

Caracterización del movimiento de un escáner 2D para el guiado de un haz láser

E. Ukar⁽¹⁾, A. Lamikiz⁽¹⁾, S. Martínez⁽¹⁾, I. Tabernero⁽¹⁾, F. Liébana⁽²⁾, J.M. Etayo⁽²⁾

*(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV/EHU
Eneko.ukar@ehu.es*

(2) TECNALIA. División de Industria y Transporte.

El trabajo aquí presentado se centra en la caracterización del movimiento de dispositivos galvanométricos o escáneres para el procesamiento de superficies mediante láser. Los ensayos han sido llevados a cabo empleando escáner HurryScan 25, de la casa ScanLab, en combinación con un láser de fibra ROFIN FL01 de 1KW de potencia y que proporciona un haz de 50 μ m de diámetro. En primer lugar se han identificado los principales errores de precisión en un dispositivo galvanométrico determinando las causas de los mismos. La desviación de la trayectoria real respecto de la teórica está directamente relacionada con los parámetros de control de movimiento del escáner, encargados de ajustar el movimiento en función de la velocidad de avance. Se han llevado a cabo diversos ensayos experimentales, orientados a evaluar el grado de influencia de cada uno de los parámetros, así como la desviación de los mismos respecto a los valores de consigna. Como resultado del trabajo llevado a cabo, se ha verificado una diferencia entre los parámetros de consigna y los evaluados experimentalmente, a partir de los cuales se ha establecido un rango de operación óptimo para la velocidad de avance de cara a mantener la precisión dentro de valores aceptables. También se ha diseñado un protocolo de compensación de estos errores.

1. INTRODUCCIÓN

Los escáner o cabezales galvanométricos consisten en un sistema de guiado del haz láser basado en una serie de espejos móviles. Cada espejo representa un eje o grado de libertad, por lo que es habitual emplear escáner 2D para el guiado del haz en un plano XY. Una de las principales aplicaciones industriales de estos equipos es el marcado láser, aunque su uso se extiende a otros procesos como algunos procesos de fabricación rápida, texturizado de superficies, procesos láser remotos, etc. La principal ventaja que aportan estos sistemas es la alta velocidad y agilidad de movimientos que se pueden conseguir, ya que el movimiento de los espejos se realiza directamente con un accionamiento digital de pequeño tamaño y que virtualmente no presente inercias. Sin embargo, como cualquier sistema mecánico, presenta una serie de errores de posicionamiento del haz láser debido a retrasos en respuesta, errores de montaje, etc. Actualmente, los fabricantes emplean una serie de ensayos estandarizados destinados a la calibración de los escáneres de marcado, sin embargo, no proporcionan información acerca de la precisión de posicionamiento del escáner para distintas velocidades y trayectorias. En aplicaciones concretas de elevada precisión, tales como el marcado de vidrio [1], el microprocesado de polímeros [2], o cuando es importante conocer la velocidad real del haz, la información facilitada por los fabricantes resulta insuficiente. El objetivo del trabajo aquí presentado es la identificación de los principales parámetros de funcionamiento del escáner y la cuantificación del error en función de los parámetros de proceso.

A la salida del generador láser, y especialmente en sistemas que emplean una fibra óptica en el guiado del haz, es preciso instalar un colimador óptico. La misión del colimador es alinear el haz para que tenga un diámetro determinado y diverja lo mínimo posible. Una vez alineado el haz, es preciso focalizarlo mediante una óptica de focalización para obtener el haz de trabajo. Físicamente, un escáner 2D está formado por dos espejos montados sobre

