



## SISTEMA PARA EL MONITOREO DE FUERZA Y TEMPERATURA EN TORNEADO

ROGELIO L. HECKER, GUSTAVO M. FLORES, DIEGO VICENTE

Universidad Nacional de la Pampa  
Facultad de Ingeniería  
Calle 110 y 9 (6360) General Pico, La Pampa, Argentina

(Recibido 8 de julio de 2011, para publicación 9 de agosto de 2011)

**Resumen** – La continua demanda sobre la calidad y reducción de costos de los productos de manufactura mecánica impulsa el desarrollo de equipamiento para medir y controlar las principales variables de los procesos. Particularmente en los procesos de remoción de material el monitoreo de variables tales como fuerzas de corte, temperatura de la herramienta y vibraciones pueden conducir tanto a la optimización del proceso como la detección temprana de fallas. Siguiendo este lineamiento se presenta el desarrollo de una plataforma para monitorear las fuerzas de corte y la temperatura en la interfase herramienta-viruta en procesos de torneado. La medición de fuerza es una aplicación sencilla con el sólo objeto de probar el sistema desarrollado y se basa en la instalación de galgas extensiométricas en el mango porta-insertos. Mientras que para la medición de la temperatura en la zona de corte se presenta el desarrollo de un sistema que permite la estimación de dicho valor a partir de la medición de temperatura en la base del inserto de corte usando un termopar y filtros iterativos para la estimación. Finalmente, se detalla la implementación del sistema de monitoreo y se presentan datos experimentales obtenidos a partir de operaciones de cilindrado en un torno CNC.

**Palabras clave** – Monitoreo, torneado, temperatura, fuerzas.

### 1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo y control de los procesos de remoción de material pueden mejorar considerablemente la calidad de los productos producidos y al mismo tiempo derivar en una reducción de los costos de producción. Las principales investigaciones en este campo se centran en el estudio de los fenómenos que ocurren en la interacción entre la herramienta y el material a remover, donde se trata de implementar transductores y técnicas de monitoreo para conocer el estado del proceso y de esta manera poder tomar medidas preventivas o correctivas [1].

El monitoreo del estado de la herramienta es un factor importante, ya que la rotura de las herramientas representan alrededor del 20% del tiempo sin maquinarse [1], mientras que el desgaste de las mismas impacta negativamente en la calidad del trabajo en cuanto a precisión dimensional, acabado e integridad superficial. Por otra parte, el costo de las herramientas puede ser reducido notablemente por medio de la optimización de su vida útil.

El monitoreo del estado de la herramienta de corte en procesos de torneado es tratado en una importante cantidad de publicaciones [1,2]. En los últimos años la investigación en este campo se ha centrado sobre métodos indirectos [2], los cuales estiman el estado de la herramienta basados en medidas indirectas tales como: fuerzas y temperatura de corte, vibraciones, emisiones acústicas, entre otras. Además, el monitoreo en tiempo real del estado de la herramienta, es decir en forma continua durante el proceso, puede ser utilizado para llevar adelante acciones de control o de tipo supervisor.

La fuerza de corte desarrollada durante el mecanizado puede ser estimada por métodos indirectos mediante la medición de la potencia consumida o en forma directa a través de la utilización de un dinamómetro [3,4]. En general estos últimos se basan en la deformación elástica de materiales. Los transductores más comúnmente utilizados para captar tales deformaciones son del tipo piezoeléctricos o galgas extensiométricas (*strain-gauges*). Los piezoeléctricos presentan una desventaja importante al no poder medir

condiciones estáticas sin un complejo sistema de procesamiento de datos y poseen un mayor costo comparativo respecto de las galgas extensiométricas. Por otro lado, los *strain-gauges* poseen una buena exactitud en mediciones estáticas y permiten una implementación rápida, sencilla y económica. Estas condiciones justifican la selección de estos transductores para la fabricación de un dispositivo que apunta a ser utilizado masivamente en procesos de mecanizado.

