

Informe Técnico para el CICYT

Título: “Método de Fabricación para la Producción de Bridas de Guías de Onda”

Autores: Carlos Mayorga Gualpa¹
Iganacio Wiesner F.²

¹ Ingeniero Mecánico 2001

² Director de Tesis, Ingeniero Mecánico, ESPOL, 1972; Profesor de ESPOL desde 1976.

Resumen:

El presente trabajo tiene como finalidad determinar los procesos de maquinado más adecuados para la fabricación de bridas de guías de onda de radar, primero con máquinas herramientas manuales, luego hacer una proyección de su producción en serie con máquinas de control numérico, finalmente realizar las pruebas correspondientes para su posterior evaluación.

Las guías de onda de radar son elementos constitutivos de los sistemas de radar a través de los cuales son transmitidas ondas electromagnéticas.

La realización del presente trabajo está orientada principalmente a la construcción de los acoples mecánicos o bridas de las guías de onda para lo cual se inició haciendo una breve revisión de ciertos aspectos de transmisión de ondas a través de las guías, los tipos de bridas y sus características técnicas para de esta manera poder establecer un método de fabricación de las bridas considerando estos aspectos.

Luego se procederá a la construcción de estas bridas partiendo de la fundición del material en sí hasta llegar a los procesos de maquinado acabado final y maquinado por electroerosión. Paralelamente se hará una introducción al control numérico (CNC) y se estudiará la posibilidad de maquinado de estas bridas en este tipo de máquinas como una alternativa para su producción en serie acompañado también del maquinado por electroerosión.

Finalmente se procederá a realizar las pruebas correspondientes a tramos de guías de onda en laboratorio con equipos electrónicos en donde se podrá determinar si estos elementos cumplen o no con los requerimientos de funcionamiento dentro de un rango determinado.

Introducción:

Hace aproximadamente un año se planteó realizar un proyecto de Investigación y Desarrollo entre la ESPOL y la Armada del Ecuador para la fabricación de una guía de onda de radar de la Corbeta Manabí. En ese entonces en coordinación con el DINNAV (Dirección de Ingeniería Naval) y luego de un arduo trabajo investigativo fue posible la construcción de una guía de onda.

La fabricación de esta guía de onda fue por el proceso de extrusión que se llevó a cabo en la instalaciones de la empresa FISA (Fundiciones Industriales S.A.) que se especializa en fabricar perfiles, tubos huecos de sección rectangular y cuadrada en aluminio. En esta parte que fue la inicial de dicho proyecto se logró producir 18m de tubo con una condición de precisión del orden del 95%.

Debido a la no existencia de ciertos elementos o acoples, no se pudo realizar la prueba de funcionamiento a la guía de onda construida. Por esta razón se debió continuar

con este proyecto en una segunda etapa en la que el objetivo principal es fabricación de los acoples que se requieren para poder evaluar electrónicamente una guía de onda de una longitud determinada y como se podrá observar posteriormente existen algunos tipos de acoples también llamados *bridas* que tienen ciertas características de acuerdo al uso que se dará a cada una. Se construirán dos tipos diferentes de estas bridas, en donde el maquinado se lo realizará mediante el uso de un software que controla a dos máquinas de control numérico (CNC) debido a las ventajas que representa el uso de este tipo de tecnología, y finalmente serán evaluadas por separado (a cada modelo) con lo que se determinará la factibilidad de su fabricación en nuestro medio.

ANTECEDENTES Y PROBLEMA ACTUAL

PROYECTO DE FABRICACION DE GUIAS DE ONDA

El proyecto de fabricación de guías de onda nace como consecuencia de un proyecto de Investigación y Desarrollo planteado por la ESPOL a el DINNAV (Dirección de Ingeniería Naval) de la Armada del Ecuador para la fabricación de una guía de onda de radar de la Corbeta Manabí, perteneciente al Cuerpo de Corbetas de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

Las guías de onda de radar son elementos que forman parte de los sistemas de radar, que en definitiva no son mas que cavidades de sección rectangular, en las que, por su interior se conducen ondas electromagnéticas.

Un sistema de radar es un sistema de detección y medida de distancias mediante ondas electromagnéticas (Radio Detection and Ranging) diseñado y construido para determinar el rango de posición y dirección de objetos tales como barcos y aviones .Los radares trabajan por lo general en longitudes de onda comprendidas entre 100m (ondas cortas) o mayores, y 10^{-7} m (ultravioleta) o más cortas.