dos ejes perpendiculares accionados por servomotores [3]. Mediante la rotación de los espejos se consigue una desviación del haz con velocidades de desplazamiento muy elevadas gracias a la distancia entre la localización de los espejos y el plano de trabajo, que está condicionada por el tipo de lente de focalización empleada. Así, en general, existen dos alternativas constructivas para el montaje de un escáner láser, dependiendo de la posición de la óptica de focalización. Dicha óptica puede estar antes de la entrada al escáner o a la salida del mismo [4]. Una de las principales características del uso de un escáner es la necesidad de corregir el campo de trabajo debido a las distorsiones ópticas debido al uso de lentes ópticas. Estas distorsiones incluyen además, efectos debidos a la falta de alineamiento, ensamblaje y efectos térmicos de dilataciones [5]. En la bibliografía es posible hallar diversos sistemas propuestos para la corrección de la distorsión del campo de trabajo dentro del plano de trabajo [6-8]. Sin embargo, existe una fuente adicional de error asociada con los tiempos de retraso y adelanto empleados por el escáner para garantizar la ausencia de cambios bruscos de velocidad con situaciones de velocidad nula y aceleración máxima. Dichos tiempos de adelanto y retraso se traducen en un redondeo de aristas y errores en los cierres de contornos, que dependen de la velocidad de avance en cada caso. Ello supone que el error cometido depende de la velocidad de avance del haz. Aunque es posible configurar distintos parámetros de tiempo, en un dispositivo como un escáner, no es posible modificar dichos parámetros durante el proceso en función de la velocidad de avance en cada instante. Por este motivo resulta interesante caracterizar los distintos parámetros de proceso y evaluar el error cometido en función de la velocidad de avance empleada en cada caso para unos determinados parámetros. Así, el objetivo final en este trabajo es definir unas ventanas de proceso con unas velocidades de avance máximas y tratar de compensar estos errores en la medida de lo posible.

2. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS.

Tanto de la bibliografía analizada y como resultado del análisis de ensayos previos, se han identificado una serie de errores que afectan directamente a la calidad del resultado obtenido. Así, en movimientos a altas velocidades los errores detectados han sido de tres tipos principalmente.

- Distorsión de la geometría del área procesada
- Áreas de sobreexposición en zonas de cambios de dirección a grandes velocidades
- Retrasos en el encendido y apagado del láser.

Estos errores se producen entre comandos de funcionamiento consecutivos, por lo que es preciso identificar estos comandos previamente. En el equipo empleado los comandos de funcionamiento se clasifican en comandos de salto, de marcado y de polígono. El comando de salto es empleado para recorrer un cierto vector con el láser apagado, pudiendo ser distinta la velocidad de salto de la de marcado. El comando de marcado permite llevar a cabo un movimiento a lo largo de un vector con el láser encendido, es decir el láser se enciende al inicio del vector y se apaga al final. Y por último, el comando de polígono permite reproducir un polígono a la velocidad de marcado programada. Una vez finalizado el primer vector del polígono el láser permanece encendido y ejecuta el siguiente vector del polígono. Así sucesivamente hasta ejecutar el último vector del polígono.

Inicialmente se han llevado a cabo dos ensayos, para por un lado verificar la influencia de la velocidad de avance en el error cometido, y por otro, verificar si existe una variación de la velocidad de avance en los cambios de dirección. Los ensayos han consistido en un marcado de un rectángulo de 11x11mm y 8x8mm con velocidades de avance de 7.000mm/s y 500mm/s respectivamente a potencia constante de 50W. En la figura 1 se muestra el resultado obtenido, donde se aprecia una diferencia significativa en los ángulos de 90° para las distintas velocidades.