Por otro lado, diferentes métodos han sido usados para estudiar la temperatura en la interfase entre herramienta y viruta, tales como modelos teóricos-experimentales [5] y simulaciones numéricas [6]. Sin embargo, generalmente estos métodos suponen conocida la fuente de calor, la cual introduce errores importantes en la estimación ya que es difícil de determinar con exactitud. También se puede medir la temperatura en forma directa utilizando imágenes infrarrojas [7] y pirómetros [8]. Pero estas no son muy confiables ya que la zona de corte está oculta por la viruta y además estos métodos son de laboratorio y no de aplicación directa a la planta fabril por su complejidad y costo. Una revisión reciente y exhaustiva de estos métodos, incluyendo otros, se puede encontrar en [9].

En el presente trabajo se desarrolla un sistema para medir en tiempo real las fuerzas de corte y de avance y también para estimar la temperatura en la interfase herramienta-viruta. La medición de las fuerzas de corte se obtiene a partir de galgas extensiométricas (*strain gauges*) pegadas sobre la superficie del porta-insertos; un antecedente de este método se puede encontrar en [10]. Para conocer la temperatura de corte se hace una estimación de la misma partiendo de la medición de temperatura a una cierta distancia de la zona de corte. Para ello se coloca un termopar en la base del inserto, tal como se hace en [11]. Luego las estimaciones de la temperatura y de la fuente de calor se obtienen a partir del empleo de técnicas de filtros iterativos [12].

Además se presenta la implementación del sistema de monitoreo del proceso de torneado y la aplicación para la adquisición y procesamiento de datos desarrollada bajo el entorno DASyLab. Finalmente se muestran datos experimentales obtenidos durante operaciones de cilindrado en un torno CNC y conclusiones del desempeño del sistema de monitoreo.

## 2. SISTEMA DE MONITOREO DE LA TEMPERATURA

### 2.1. Modelo térmico de la herramienta de corte

El monitoreo de la temperatura en la zona de corte de la herramienta se lleva adelante en forma indirecta, ya que el monitoreo directo no es factible debido a que la interfase viruta-herramienta no es accesible. La técnica empleada consiste en medir la temperatura con un termopar a una cierta distancia de la zona de corte, más precisamente en la base de la herramienta, y a partir de ese dato hacer una estimación de la temperatura de corte. Esta situación implica un problema inverso de conducción de calor porque se conoce la temperatura pero no la fuente que la genera.

Primero se plantea un modelo directo para el problema de conducción de calor, el cual siendo validado sirve para plantear el problema inverso. Considerando que para el presente caso no se emplean fluidos de corte en el maquinado, se puede decir que la convección de calor desde las caras expuestas al medio ambiente es despreciable frente a la conducción hacia el material de la herramienta y del portaherramientas. Esto permite considerar aisladas las caras de la herramienta y del portaherramientas, simplificando el campo de temperaturas dentro del material como un campo con simetría esférica centrado en la zona de contacto entre viruta y herramienta [13], tal como muestra la Fig. 1. Con estas consideraciones, la ecuación de conducción de calor expresada en coordenadas esférica se reduce a:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $T(r,t)$  representa el campo térmico dependiente de la posición radial  $r$ , del tiempo  $t$  y difusividad térmica del material  $\alpha$ .

Como condiciones de contorno tenemos en primer lugar a la fuente de calor, que se ubica en la interfase viruta-herramienta y que es producto de la deformación plástica del material y de la fricción entre viruta y herramienta. Esta fuente de calor  $G(t)$  se asume variante en el tiempo y en la realidad está distribuida en

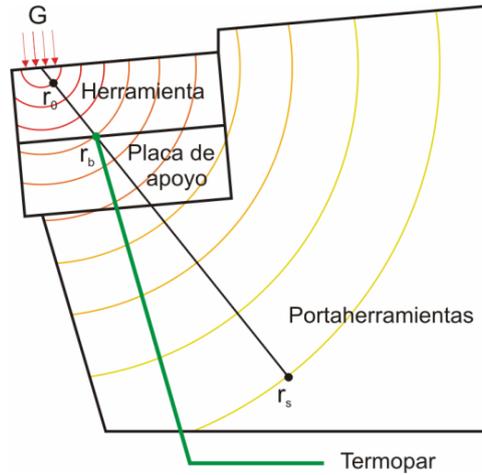


Fig. 1. Modelo directo del problema de conducción de calor.

la interfase viruta-herramienta. Sin embargo, debido a la simetría esférica que se está tratando de resolver, esta fuente se considera distribuida sobre un casquete semiesférico de radio  $r_0$ , el cual se muestra en la Fig. 1. Por lo tanto, la condición de contorno se expresa como:

$$-k_h \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = G(t) \quad r = r_0; \quad t > 0 \quad (2)$$

donde  $k_h$  es la conductividad térmica de la placa de corte. El valor de  $r_0$  se calcula igualando el área del casquete con el área de la superficie de interfase viruta-herramienta. Luego, la temperatura a  $r_0$  es la máxima temperatura a estimar.