Los componentes de un sistema de radar son: antena, transmisor, receptor y procesador de señal, y la parte de instrumentación.

Para transmitir la señal del alimentador de una antena giratoria con el transmisor o con el receptor son necesarios elementos tales como tramos flexibles de guías de onda, tramos rígidos de guías de onda, codos de guías de onda y juntas de acople giratorias (bridas).

Los tramos rígidos de guías de onda ya fueron construidos en la primera parte de este proyecto aunque debido a la falta de los acoples o bridas no fue posible hacer las respectivas pruebas en dichos tramos. Las dimensiones principales de una guía de onda de sección rectangular son precisamente las de su sección transversal con una relación de ancho por altura de alrededor de 2:1; su longitud depende únicamente del lugar en donde se va instalar dicho tramo de guía, las guías de onda que hacemos referencia en este proyecto trabajan en la banda S y sus dimensiones interiores son 34 x 72.1 mm.

Para este caso en particular vamos a dedicarnos específicamente a estudiar los procesos de manufactura mas apropiados que se involucran en la fabricación de las juntas de acople giratorias o bridas y posteriormente poder determinar una metodología para su producción.

FABRICACION DE BRIDAS

A continuación vamos a hacer énfasis principalmente a todos los procesos de manufactura que están involucrados en la fabricación de las bridas de las guías de onda, es decir fundición, maquinado de corte y electroerosión. Pero también debemos mencionar brevemente el proceso de extrusión, donde el metal es forzado a fluir a través de una matriz;

ya que este proceso fue utilizado en la primera parte de este proyecto en donde se construyó el cuerpo de la guía de onda.

La extrusión del tubo de sección rectangular que es en sí el cuerpo de la guía de onda se realizó en las instalaciones de la empresa FISA (Fundiciones Industriales S.A.), especializada en la fabricación de perfiles de aluminio con norma ASTM 6060, se utilizó una temperatura de extrusión de 815 °F (435 °C) luego de haber realizado un trabajo de rectificado de la matriz macho para alcanzar las medidas interiores requeridas de 34 x 72.1mm con un espesor de 2mm de pared considerando los valores de contracción por aumento que es de 1 % del valor deseado; es decir, que tomando en cuenta la contracción del aluminio al enfriarse las dimensiones de la matriz macho fueron de 34.34 x 72.8 mm.

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LAS BRIDAS DE GUIAS DE ONDA.

Para la fabricación de las bridas se utilizará una aleación especial de aluminio conocida como *Tenzaloy* de norma ASTM B26 ZC81A de fundición en molde de arena o ASTM B108 ZC81B de fundición en molde permanente. Este tipo de aleación se utiliza por lo general en piezas que soportan grandes esfuerzos sin tratamiento térmico, es de buena maquinabilidad y características de pulido por su baja resistencia al desprendimiento de viruta, además de una buena estabilidad dimensional.

Este aluminio tiene las siguientes propiedades y características de fabricación:

Dureza aproximada:	145 HB
Densidad:	2810 Kg/m ³
Módulo de elasticidad:	71000 N/mm ²
Esfuerzo de fluencia:	150 Mpa.
Temperatura de fusión:	de 595 a 640 °C aproximadamente

La composición química de esta aleación se indica a continuación:

Zinc	(Zn)	7.0 a 8.0%
Magnesio	(Mg)	0.2 a 0.5%
Manganeso	(Mn)	0.6% máx.
Silicio	(Si)	0.25% máx.
Hierro	(Fe)	1.1% máx.
Cromo	(Cr)	0.35% máx.
Níquel	(Ni)	0.15% máx.
Cobre	(Cu)	0.4 a 1.0%

Las dimensiones y la forma de una brida varían de acuerdo al modelo de cada una de ésta,excepto en las medidas del orificio rectangular que tiene las mismas medidas interiores de una guía de onda rectangular (34 x 72.1 mm) ya que por esta cavidad es por donde las ondas electromagnéticas son transmitidas.

IDENTIFICACION DE PROCESOS DE CONSTRUCCION ARTESANAL CON TOLERANCIAS PERMISIBLES.

El proceso de fabricación de las bridas se inicia primeramente con la obtención de la aleación de aluminio que se mencionó anteriormente para lo cual se fundió el metal con sus componentes en los porcentajes indicados.