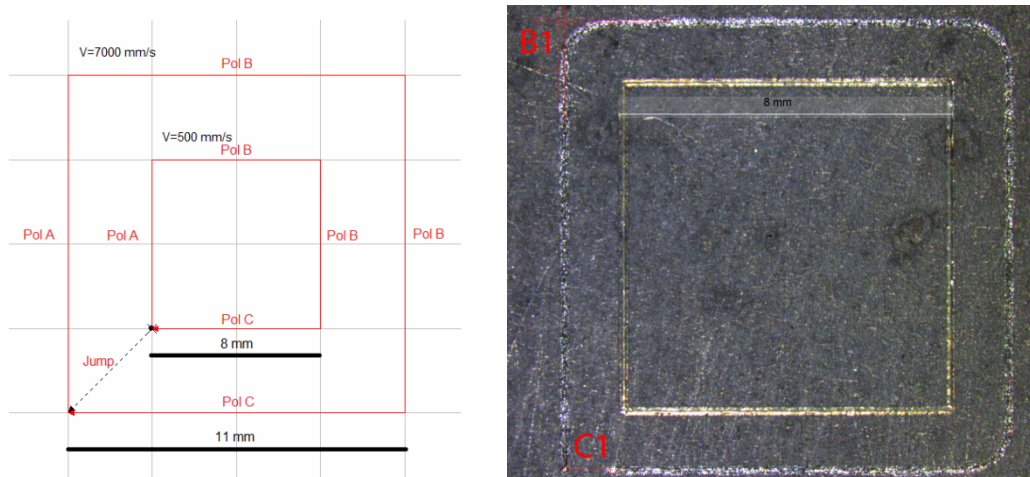


Figura 1. Trayectoria programada (izq) y trayectoria realmente ejecutada (dcha)

Para velocidades de avance moderadas, el ángulo descrito es de prácticamente 90° , mientras que para velocidades elevadas aparece un redondeo de arista (distancia B1 en la figura 1). Asimismo, para velocidades elevadas, se aprecia un error al no cerrarse completamente el contorno de marcado inicialmente programado (distancia C1 en la figura 1). Los ensayos llevados a cabo reflejan un efecto directo de los distintos retrasos programados por el láser en el grado de precisión. Los retrasos son cantidades de tiempo constantes que se introducen al final o inicio de un comando para atrasar o adelantar el comienzo del siguiente comando. En el equipo estudiado se combinan 5 retrasos distintos, *retraso de polígono*, *retraso de apagado*, *retraso de marcado*, *retraso de salto* y *retraso de encendido*.

El retraso de polígono es el tiempo que se adelanta el accionamiento de un eje antes del punto de accionamiento teórico en un cambio de dirección dentro de un comando de polígono. De este modo se logra que el inicio del movimiento sea progresivo y no haya problemas de inercia debido a las elevadas aceleraciones. El retraso de apagado es el tiempo en el que se apaga el láser antes de llegar a su posición final. De este modo se evitan las zonas de sobreexposición cuando el láser se detiene y la velocidad de avance se anula. Por otro lado, el retraso de marcado es conceptualmente igual al retraso de polígono, salvo que este se da al ejecutar el último vector del comando de polígono.

En cuanto al retraso de salto, éste es introducido debido a la posible diferencia entre la velocidad de marcado y la de salto. Al pasar de uno a otro los espejos necesitan un tiempo de estabilización. Si este tiempo es demasiado corto y el láser se enciende antes de estabilizarse los ejes, aparecen distorsiones en la geometría de marcado. Finalmente, el retraso de encendido tiene como finalidad evitar la sobreexposición cuando se inicial el movimiento desde parado. Una vez identificados principales parámetros que afectan a la precisión del escáner se han llevado a cabo una serie de ensayos experimentales para la caracterización de los mismos.

3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Se han llevado a cabo tres tipos de ensayos diferentes, un primer ensayo para cuantificar los retrasos en función de la velocidad de avance, un segundo ensayo para cuantificar el efecto del retraso de polígono en función de la velocidad de avance y el ángulo de giro, y por último, una serie de ensayos para evaluar el efecto de cambios de dirección de 180° en función de la velocidad de avance. En los ensayos se ha empleado el software de marcado *Visual Laser Marker (VLM)*. El software permite la modificación de los distintos tiempos de retraso. En este caso los parámetros teóricos utilizados han sido de 0,150ms para el retraso de encendido y de 0 para los retrasos de polígono y de apagado.

Ensayos para la cuantificación de retrasos

En la figura 2 se muestra la geometría de los ensayos para medir retrasos de encendido y apagado de láser, retrasos de polígono y el retraso de salto.