Una segunda condición surge de los elevados gradientes de temperatura en las cercanías de la fuente de calor y por lo tanto tendiendo a cero al alejarse de la fuente. Se asume entonces un gradiente de temperatura despreciable a una cierta distancia  $r_s$  del origen de coordenadas, obteniendo:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0 \quad r = r_s; \quad t > 0 \quad (3)$$

Una condición adicional considera el cambio de características térmicas a una distancia  $r_b$  del origen de coordenadas; es allí donde se encuentra la interfase entre herramienta y placa de apoyo, precisamente donde se mide la temperatura con el termopar (4):

$$k_h \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = k_{ph} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \quad r = r_b; \quad t > 0 \quad (4)$$

donde  $k_{ph}$  es la conductividad térmica del portaherramientas y de la placa de apoyo que generalmente son del mismo material. Además,  $r_b$  es la distancia de esta interfase tal como se muestra en la Fig. 1.

## 2.2. Discretización del modelo

Primero se realiza un cambio de variables dado por  $U=rT$ , lo cual simplifica el desarrollo del problema. Luego se discretizan las ecuaciones usando diferencias centradas para obtener la dinámica de puntos discretos dentro de la herramienta. También se realiza una discretización temporal directamente utilizando una función de Matlab (c2dm) con un tiempo de muestreo de 0.1 s y un retenedor de orden cero (zoh). Ambos criterios de discretización fueron usados en [12] para resolver un problema inverso de transferencia de calor unidireccional en placa plana. Finalmente el sistema puede ser representado como:

$$X_k = \Phi X_{k-1} + \Gamma G_{k-1} + w_{k-1} \quad (5)$$

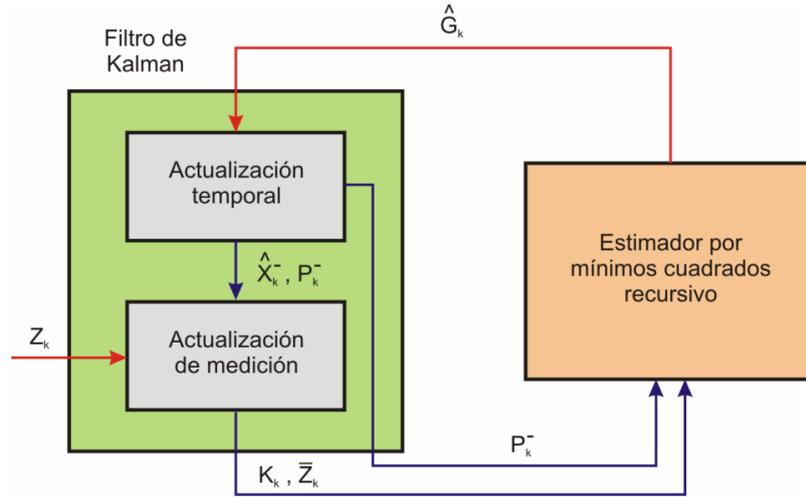


Fig. 2. Diagrama de bloques del estimador de filtros recursivos.

donde  $X_k$  es el vector de estados dado por:

$$X_k = [U_{0,k} U_{1,k} U_{2,k} \dots U_{n-1,k}]^T \quad (6)$$

donde el primer subíndice de cada elemento denota el número de nodo y el subíndice  $k$  denota secuencia temporal. Además,  $\Phi$  es la matriz de transmisión de la dinámica de los nodos y  $\Gamma$  es la matriz que relaciona la entrada discreta  $G_k$  con la dinámica de los nodos. La variable  $w_k$  es incluida para incorporar la incertidumbre del modelo. Las matrices  $\Phi$  y  $\Gamma$  son de dimensión  $[N \times N]$  y  $[N \times 1]$  respectivamente, donde  $N$  es el número de nodos usados en la discretización espacial.

