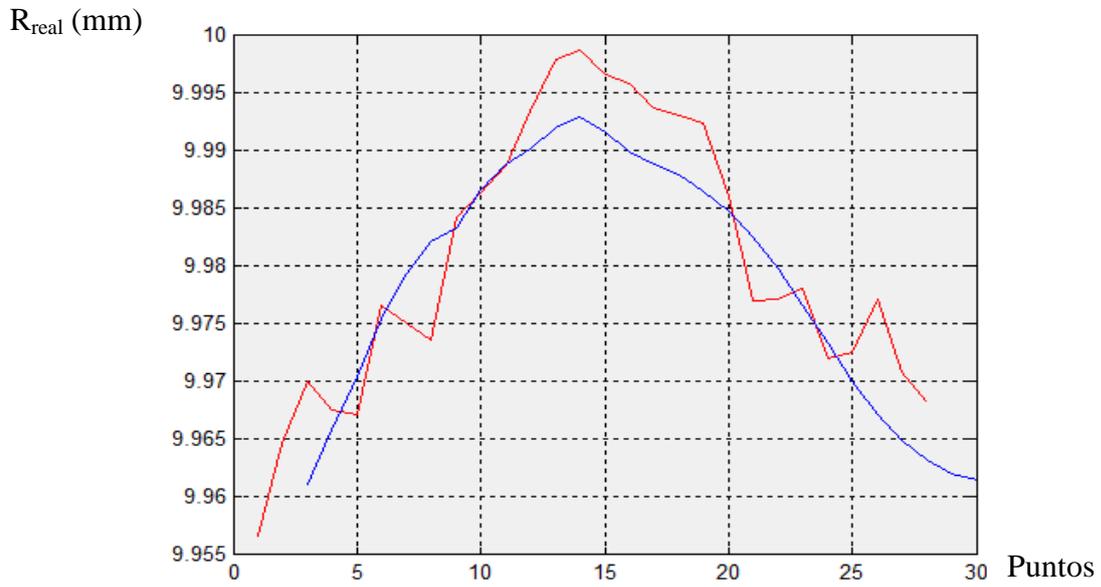
H80R10z-32



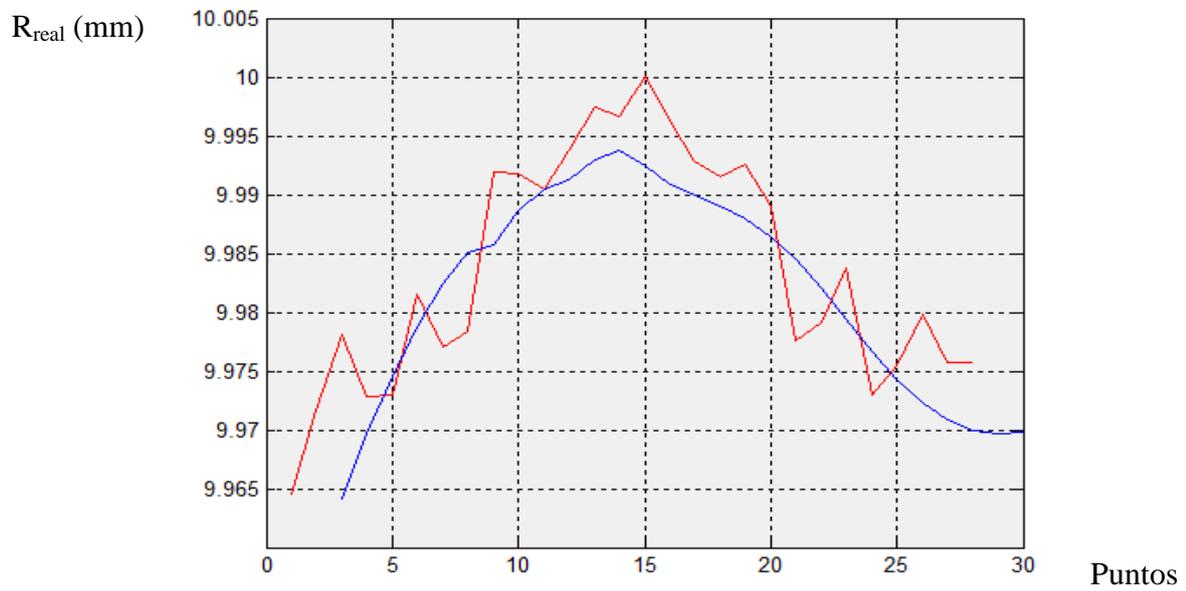
H80R10z-48



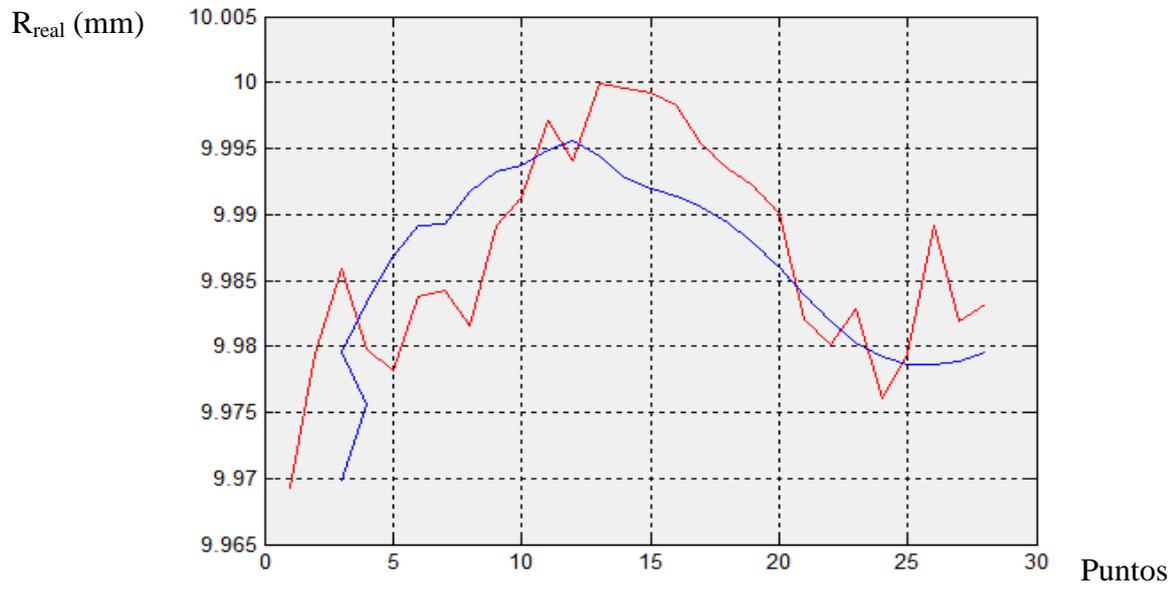
H80R10z-56



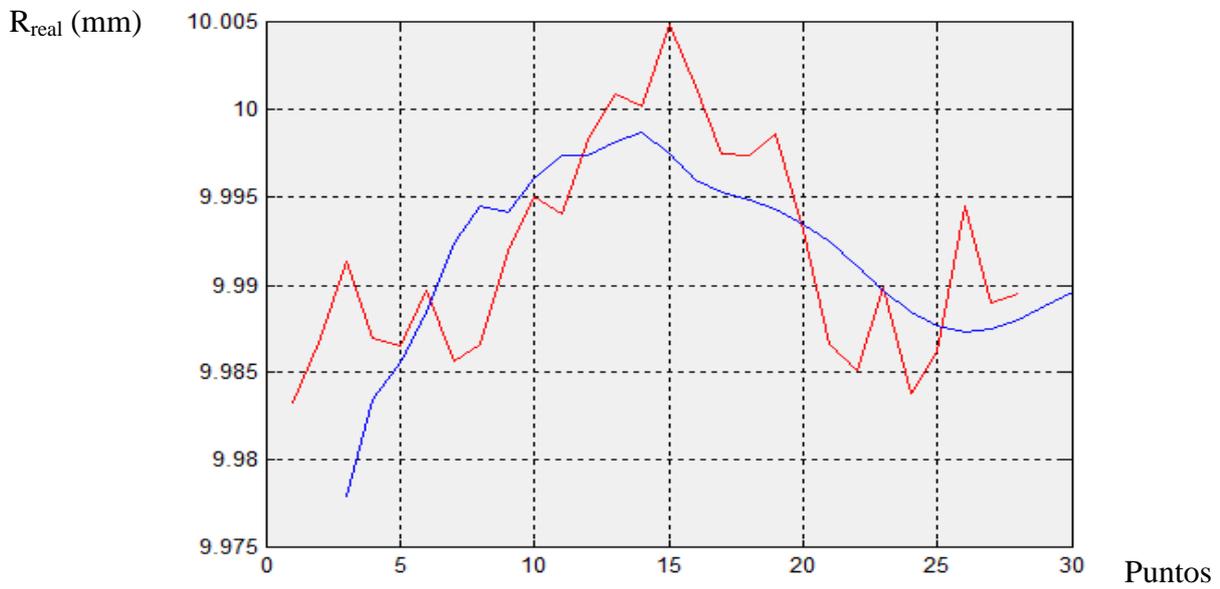
H80R10z-64



H80R10z-72



H80R10z-78.5



RESULTADOS DEL RADIO Y ERROR TABULADOS

A continuación se presentan ordenados por planos de medición los resultados de radio real medido mediante la MMC, y los predichos por la red (predicted), así como la diferencia entre ambos valores, es decir, el error.

z-1,5			z-8			z-16		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
9,969		9,969	9,956		9,956	9,955		9,955
9,973		9,973	9,963		9,963	9,961		9,961
9,978	9,984	-0,012	9,970	9,977	-0,007	9,966	9,970	-0,004