Debido a que la temperatura de fusión del aluminio no sobrepasa los 660 °C ,se utilizó para este trabajo un horno de crisol con una capacidad de 10 Kg. en las instalaciones

de la empresa INTRAMET; y se obtuvo el material en bruto fundiendo sus componentes y colándolos en un molde permanente (fig 1) .

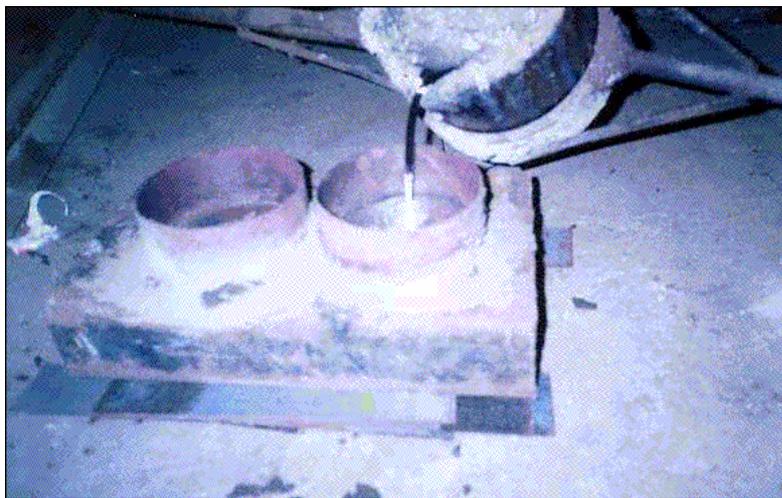


FIG 1: PROCESO DE FUNDICION DE Al 713. FOTO INTRAMET

Una vez obtenido el material en bruto se procedió a maquinarlo con herramientas de corte (torno y fresadora) para darle la forma y dimensiones deseadas con una tolerancia de ± 0.02 mm., todas sus medidas excepto las del orificio rectangular que fueron maquinadas a sobremedida y su acabado se hizo por el proceso de maquinado por electroerosión debido a que por esta sección se transmiten las ondas electromagnéticas, razón por la cual se necesita un mejor acabado superficial como se explicó en el capítulo anterior.

Después del maquinado de las bridas, se pudo observar que de manera artesanal no se llegó a los niveles de tolerancia requeridos ya que de acuerdo a las mediciones hechas a las primeras piezas solamente se alcanzaron valores de tolerancias del orden de ± 0.1 mm. que para nuestro fin este valor no es aceptable tomando en cuenta además que se fabricarían estas piezas en grandes cantidades , por esta razón se ha considerado también el maquinado de estas piezas mediante el sistema de CAD/CAM en máquinas de control numérico lo que veremos más adelante.

MAQUINADO POR CONTROL NUMÉRICO

Debido al grado de precisión y dificultad de maquinado de las bridas, se optará por el maquinado en máquinas de control numérico ya que como se mencionó anteriormente por medio de procesos artesanales no se pudo llegar a los valores de tolerancia requeridos . El acabado final interno se lo realizará por el proceso de electroerosión.

A continuación vamos a describir las máquinas herramientas CNC con las que cuenta la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL para luego citar los programas utilizados para la fabricación de las bridas de guías de onda.

La ESPOL cuenta con dos máquina herramientas controladas por computadora: un torno horizontal y una fresadora vertical, estas máquinas fueron diseñadas con fines didácticos por lo que son ligeras y no están adaptadas para el trabajo continuo. Cuentan con la mayoría de aditamentos de una máquina de trabajo industrial y pueden ser de gran utilidad para la producción de piezas en pequeño número o para piezas de precisión.

Las dos máquinas cuentan con un sistema de cambio automático de herramientas, sistema de protección (cubierta con interruptor de desconexión) , botón de parada de emergencia, finales de carrera y más aditamentos que hacen muy operativas las máquinas



FIG 2. PROCESO DE FRESADO DE UNA BRIDA. FOTO ESPOL

Los programas utilizados en el proceso de producción de las bridas de guía de onda para cada caso los podremos observar más adelante en los apéndices. Como se indicó anteriormente hay dos modelos de bridas, el modelo 1 (fig 2) y el modelo 2 que es el más complicado por así decirlo. El primer modelo de brida; es decir, la brida rectangular solamente se maquinó en la fresadora y para éste se utilizó un solo programa que consta de dos etapas, la primera en el que se maquinó su contorno y la segunda en el que se hicieron los agujeros como se muestra en el apéndice A.