La salida del sistema  $Z$  está dada por la medida del termopar y se puede representar como:

$$Z_k = HX_k + v_k \quad (7)$$

donde  $H$  posee todos ceros excepto en la ubicación del termopar en  $r = r_b$ . La variable  $v_k$  es incorporada para tener en cuenta la incertidumbre en la medición. Tanto  $v_k$  como  $w_k$  se asumen variables aleatorias, independientes y tipo ruido blanco con una distribución normal.

La dinámica del modelo directo presentado fue verificado experimentalmente en operaciones de torneado tal como se muestra en [14].

### 2.3. Solución del problema inverso

En este problema no se conoce todo el vector de estados ni la entrada del sistema, correspondiente a la fuente de calor. Sin embargo se conoce la dinámica del sistema y la salida, que es la temperatura que mide el termopar en la base de la herramienta. Por lo tanto, esto representa un formato típico de problema inverso de conducción de calor donde se debe estimar la fuente y además se busca estimar el estado de los nodos, en particular el estado de  $r_0$ , donde justamente se considera la máxima temperatura de corte. Para ello se construye un estimador compuesto por dos procesos recursivos, tal como muestra el diagrama de bloques de la Fig. 2. Básicamente se planteó un filtro Kalman para estimar el estado de los nodos y un Estimador Recursivo de Mínimos Cuadrados para estimar el flujo de calor, tal como fue propuesto por [12] para un problema general unidimensional.

El filtro Kalman se divide en dos partes [15]. Una actualización temporal dada por:

$$\hat{X}_k^- = \Phi \hat{X}_{k-1} + \Gamma G_{k-1} \quad (8)$$

$$P_k^- = \Phi P_{k-1} \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T \quad (9)$$

donde los estados son proyectados temporalmente con la dinámica del sistema y usando un valor estimado o inicial de la fuente de calor, para obtener un estado *a priori*  $\hat{X}_k^-$ . También se actualiza una matriz de covarianza  $P_k$ .

En la actualización de la medición, el estado estimado en el paso anterior es corregido mediante el residuo  $\bar{Z}_k$ , afectado por la ganancia de Kalman  $K_k$ , para obtener la estimación corregida del estado  $\hat{X}_k$ , mediante:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (10)$$

$$\bar{Z}_k = Z_k - H\hat{X}_k^- \quad (11)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k \bar{Z}_k \quad (12)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (13)$$

Como se puede observar el residuo  $\bar{Z}_k$  es la diferencia entre el estado estimado y el medido en el nodo localizado en  $r_b$ . En este caso, la incertidumbre de la dinámica está dada por la matriz  $Q$  y el ruido de la medición por la matriz  $R$  las cuales se calculan utilizando  $v_k$  y  $w_k$  respectivamente.

El flujo de calor  $\hat{G}_k$  se supone conocido para el filtro Kalman, sin embargo este también debe ser estimado. Para lo cual se utiliza el filtro descrito en [12] como:

$$B_k = H(\Phi M_{k-1} + I)\Gamma \quad (14)$$

$$M_k = (I - K_k H)(\Phi M_{k-1} + I) \quad (15)$$

$$S_k = HP_k^- H^T + R \quad (16)$$

$$K_{bk} = \frac{1}{\gamma} P_{bk-1} B_k^T \left( S_k + \frac{B_k P_{bk-1} B_k^T}{\gamma} \right)^{-1} \quad (17)$$

$$P_{bk} = \frac{1}{\gamma} (I - K_{bk} B_k) P_{bk-1} \quad (18)$$

$$\hat{G}_k = \hat{G}_{k-1} + K_{bk} (\bar{Z}_k) \quad (19)$$

donde en la estimación del flujo de calor del paso anterior se actualiza mediante una ganancia  $K_{bk}$  y el residuo. Los parámetros  $B_k$  y  $M_k$  son matrices de sensibilidad,  $S_k$  es la covarianza de la corrección del residuo y  $P_{bk}$  es la covarianza del error. El coeficiente  $\gamma$  es el factor de olvido y puede tomar valores entre 0 y 1.