9,974	9,990	-0,017	9,966	9,982	-0,016	9,965	9,974	-0,009
9,975	9,989	-0,016	9,969	9,980	-0,011	9,965	9,973	-0,008
9,983	9,991	-0,009	9,977	9,983	-0,005	9,976	9,977	-0,001
9,983	9,991	-0,010	9,978	9,986	-0,008	9,977	9,982	-0,004
9,983	9,992	-0,011	9,980	9,987	-0,007	9,981	9,984	-0,003
9,991	9,993	-0,004	9,986	9,989	-0,003	9,992	9,986	0,006
9,993	9,994	-0,005	9,989	9,992	-0,003	9,997	9,989	0,008
9,990	9,995	-0,009	9,994	9,994	0,000	9,994	9,992	0,002
9,996	9,998	-0,003	9,996	9,996	0,000	10,000	9,994	0,006
9,998	9,999	0,000	9,999	9,998	0,001	10,005	9,996	0,009
9,998	9,999	0,000	9,999	9,998	0,001	10,006	9,996	0,010
9,998	9,998	0,001	9,999	9,997	0,002	10,005	9,995	0,010
9,997	9,998	0,001	9,998	9,996	0,002	10,000	9,994	0,006
9,995	9,997	-0,001	9,994	9,995	-0,002	10,000	9,993	0,007
9,996	9,997	0,001	9,998	9,995	0,003	9,997	9,992	0,005
9,997	9,996	0,004	9,995	9,993	0,002	9,993	9,991	0,002
9,990	9,995	-0,002	9,989	9,992	-0,003	9,989	9,989	-0,001
9,984	9,994	-0,007	9,984	9,991	-0,007	9,979	9,987	-0,008
9,985	9,992	-0,003	9,982	9,988	-0,006	9,978	9,985	-0,007
9,987	9,990	0,002	9,985	9,986	-0,001	9,978	9,982	-0,004
9,980	9,988	-0,003	9,974	9,983	-0,010	9,968	9,979	-0,011
9,979	9,986	-0,002	9,976	9,980	-0,005	9,967	9,975	-0,008
9,986	9,983	0,008	9,978	9,977	0,000	9,971	9,972	-0,001
9,974	9,981	-0,002	9,970	9,974	-0,004	9,959	9,968	-0,009
9,974	9,978	0,001	9,967	9,971	-0,004	9,949	9,965	-0,015
9,975	9,975	-0,001	9,963	9,968	-0,004	9,939	9,961	-0,022
9,975	9,973	0,002	9,959	9,965	-0,005	9,930	9,958	-0,028