El segundo modelo de brida o brida redonda se tuvo que maquinar primeramente en el torno haciendo el uso de dos programas por separado, uno para la cara superior (Apéndice B) y otro para la cara inferior (Apéndice C)

MAQUINADO POR ELECTROEROSION

El maquinado por electroerosión es un proceso de desprendimiento de metal mediante una chispa o descarga eléctrica producida por dos electrodos sin que se produzca contacto alguno entre ellos; el primero de éstos constituye la herramienta de trabajo que por lo general es de grafito o cobre y el segundo está constituido por la pieza que se va a trabajar o maquinar. La chispa viaja a través de un fluido dieléctrico (generalmente un aceite liviano) a una distancia controlada.

Otra forma de maquinado por electroerosión es mediante el corte con hilo, en este caso el electrodo es un alambre continuo de material conductor. La pieza de trabajo es cortada por el cable debido a que ésta se mueve por una mesa controlada numéricamente, el resultado es un rompecabezas de precisión. La mejor aplicación que se ha dado a este método de electroerosión por corte de hilo es el maquinado de moldes o matrices de formas complejas que se utilizan en el proceso de extrusión y en nuestro caso el maquinado del orificio interior de forma rectangular de las bridas de guías de onda debido a que la profundidad de corte es considerable y al hacerlo por penetración sería mucho más demoroso y no se mantendrían las dimensiones requeridas hasta el final ya que el electrodo también sufre desgaste aunque muy pequeño. El proceso de corte se lo realizó en la empresa FALESA (Ferroaleaciones S.A.) , se utilizó alambre de acero de 0.14 mm de diámetro a una velocidad de corte de 0.4 mm/min.

EVALUACION DE TRAMOS DE GUIAS DE ONDA

En este capítulo se van a evaluar tramos de guía de onda terminados, es decir; tubo y brida unidos en un solo cuerpo, para lo cual nos dirigimos a la Armada del Ecuador, concretamente al Nivel III que es un departamento del DIECAR (Dirección de Electrónica de la Armada). Este departamento posee equipos electrónicos sofisticados que nos ayudarán a determinar si una guía de onda cumple con los requisitos para un buen funcionamiento.

La evaluación de los tramos de guías de onda se la hará utilizando un analizador de red (NETWORK ANALYZER) o analizador de parámetros "S" modelo HEWLETT PACKARD 8510C. Este dispositivo (Fig3) trabaja en un rango de frecuencias de 5 Hz a 20 GHz por lo que se puede usar para evaluar los tramos nuestras guías de onda que como sabemos corresponden a un radar AO-3 RAN 10S, es decir; es un radar de 10 cm de longitud de onda con un rango de frecuencia de operación de 3.1 a 3.4 GHz .Se hicieron dos tipos de prueba a dos tramos diferentes de guías de onda por separado, para el primero se utilizaron acoples o bridas rectangulares y para el segundo tramo se utilizaron como acoples las bridas redondas. Las dos pruebas consisten en generar ondas electromagnéticas en un extremo o puerto 1, la señal enviada es medida en el otro extremo del tramo de la guía de onda o puerto 2.