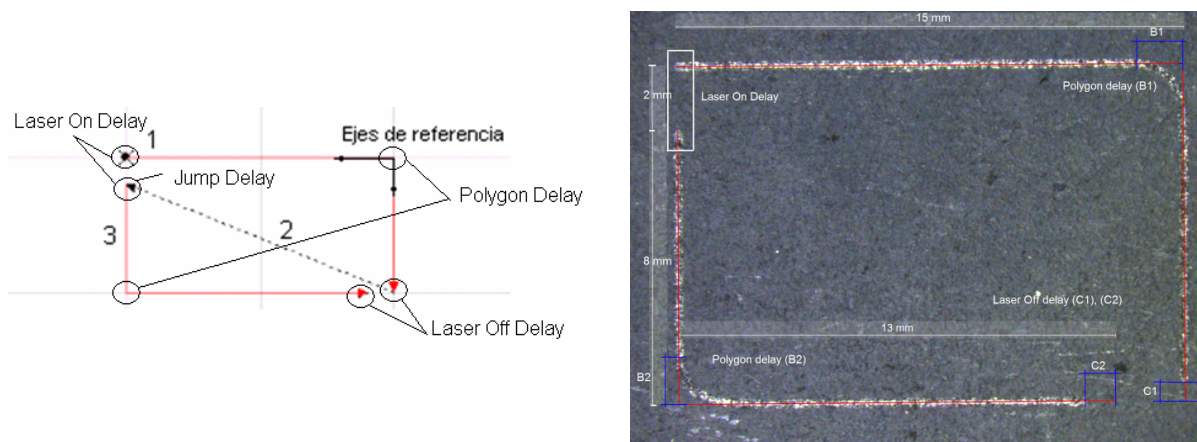


Figura 2. Ensayo medida retrasos. Trayectoria teórica (izq) y trayectoria ejecutada (dcha)

La programación se ha llevado a cabo mediante tres comandos, un primer comando de polígono, un segundo comando de salto, y un tercer comando de polígono, marcados como 1, 2 y 3 en la figura 2 (izq). Las mediciones se han llevado a cabo mediante una lupa Nikon SMZ-2T con un aumento 5x. Los ensayos se han llevado a cabo para velocidades de 500, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000 y 7.000 mm/s. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en cada polígono para los retrasos de encendido de láser (A_1 y A_2), los retrasos de polígono (B_1 y B_2) y los retrasos de apagado de láser (C_1 y C_2). En el ensayo llevado a cabo los retrasos de salto han resultado despreciables. En la tabla 1 se muestran los valores de tiempo en base a la distancia medida experimentalmente y a la velocidad de avance programada, suponiendo un movimiento uniforme en todos los casos.

Velocidad (mm/s)	A_1 (mm)	A_2 (mm)	B_1 (mm)	B_2 (mm)	C_1 (mm)	C_2 (mm)	$T_{\text{laser on}}$ (s)	T_{Poligono} (s)	$T_{\text{laser off}}$ (s)
500	0,05	0,08	0,21	0,19	0,21	0,22	1,3E-4	4E-4	4,3E-4
1.000	0,08	0,11	0,23	0,25	0,22	0,24	9,5E-5	2,4E-4	2,3E-4
2.000	0,09	0,12	0,32	0,3	0,33	0,23	5,25E-5	1,5E-4	1,4E-4
3.000	0,15	0,15	0,6	0,63	0,59	0,32	5E-5	2E-4	1,51E-4
4.000	0,12	0,18	0,77	0,69	0,65	0,44	3,75E-5	1,82E-4	1,36E-4
5.000	0,2	0,13	0,91	0,88	0,67	0,7	3,3E-5	1,79E-4	1,37E-4
6.000	0,23	0,2	1,09	1,01	0,9	0,8	3,58E-5	1,75E-4	1,41E-4
7.000	0,26	0,23	1,33	1,35	0,98	1,01	3,5E-5	1,91E-4	1,42E-4

Tabla 1. Resultados de ensayo

Debido a que las medidas llevadas a cabo para velocidades de 500 y 1.000 mm/s son de centésimas de milímetro y que cualquier pequeño error de medición se traduce en una diferencia porcentual relevante, se ha optado por despreciar las mismas para el cálculo de los valores medios. Llevando a cabo la media de los valores obtenidos se llega a los tiempos de retraso mostrados en la tabla 2.