z-24			z-32			z-48		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
9,938		9,938	9,958		9,958	9,949		9,949
9,948		9,948	9,959		9,959	9,959		9,959
9,958	9,965	-0,007	9,960	9,962	-0,002	9,967	9,960	0,007
9,960	9,969	-0,009	9,959	9,965	-0,007	9,965	9,965	0,001
9,964	9,969	-0,004	9,963	9,967	-0,004	9,964	9,968	-0,004
9,973	9,974	0,000	9,972	9,973	-0,001	9,974	9,973	0,001
9,977	9,979	-0,002	9,977	9,978	-0,001	9,971	9,978	-0,007
9,980	9,981	-0,001	9,979	9,980	-0,002	9,974	9,981	-0,007
9,988	9,983	0,005	9,988	9,982	0,006	9,983	9,982	0,001
9,992	9,987	0,005	9,992	9,986	0,006	9,991	9,986	0,005
9,994	9,990	0,004	9,995	9,989	0,006	9,988	9,988	0,000
9,998	9,992	0,006	9,999	9,991	0,008	9,994	9,990	0,004
10,002	9,995	0,008	10,003	9,993	0,009	9,998	9,992	0,006
10,005	9,995	0,011	10,007	9,994	0,013	9,996	9,993	0,003
10,004	9,993	0,010	10,007	9,992	0,015	9,998	9,992	0,006
10,000	9,992	0,008	10,004	9,991	0,013	9,998	9,990	0,008
10,000	9,991	0,009	9,999	9,990	0,009	9,994	9,989	0,005
9,997	9,990	0,007	9,996	9,989	0,007	9,991	9,988	0,004
9,992	9,989	0,004	9,995	9,987	0,008	9,991	9,986	0,005
9,988	9,987	0,001	9,986	9,985	0,001	9,984	9,984	0,000
9,981	9,985	-0,003	9,979	9,983	-0,004	9,977	9,982	-0,005
9,979	9,982	-0,003	9,978	9,980	-0,001	9,975	9,979	-0,004
9,978	9,979	-0,001	9,978	9,976	0,002	9,978	9,976	0,003
9,967	9,975	-0,008	9,965	9,972	-0,007	9,968	9,972	-0,004
9,965	9,971	-0,006	9,967	9,969	-0,002	9,969	9,968	0,001
9,968	9,967	0,001	9,971	9,965	0,007	9,972	9,965	0,008
9,960	9,963	-0,004	9,975	9,961	0,014	9,962	9,962	0,000
9,951	9,960	-0,009	9,986	9,958	0,028	9,964	9,959	0,005
9,942	9,957	-0,014	9,996	9,955	0,041	9,974	9,957	0,017
9,934	9,954	-0,020	10,006	9,953	0,053	9,983	9,956	0,028

z-56			z-64			z-72		
Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error	Real	Predicted	Error
9,957		9,957	9,964		9,964	9,969		9,969
9,965		9,965	9,972		9,972	9,979		9,979
9,970	9,961	0,009	9,978	9,964	0,014	9,986	9,970	0,016
9,967	9,966	0,002	9,973	9,970	0,003	9,980	9,976	0,004
9,967	9,971	-0,003	9,973	9,975	-0,002	9,978	9,980	-0,001
9,977	9,975	0,001	9,982	9,979	0,003	9,984	9,983	0,001
9,975	9,979	-0,004	9,977	9,982	-0,005	9,984	9,987	-0,003
9,974	9,982	-0,009	9,978	9,985	-0,007	9,981	9,989	-0,008
9,984	9,983	0,001	9,992	9,986	0,006	9,989	9,989	0,000
9,986	9,987	0,000	9,992	9,989	0,003	9,991	9,992	-0,001
9,989	9,989	0,000	9,990	9,990	0,000	9,997	9,993	0,004
9,993	9,990	0,003	9,994	9,991	0,002	9,994	9,994	0,000
9,998	9,992	0,006	9,997	9,993	0,005	10,000	9,995	0,005
9,999	9,993	0,006	9,997	9,994	0,003	10,000	9,996	0,004
9,997	9,992	0,005	10,000	9,992	0,008	9,999	9,994	0,005
9,996	9,990	0,006	9,996	9,991	0,005	9,998	9,993	0,005
9,994	9,989	0,005	9,993	9,990	0,003	9,995	9,992	0,003
9,993	9,988	0,005	9,992	9,989	0,002	9,993	9,991	0,002
9,992	9,987	0,006	9,993	9,988	0,005	9,992	9,990	0,002
9,986	9,985	0,001	9,989	9,986	0,003	9,990	9,989	0,001
9,977	9,983	-0,006	9,978	9,985	-0,007	9,982	9,988	-0,006
9,977	9,980	-0,003	9,979	9,982	-0,003	9,980	9,986	-0,006
9,978	9,977	0,002	9,984	9,979	0,004	9,983	9,984	-0,001
9,972	9,973	-0,001	9,973	9,977	-0,004	9,976	9,982	-0,006
9,973	9,970	0,003	9,975	9,974	0,001	9,979	9,980	-0,001
9,977	9,967	0,010	9,980	9,972	0,008	9,989	9,979	0,010
9,971	9,965	0,006	9,976	9,971	0,005	9,982	9,979	0,003
9,968	9,963	0,005	9,976	9,970	0,006	9,983	9,979	0,005
9,973	9,962	0,011	9,977	9,970	0,008	9,984	9,979	0,005
9,978	9,961	0,016	9,978	9,970	0,009	9,985	9,980	0,006