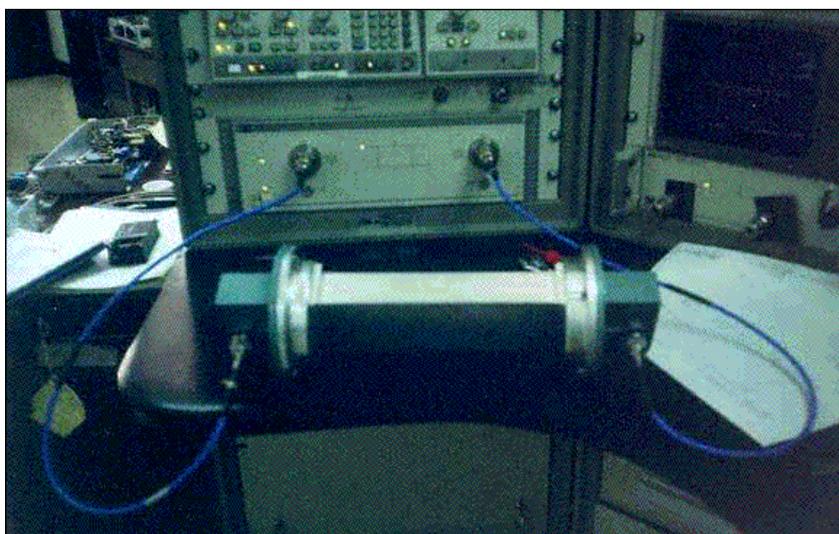


FIG 3: ANALIZADOR DE RED. FOTO DIECAR

La primera prueba consiste en medir el SWR (Standing Wave Ratio) o Relación de Onda Estacionaria. Aquí se medirá la potencia transmitida, el valor de SWR es un número adimensional igual a 1 cuando la transmisión es perfecta, es decir; cuando no hay pérdidas de potencia .Este valor se lo obtiene de la fórmula:

$$swr = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

donde ρ es el coeficiente de reflexión.

El valor de ρ varía entre cero y uno; es cero cuando la transmisión es total, por lo que el SWR es igual a 1; y es igual a uno cuando no hay transmisión de potencia , entonces el valor del SWR sería infinito. Un valor aceptable en la medición del SWR es cuando éste valor es menor a 1.58.

La segunda prueba realizada es la medición del *Return Loss* o “Pérdidas al Retorno”, es decir, aquí se mide la señal en el mismo puerto de salida de la onda o en otras palabras se medirá la potencia reflejada al origen. Como su nombre lo dice “pérdidas al retorno” significa que si no hay pérdidas, entonces toda la potencia que se transmitió está siendo reflejada .

El valor de *Return Loss* se lo puede obtener de la siguiente fórmula:

$$ReturnLoss = 20 \log_{10} \rho \text{ [db]}$$

Esta ecuación nos indica que el valor ideal tiende a infinito (cuando $\rho = 0$). En otras palabras, mientras mayores sean las pérdidas al retorno habrá una mejor transmisión de potencia. Al igual que el caso del SWR se consideran valores aceptables cuando ($|Return Loss| > 13 \text{ db}$). Los resultados de las dos pruebas se pueden observar en la siguiente tabla:

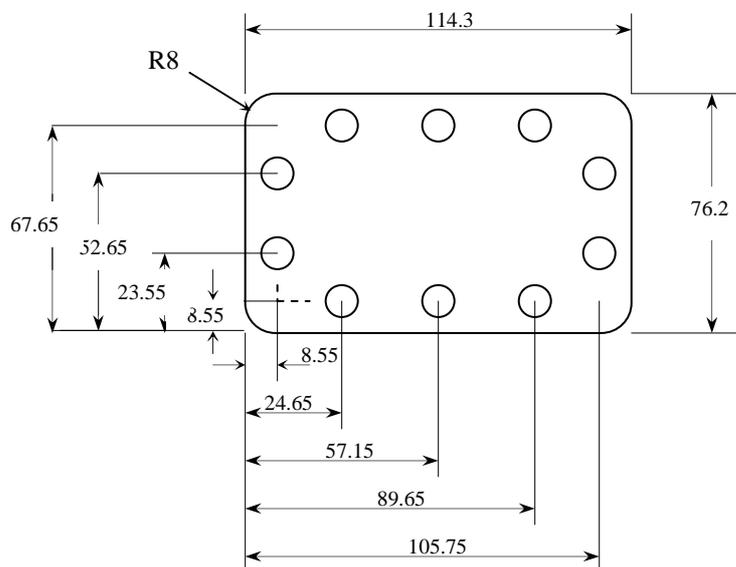
TABLA I: VALORES DE SWR Y RETURN LOSS DE LOS RESPECTIVOS TRAMOS DE GUIAS DE ONDA

	BORDE RECTANGULAR		BORDE CIRCULAR	
	LADO 1	LADO 2	LADO 1	LADO 2
SWR	1.1278 (3.4 GHz)	1.1168 (3.4 GHz)	1.4745 (3.3685 GHz)	1.3663 (3.349 GHz)
RETURN LOSS (db)	-20.785 (3.4 GHz)	-20.962 (3.4 GHz)	-14.305 (3.4 GHz)	-16.206 (3.34 GHz)