El valor estacionario de la estimación fue comparado con los datos estimados en forma teórica por [16], también a partir de mediciones de la temperatura en la base de la placa de corte. Se encontró que el filtro propuesto presenta estimaciones similares a las teóricas, pero con la ventaja de que puede detectar, en tiempo real, cambios en la temperatura debido a cambios en el proceso.

#### 2.4. Inicialización de los algoritmos de estimación

Los algoritmos descritos requieren de la inicialización de varias variables. Primero se estudió la señal del termopar y se estableció un valor de ruido dado por  $v = 3.2 \times 10^{-3}$  y este mismo valor fue asignado a  $w$ , ya que no se cuenta con una estimación de las posible incertidumbres del proceso. Con estos valores se

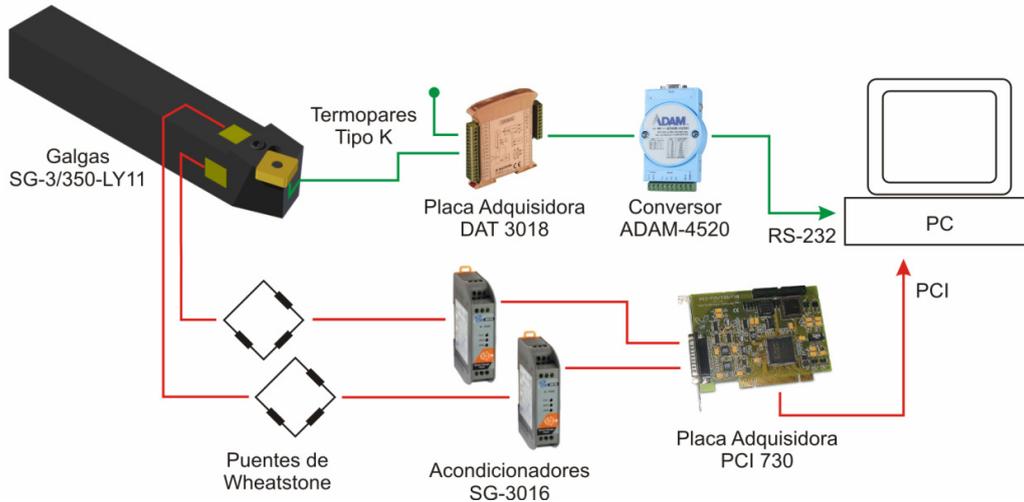


Fig. 3. Diagrama esquemático de la implementación del sistema de monitoreo.

calcularon la matriz de covarianza del ruido de la medición,  $R$ , y la covarianza del ruido del proceso,  $Q$ , según [15].

También se establecieron valores iniciales para  $P_k$ ,  $M_k$  y  $P_{bk}$ . La matriz  $P_k$  es diagonal donde se fijaron sus valores  $r_i^2 \times 10^{-5}$ , por lo que cada elemento depende de la ubicación,  $r_i^2$ , de su correspondiente nodo. La matriz  $M_k$  también es diagonal y sus elementos se fijaron en  $r_i \times 10^4$ . Finalmente el escalar  $P_{bk}$  fue inicializado con un valor de  $1 \times 10^{11}$ . Para la selección de estos valores se tomaron los presentados en [12], los cuales fueron adaptados al problema en particular y luego ajustados mediante simulaciones hasta obtener un adecuado transitorio de la estimación. Mediante simulaciones se encontró que un factor de olvido de  $\gamma = 0.9$  representa un buen compromiso entre la velocidad de estimación y el sobrepico de la misma.

La herramienta de corte es de carburo de tungsteno con una conductividad térmica de  $k_h = 84$  (W/mK) y una difusividad térmica de  $\alpha_h = 3.1 \times 10^{-5}$  ( $m^2/s$ ). La conductividad y difusividad térmica de la placa de apoyo y del mango porta-herramienta son  $k_{ph} = 51$  (W/mK) y  $\alpha_{ph} = 1 \times 10^{-5}$  ( $m^2/s$ ) respectivamente, los cuales corresponden al acero.