z-78,5		
Real	Predicted	Error
9,983		9,983
9,987		9,987
9,991	9,978	0,013
9,987	9,984	0,003
9,987	9,986	0,001
9,990	9,989	0,001
9,986	9,992	-0,007
9,987	9,994	-0,008
9,992	9,994	-0,002
9,995	9,996	-0,001
9,994	9,997	-0,003
9,998	9,997	0,001
10,001	9,998	0,003
10,000	9,999	0,001
10,005	9,998	0,007
10,001	9,996	0,005
9,997	9,995	0,002
9,997	9,995	0,003
9,999	9,994	0,004
9,993	9,994	0,000
9,987	9,992	-0,006
9,985	9,991	-0,006
9,990	9,990	0,000
9,984	9,989	-0,005
9,986	9,988	-0,001
9,994	9,987	0,007
9,989	9,987	0,002
9,989	9,988	0,001
9,996	9,989	0,007
10,004	9,990	0,014

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. HORAS INTERNAS	3
3. INVERSIONES	4
4. GASTOS.....	5
5. LICENCIAS Y SOFTWARE	6
6. PRESUPUESTO.....	7

1. INTRODUCCIÓN

Para desarrollar el presente proyecto es necesario conjugar una serie de medios humanos y materiales, con el fin de lograr el objetivo final del mismo.

La participación e interacción de todos los medios materiales y humanos que intervienen en el desarrollo del este proyecto, supone un desembolso económico que es necesario satisfacer a fin de obtener los resultados deseados.

En este documento se van a describir las cantidades y los precios actuales de todos los recursos materiales y humanos que entran en juego en el desarrollo del proyecto.

El documento consta de las siguientes partes:

- Horas internas: horas invertidas por el personal para la consecución del proyecto.
- Inversiones: activos de la empresa que sufrirán una pérdida de valor debido a su utilización y que hay que considerar como gasto.
- Gastos: materiales y bienes que se consumen al ser utilizados y, por tanto, no sirven para proyectos posteriores.
- Presupuesto final: se recoge el coste total del proyecto.

2. HORAS INTERNAS

Las horas invertidas por las personas necesarias para la realización de este proyecto son las que se muestran en la tabla siguiente:

Trabajador	Coste horario	Horas	Coste
Ing. Industrial senior	60,00 €/h	40	2.400,00 €
Ing. Industrial junior	30,00 €/h	750	22.500,00 €
Jefe de taller	40,00 €/h	25	1.000,00 €
Total			25.900,00 €

Tabla 1. Horas internas.

3. INVERSIONES

En este apartado se incluyen aquellos activos de la empresa (en este caso el Taller Mecánico de la E.T.S.I.B) que se han utilizado en la realización del proyecto, sufriendo una pérdida de valor que hay que considerar como gasto:

Activo fijo	Coste adquisición	Vida útil	Horas de uso	Amortización
Máquina de WEDM ONA AX3	200.000,00 €	5 años	400	16.000,00 €
Máquina de Medir por Coordenadas ZEISS	60.000,00 €	10 años	500	3.000,00 €
Ordenador	1000,00 €	5 años	300	60,00 €
Total				19.060,00 €

NOTA: se suponen 1000h de trabajo por cada año.

Tabla 2. Inversiones.

4. GASTOS

En esta partida se incluyen aquellos materiales y bienes que se consumen al ser utilizados, por lo que no sirven para proyectos posteriores.