$T_{\text{laser on}}$ (ms)	$T_{\text{polígono}}$ (ms)	$T_{\text{laser off}}$ (ms)
0,041	0,186	0,141

Tabla 2. Tiempos de retraso medidos experimentalmente

Si bien los valores de retraso de polígono y de apagado son de la misma magnitud, esto no ocurre para el retraso de encendido, en este caso, a bajas velocidades (500 mm/s) se aprecia

una zona de sobreexposición, mientras que a altas velocidades (7.000mm/s) el láser se enciende cuando los espejos han iniciado el movimiento.

Ensayos con distinto ángulo

En los ensayos descritos a continuación se ha analizado la influencia de la variación del ángulo en la unión de dos vectores para distintas velocidades de avance. La geometría de ensayo se muestra en la figura 3.

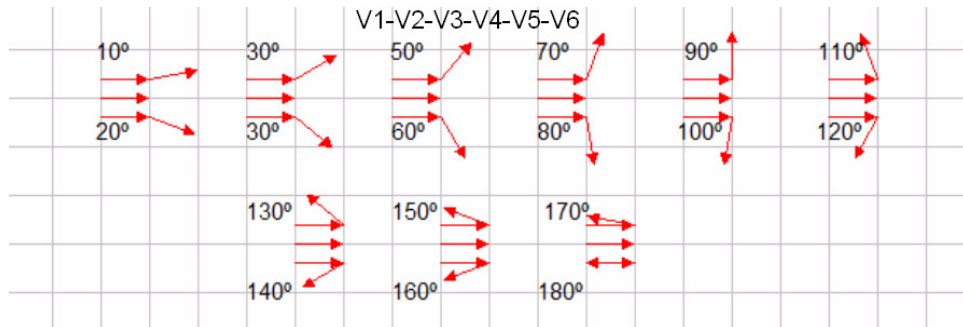


Figura 3. Ensayo para analizar la influencia del ángulo en cambios de dirección

En este caso, se ha llevado a cabo ensayos con velocidades de avance de 1.500, 3.000, 4.500, 6.000 y 7.000mm/s. Para cada uno de los valores de velocidad se han ejecutado las 9 geometrías representadas en la figura 3, con ángulos desde 10° hasta 160°, y se ha evaluado el tiempo de retraso de polígono en cada una de ellas.