CONCLUSIONES

1. En el proceso de fundición se obtuvieron mejores resultados utilizando molde permanente en lugar de molde de arena, ya que debido a la afinidad que tiene el aluminio con el hidrógeno, éste se mezcla más fácilmente con el material fundido cuando se usa molde de arena lo que posteriormente hace que se produzcan poros en la superficie del metal.
2. Para nuestro caso en particular, el uso de máquinas de control numérico nos ofrece algunas ventajas sobre el uso de máquinas convencionales como la producción de mayor cantidad de piezas con una precisión elevada y constante, 0.01 mm en el torno y 0.005 mm en la fresadora.
3. También es importante el proceso de maquinado por electroerosión ya que hay ciertos procesos de maquinado que no son posibles de hacerse en el torno o la fresadora CNC, y estas máquinas nos permiten obtener el mismo grado de precisión que las de control numérico por utilizar un servocontrol similar.
4. Los resultados de las pruebas realizadas a los tramos de guía de onda en los laboratorios de la Armada nos muestran que en nuestro país es posible la fabricación de estos elementos ya que tenemos todos los procesos mencionados anteriormente, desde la obtención de la materia prima hasta los laboratorios de prueba de estos elementos terminados.

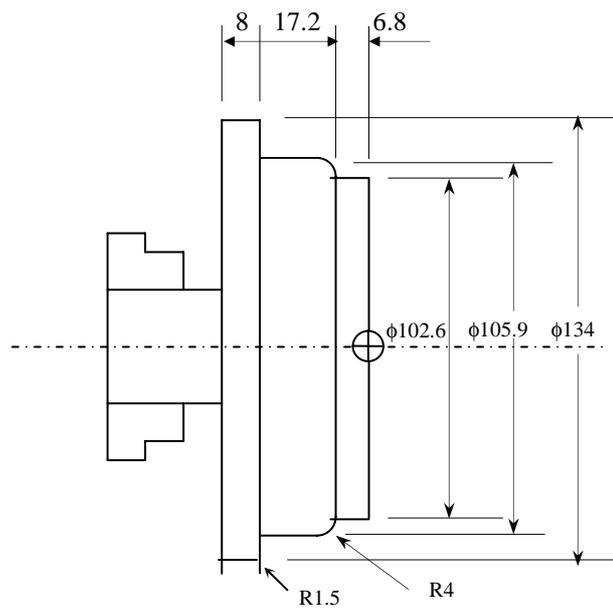
APENDICE A
PROGRAMA DE FRESADO PARA BRIDA RECTANGULAR



```
[BILLET X115 Y78 Z10
G40 G28
M03 S1300
G00 X90.87 Y48.6 Z26
G92 X0 Y0 Z0
G01 Z23.5
      Y88.2 F150
G02 X28 Y116.2 R28 F40
G01 X126.3 F150
G02 X154.3 Y88.2 R28 F40
G01 Y28 F150
G02 X126.3 Y0 R28 F40
G01 X28 F150
G02 X0 Y28 R28 F40
G01 Z21.5
      Y88.2 F150
G02 X28 Y116.2 R28 F40
G01 X126.3 F150
G02 X154.3 Y88.2 R28 F40
G01 Y28 F150
G02 X126.3 Y0 R28 F40
G01 X28 F150
G02 X0 Y28 R28 F40
G01 Z19.5
      Y88.2 F150
G02 X28 Y116.2 R28 F40
G01 X126.3 F150
G02 X154.3 Y88.2 R28 F40
G01 Y28 F150
G02 X126.3 Y0 R28 F40
G01 X28 F150
G02 X0 Y28 R28 F40
G01 Z17.5
      Y88.2 F150
G02 X28 Y116.2 R28 F40
G01 X126.3 F150
G02 X154.3 Y88.2 R28 F40
```

```
G01 Y28 F150
G02 X126.3 Y0 R28 F40
G01 X28 F150
G02 X0 Y28 R28 F40
G01 Z15.5
    Y88.2 F150
G02 X28 Y116.2 R28 F40
G01 X126.3 F150
G02 X154.3 Y88.2 R28 F40
G01 Y28 F150
G02 X126.3 Y0 R28 F40
G01 X28 F150
G02 X0 Y28 R28 F40
G00 Z30
G28
M05
M06 TO2
S1300 M03
G00 X107.905 Y65.505 Z104.7
G92 X0 Y0 Z0
G00 X11.65 Y26.65
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X11.65 Y55.75
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X27.75 Y70.75
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X60.25 Y70.75
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X92.15 Y70.75
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X108.85 Y55.75
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X108.85 Y26.65
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X92.15 Y11.65
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X60.25 Y11.65
G01 Z90 F40
    Z106 F150
G00 X27.75 Y11.65
G01 Z90 F40
    Z115 F150
G28
M02
```