Activos fijos	Precio/ud.	Nº unidades	Importe
Materiales para los ensayos			
Hilo ONA DIN 160 0,25 900N 8kg	99,32 €	3	297,96 €
Tocho Acero F114 con tratamiento térmico (Espesor 100 mm)	300,00 €	1	300,00 €
Tocho Acero F114 con tratamiento térmico (Espesor 80 mm)	270,00 €	1	270,00 €
Tocho Acero F114 con tratamiento térmico (Espesor 70 mm)	250,00 €	1	250,00 €
Tocho Acero F114 con tratamiento térmico (Espesor 50 mm)	220,00 €	1	220,00 €
Tocho Acero F114 con tratamiento térmico (Espesor 40mm)	200,00 €	1	200,00 €
Total			1537,96 €

Tabla 3. Gastos.

5. LICENCIAS Y SOFTWARE

En esta partida se incluyen los programas informáticos utilizados para llevar a cabo el presente estudio.

Activo fijo	Coste adquisición	Vida útil	Horas de uso	Amortización
Licencia Software NX 9.0	17.000,00 €	10 años	100	170,00 €
Licencia Software Matlab R2011b	6.000,00 €	10 años	40	24,00 €
Licencia Software MMC (Holos)	3000,00 €	10 años	350	105,00 €
Total				299,00 €

6. PRESUPUESTO

El presupuesto completo se muestra en la siguiente tabla:

Concepto	Precio Total
TOTAL HORAS INTERNAS	25.900 €
TOTAL INVERSIONES	19.060,00 €
TOTAL GASTOS	1537,96 €
TOTAL LICENCIAS Y SOFTWARE	299,00 €
PRESUPUESTO TOTAL	46796,96 €

Cabe destacar que de no haber utilizado una Red Neuronal Artificial (RNA) para la predicción del error, el presupuesto hubiese sido mucho mayor ya que se hubiesen necesitado muchos más tochos de Acero donde cortar las probetas de numerosos radios, más horas internas de trabajo, gastos de material, etc. Es evidente por tanto, que en el estudio se ha logrado un importante ahorro económico y humano.

5.4. PROGRAMAS CNC DE LAS PROBETAS

En este documento se presentan los programas en lenguaje CNC de todas las probetas cortadas en el estudio. Cabe destacar que no se han dividido por espesores puesto que el postprocesado no tiene en cuenta el espesor, como ya se ha explicado en el apartado “3.6.2.4. Corte de las probetas”, el espesor se introduce en el ordenador de la máquina de corte por hilo *ONA AX3*.

5.5.1. Probetas de radios 1, 1.5 y 3 mm.

N0010 G41 G01 G91 X0.0 Y10. U0.0 V0.0

N0020 X11.

N0030 Y12.

N0040 G02 G90 X12. I-.5 J-.866

N0050 G01 G91 Y10.

N0060 X23.

N0070 Y12.

N0080 G02 G90 X25. I-1. J-1.118

N0090 G01 G91 Y10.

N0100 X38.

N0110 Y12.

N0120 G02 G90 X40. J-2.8284

N0130 G01 G91 Y10.

N0140 X43.

N0150 Y0.0

N0160 X0.0

N0170 Y10.

N0180 X-2.5

N0190 M02

5.5.2. Probetas de radios 5, 9 y 12 mm.

N0010 G41 G01 G91 X0.0 Y0.0 U0.0 V0.0

N0020 X14.817

N0030 Y2.

N0040 G02 G90 X11.8367 Y9.9373 I-.9973 J-4.9026

N0050 X20.4739 Y8.7397 I-3.9796 J3.0436

N0060 X16.817 Y2. I4.6548 J1.8363

N0070 G01 G91 Y0.0

N0080 X40.817

N0090 Y2.

N0100 G02 G90 X34.9431 Y5.1325 I-.8562 J-8.679

N0110 G01 G91 X33.9586 Y6.5291

N0120 G02 G90 X41.817 Y19.9458 I-7.822 J-4.4283

N0130 G01 G91 X43.5195 Y19.7958

N0140 G02 G90 X48.6909 Y5.1325 I1.669 J8.8322

N0150 X42.817 Y2. I6.7301 J-5.5467

N0160 G01 G91 Y0.0

N0170 X72.817

N0180 Y2.