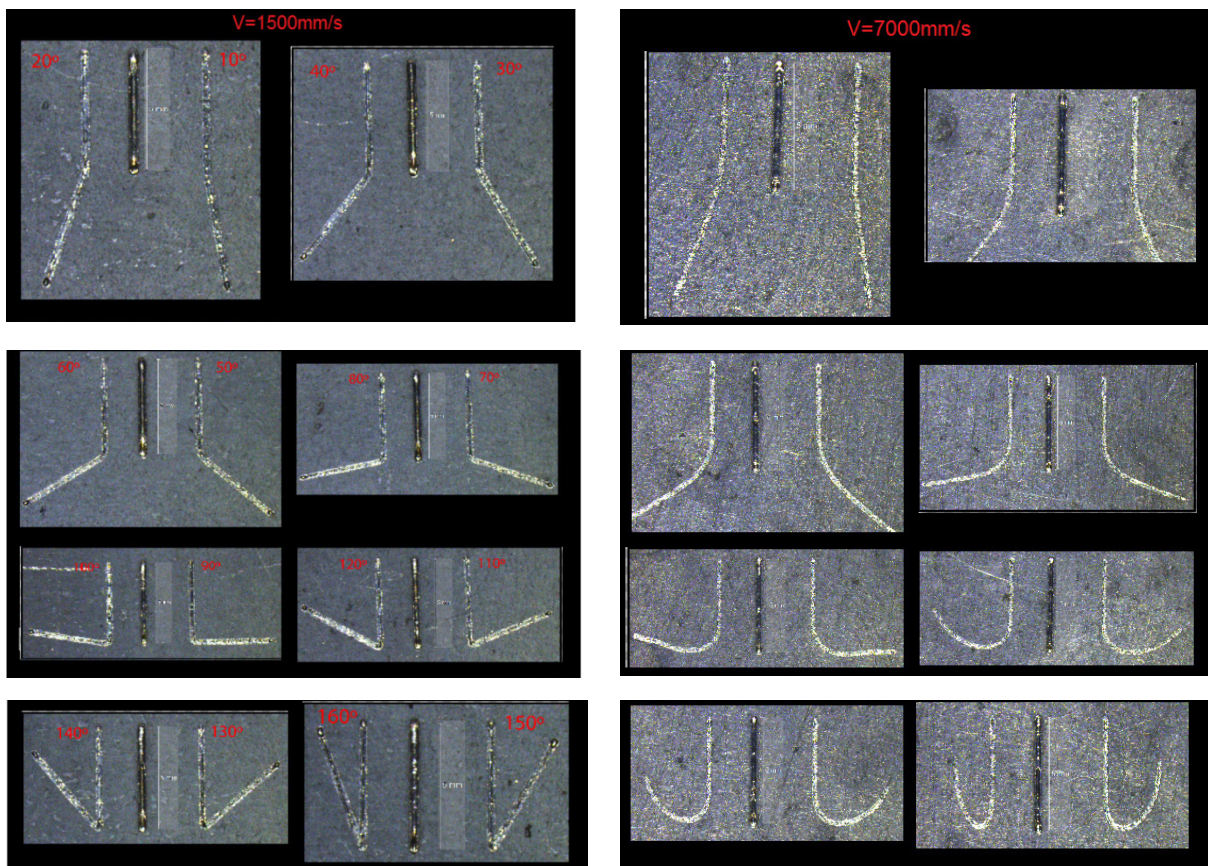


Figura 4. Comparación de resultados para velocidades de 7.000 y 1.500mm/s

Tal y como se ha comprobado en los ensayos anteriores el tiempo de retraso de polígono es constante, por lo tanto de existir alguna diferencia en la longitud recorrida por el láser en durante ese retraso debe ser debida a variaciones en la velocidad de avance. En la figura 5 se observa como para velocidades entre 1.500 y 4.500mm/s es perceptible una ligera variación en la distancia recorrida en el tiempo de retraso, que para ángulos más forzados es ligeramente mayor. En cambio, para velocidades elevadas, 6.000 y 7000mm/s, si bien la distancia recorrida durante el tiempo de retraso es mayor, tal y como es lógico, la variación porcentual de la velocidad como consecuencia de un giro más pronunciado es prácticamente despreciable. A mayores velocidades de avance la desviación de la trayectoria de marcado respecto de la trayectoria teórica es mayor pero es menos sensible a las variaciones en los cambios de dirección.

Con idea de profundizar en este análisis se han llevado a cabo unos ensayos con variaciones de ángulos entre 0° y 70° para una velocidad de avance de 1.500mm/s con el láser operando en régimen pulsado. La frecuencia de pulso empleada ha sido de 13.500Hz, lo que se traduce en un ratio de 9 pulsos/mm. El objetivo de este ensayo es detectar alteraciones en la velocidad de avance a través de la distancia entre pulsos que teóricamente debe ser constante. En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos donde no se aprecia una variación significativa de la distancia entre puntos.