APENDICE B
PROGRAMA DE TORNEADO DE LA CARA SUPERIOR (BRIDA REDONDA)

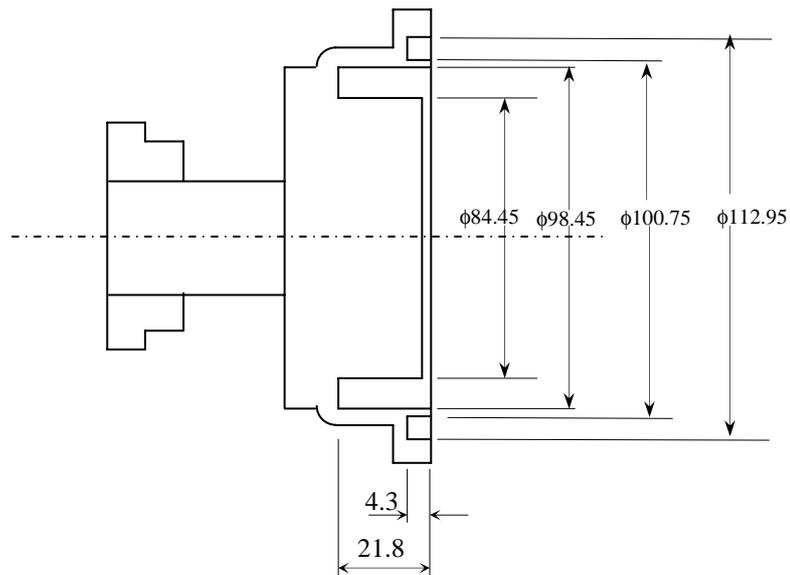


```

[BILLET X140 Z60
M05
M06 T01
M03 S1300
G50 X147.54 Z96.14
G00 X142 Z1
G71 U.5 R.5
G71 P1 Q2 U.1 W.1 F50
  N1 G01 X102.6
      Z-7.1
      G03 X105.9 Z-10.1 R4
      G01 Z-24
          X109.9 Z-25
          X131
      G03 X134 Z-26.5 R1.5
      G01 Z-33
  N2 X140
G28
G00 X103 Z1
G70 P1 Q2
G28
M05
M00

```

APENDICE C
PROGRAMA DE TORNEADO DE LA CARA INFERIOR (BRIDA REDONDA)



```
[BILLET X137 Z45
G28
M05
M06 T04
M03 S1000
G50 X147.22 Z82.08
G00 X103.15 Z.5
G72 W.05 R.05
G72 P3 Q4 U.05 W.05 F10
N3 G00 Z-4.3
N4 X100.75
G00 Z5
M01
G00 X88.65 Z.5
G72 W.05 R.05
G72 P5 Q6 U.05 W.05 F10
N5 G00 Z-7
N6 X84.45
G00 Z15
M01
G00 X88.65 Z1
G01 Z-7
G72 W.05 R.05
G72 P7 Q8 U.05 W.05 F10
N7 G00 Z-14
N8 X84.45
G00 Z15
M01
G00 X88.65 Z1
```

G01 Z-14
G72 W.05 R.05
G72 P9 Q10 U.05 W.05 F10
N9 G00 Z-21.8
N10 X84.45
G00 Z15
G28
M05
M00

Referencias:

- a. Mayorga, Carlos; Tesis de Grado "Método de Fabricación para la Producción de Bidas de Guías de Onda", ESPOL, Guayaquil 2001.
- b. ASM, Metals Handbook 9th Edition, Volume 16: Machining, American Society for Metal, Ohio – USA, 1988.
- c. Mora Diego, "Manual Instructivo para la Utilización de Software Denford para Simulación y Control de Fresadora CNC" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, ESPOL, 1993).
- d. Quizhpi Miguel, "Máquinas de Electroerosión" (Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, ESPOL, 1996).

Guayaquil, 15 de febrero de 2001

Sres.
CICYT
Espol
Presente.-

Por medio de la presente certifico que he revisado y estoy de acuerdo con el contenido del informe técnico de la Tesis de Grado que titula "Método de Fabricación para la Producción de Bidas de Guías de Onda"; Tesis elaborada por el Sr. Carlos Mayorga Gualpa, alumno egresado de FIMCP.

Atentamente,

Ing. Ignacio Wiesner F.
Director de Tesis.