N0190 G02 G90 X74.817 I-1. J-11.9583

N0200 G01 G91 Y0.0

N0210 X79.634

N0220 Y-9.817

N0230 X0.0

N0240 Y0.0

N0250 X-2.5

N0260 M02

5.5.3. Probetas de radio 15 mm.

N0010 G41 G01 G91 X0.0 Y0.0 U0.0 V0.0

N0020 Y9.817

N0030 X-14.817

N0040 Y11.817

N0050 G03 G90 X-16.817 I1. J-14.9666

N0060 G01 G91 Y9.817

N0070 X-39.634

N0080 Y0.0

N0090 X0.0

N0100 Y2.5

N0110 M02

5.5.4. Probetas de radio 20 mm

N0010 G41 G01 G91 X0.0 Y0.0 U0.0 V0.0

N0020 Y9.817

N0030 X-14.817

N0040 Y11.817

N0050 G03 G90 X.6386 Y43.167 I1.0065 J-19.981

N0060 X-34.1469 Y39.7917 I16.4534 J11.3685

N0070 X-16.817 Y11.817 I-18.3296 J8.0002

N0080 G01 G91 Y9.817

N0090 X-41.634

N0100 Y0.0

N0110 X0.0

N0120 Y2.5

N0130 M02

5.5. MACRO IMPORTAR TXT (Lenguaje Visual Basic)

Sub importar()

Dim filainicial As Integer

Dim columnainicial As Integer

Dim npuntos As Integer

Dim fila As Integer

Sheets.Add After:=Sheets(Sheets.Count)

With ActiveSheet.QueryTables.Add (Connection:= _

"TEXT; J:\", Destination:=Range ("A\$1"))

.Name = "z-20"

.FieldNames = True

.RowNumbers = False

.FillAdjacentFormulas = False

.PreserveFormatting = True

.RefreshOnFileOpen = False

.RefreshStyle = xlInsertDeleteCells

.SavePassword = False

.SaveData = True

.AdjustColumnWidth = True

.RefreshPeriod = 0

.TextFilePromptOnRefresh = False

.TextFilePlatform = 850

.TextFileStartRow = 1

.TextFileParseType = xlFixedWidth

```
.TextFileTextQualifier = xlTextQualifierDoubleQuote
.TextFileConsecutiveDelimiter = False
.TextFileTabDelimiter = True
.TextFileSemicolonDelimiter = False
.TextFileCommaDelimiter = False
.TextFileSpaceDelimiter = False
.TextFileColumnDataTypes = Array (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
.TextFileFixedColumnWidths = Array (7, 11, 10, 9, 9, 8, 9)
.TextFileTrailingMinusNumbers = True
.Refresh BackgroundQuery:=False
```

End With

'Cálculo número de puntos a coger

```
Cells (1, 9) = "=MAX(R [23] C [-8]: R[338]C[-8])"
```

```
npuntos = Cells (1, 9).Value
```

```
MsgBox "Se han cogido " & npuntos & " puntos"
```

```
filainicial = 24
```

```
columnainicial = 2
```

'coordenadas teoricas y nominales

```
Cells (filainicial - 1, columnainicial + 7) = "Punto"
```

```
Cells (filainicial - 1, columnainicial + 8) = "Xreal"
```

```
Cells (filainicial - 1, columnainicial + 9) = "Yreal"
```

```
Cells (filainicial - 1, columnainicial + 10) = "Xnom"
```

```
Cells (filainicial - 1, columnainicial + 11) = "Ynom"
```

Cells (filainicial - 1, columnainicial + 12) = "Ex"

Cells (filainicial - 1, columnainicial + 13) = "Ey"

Cells (filainicial - 1, columnainicial + 14) = "D. Radial"

For k = 1 To npuntos

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 7) = k

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 8) = Cells (filainicial + 3 * k - 3, columnainicial) / 10000

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 9) = Cells (filainicial + 3 * k - 3, columnainicial + 1) / 10000

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 10) = Cells (filainicial + 1 + 3 * k - 3, columnainicial) / 10000

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 11) = Cells (filainicial + 1 + 3 * k - 3, columnainicial + 1) / 10000

Next

'desviaciones

For k = 1 To npuntos

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 12) = Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 8) - Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 10)

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 13) = Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 9) - Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 11)

Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 14).Value = Sqr ((Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 12).Value) ^ 2 + (Cells (filainicial + k - 1, columnainicial + 13).Value) ^ 2)

Next

'Seleccionar datos a copiar

Let Copyrange = "I" & filainicial & ":" & "P" & filainicial + npuntos - 1

Range (Copyrange).Select

End Sub