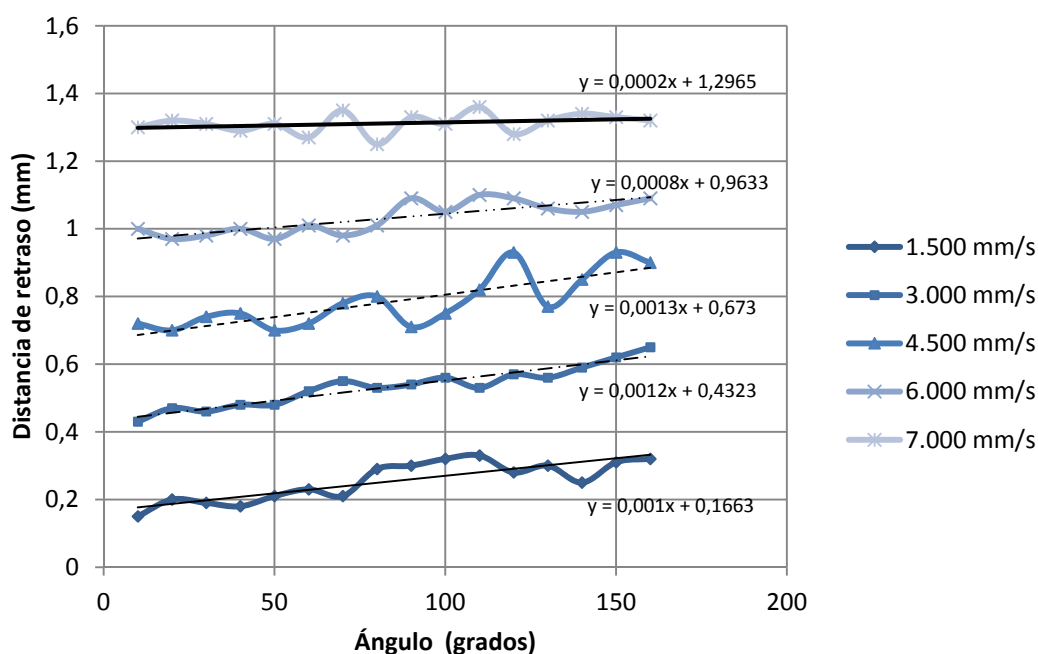


Figura 5. Distancia recorrida en el tiempo de retraso en función del ángulo descrito para distintas velocidades de avance

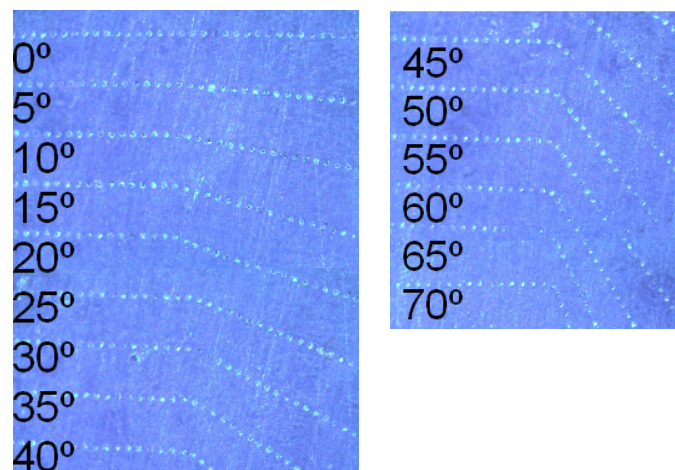


Figura 6. Ensayos en régimen pulsado para detectar variaciones en la velocidad de avance

Los resultados obtenidos sugieren dos bandas diferenciadas de velocidades de avance, una de baja velocidad, hasta 3.500mm/s, y otra de alta velocidad, a partir de 3.500mm/s. En función de la velocidad seleccionada es preciso ajustar adecuadamente los valores de los tiempos de retraso. En la figura 5 se observa que la banda óptima de trabajo para los ajustes de fábrica de los parámetros se halla en el rango de 1.500 a 3.000mm/s donde el retraso de polígono se traduce en errores por debajo de los 0,6mm. Para velocidades entre 3.000 y 7.000mm/s, el error llega hasta los 1,3mm.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En base a los ensayos llevados a cabo se ha confirmado que los tiempos de retraso son unos valores constantes introducidos como parámetros distintos de los valores teóricamente asignados en la programación de las trayectorias. Los ensayos llevados a cabo han permitido evaluar experimentalmente dichos tiempos en base a una serie de ensayos de marcado donde se han medido las desviaciones de las trayectorias reales respecto a las trayectorias teóricas con errores claramente por encima de 1mm para velocidades de escaneo elevadas.

Con los ajustes de fábrica, a velocidades por encima de 4.000mm/s, la trayectoria real descrita por el escáner se desvía claramente de la trayectoria teórica en los cambios de dirección, siendo más apreciable el efecto de los retrasos cuanto mayor es la velocidad de avance.

A velocidades de avance por encima de 5.000mm/s, también es significativo el efecto en el retraso de apagado y encendido del láser, con segmentos sin marcar dentro de la trayectoria teórica. Sin embargo, para velocidades de avance por debajo de 1.500mm/s se da el efecto contrario, donde debido a que el retraso no es suficientemente elevado, y aparecen zonas de sobreexposición. Asimismo, se ha observado que retraso de salto no tiene un efecto relevante para velocidades entre 1.000 y 2.000mm/s y que en ningún caso se han detectado los efectos debidos al retraso de marcado. Este último efecto es debido a que si se fija un tiempo de retraso lo suficientemente elevado, este no altera la trayectoria.

5. CONCLUSIONES

En el trabajo expuesto se han identificado los principales parámetros que determinan el grado de precisión alcanzado en operaciones de marcado. Experimentalmente se ha analizado el efecto que tienen los distintos tiempos de retraso sobre distintas geometrías de marcado obteniendo unos valores experimentales para cada uno. De los diversos parámetros se han identificado el retraso de polígono, el retraso de encendido y el retraso de apagado como los tres principales parámetros que condicionan el grado de precisión. Para

alcanzar un grado de precisión adecuado es necesario ajustar el valor de los tiempos de retraso en función de la velocidad de avance programada.

6. AGARDECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto “*Tratamiento y modificación de superficies funcionales de alto valor añadido mediante radiación láser (SURFACER)*” DPI2010-20317-C02-01, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

7. REFERENCIAS

- [1] Th. Dumont, T. Lippert, A. Wokaun, P. Leyvraz. Laser writing of 2D data matrices in glass, *Thin solid films* 2004, 453-454: 42–45.
- [2] R. Delmdahl, JL. Tapie. Excimer lasers drive large area microprocessing, *Applied surface science*, In Press, corrected proofs <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.09.077>.
- [3] MF. Chen, YP. Chen, WT. Hsiao, SY. Wu, CW. Hu, ZP. Gu. A scribing laser marking system using DSP controller, *Optics and Lasers in Engineering* 2008, 46: 410–418.
- [4] A. Wehr, U. Lohr. *Airbone laser scanning - An introduction and overview*, *ISPRS J. Photogrammetry & Remote Sensing* 1999; 54:68–82.
- [5] MF. Chen, YP. Chen, WT. Hsiao. Correction of field distortion of laser marking systems using surface compensation function, *Optics and Lasers in Engineering* 2009, 47: 84–89.
- [6] J. Xie, S. Huang, Z. Duan, Y. Shi, S. Wen. *Correction of the image distortion for laser galvanometric scanning system*. *Opt Laser Technol* 2005;37:305–11.
- [7] MF. Chen, YP. Chen. *Compensating technique of field-distorting error for the CO₂ laser galvanometric scanning drilling machines*. *Int. J Machine Tools & Manufacture* 2007;47:1114–24.
- [8] J. Diaci, D. Bracun, A. Gorkic, J. Mozina. Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces, *Optics and lasers in engineering* 2011: 49:195–199.