### 3. PREPARACIÓN EXPERIMENTAL Y DESARROLLO DE LA INTERFASE

#### 3.1. Conectividad de los componentes

En la Fig. 3 se aprecia el diagrama esquemático de la implementación física del sistema de monitoreo completo.

La parte correspondiente al monitoreo de temperatura consiste en un termopar, en una placa adquisidora y en un conversor de comunicación serial entre la placa y la PC. El termopar es tipo K y para colocar la junta en estrecho contacto con la base de la herramienta se emplea una placa de apoyo a la que se le practicó un orificio. La placa adquisidora es marca Datexel modelo DAT 3018, la cual permite como entradas señales provenientes de termopares, tiene una frecuencia máxima de muestreo de 10 Hz y comunicación serial RS-485. Se emplea un conversor serial para adecuar la señal al protocolo RS-232 de la PC. Adicionalmente, se utiliza un termopar igual al anterior para tomar la temperatura ambiente que va conectado a otra de las entradas de la placa adquisidora.

En cuanto al subsistema de monitoreo de fuerzas, se colocaron galgas extensiométricas y sus respectivos puentes de Wheatstone tal como se muestra en la Fig. 3. Si bien hay dinamómetros comerciales, se utilizó esta implementación sencilla solo para probar el sistema de monitoreo. Además, esta implementación será reemplazada en breve por un dinamómetro actualmente en desarrollo y que utiliza el mismo principio de medición.

Se emplean dos galgas, una para medir la fuerza de corte y otra para la de avance, las cuales van adheridas en las correspondientes superficies del porta-insertos. Para proporcionar el espacio necesario para el pegado de las galgas extensiométricas fue necesario aumentar el voladizo del portainsertos. Con el objeto de analizar su influencia en la rigidez y la sensibilidad cruzada de esta configuración se realizaron simulaciones por elementos finitos. Estas simulaciones arrojaron como resultado que el portainsertos mantiene una buena rigidez (220 N/um y 200 N/um en las direcciones vertical y horizontal respectivamente) con una sensibilidad cruzada del orden del 4% lo cual es aceptable.

Las galgas extensiométricas utilizadas son marca Omega modelo SG-3/350-LY11, con resistencia nominal de 350  $\Omega$  y *gage factor* aproximado de 2. Los acondicionadores de señal son marca ICP DAS modelo SG-3016 con capacidad de amplificación x1000. La placa adquisidora que se emplea es marca Eagle modelo PCI-730 con resolución de de 14 bit y la frecuencia máxima de muestreo es de 100 ksample/s.

### 3.2. Desarrollo de la aplicación de monitoreo

La aplicación de monitoreo en tiempo real se desarrolló en el entorno del software DASyLab 10.0 versión Basic. La aplicación desarrollada se comunica con la placa adquisidora Eagle PCI-730 para obtener las señales provenientes del sistema de monitoreo de fuerzas. A su vez también se comunica con la placa adquisidora Datexel DAT 3018 por medio del puerto serie RS-232 para obtener las medidas de temperatura en formato ASCII.

El sistema de monitoreo puede establecer comunicación con otras aplicaciones empleando el protocolo de intercambio dinámico de datos DDE, que es uno de los métodos de intercambio de datos entre procesos que corren bajo Windows. Por este medio, la aplicación de monitoreo, en cada paso de tiempo envía la medición del termopar a Matlab, donde corre el algoritmo de estimación de temperatura, para luego recibir el valor estimado. Al iniciar el monitoreo, el usuario ingresa los parámetros de corte (velocidad, avance y profundidad de corte) y toma la temperatura ambiente por medio del termopar libre; estos datos también son enviados por única vez a Matlab antes de iniciar el estimador. Otra conversación DDE se establece con Excel, a donde la aplicación de monitoreo envía los valor de cada parámetro de interés para su almacenamiento y posterior análisis.

## 4. ENSAYOS DEL SISTEMA

Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de monitoreo, se realizaron una serie de pruebas en operaciones de cilindrado de fundición gris y se midieron las fuerzas de corte y se estimó la temperatura de la interfase viruta-herramienta.

### 4.1. Diseño de los experimentos

Se propusieron seis operaciones de cilindrado, todas con una profundidad de corte  $w = 1$  mm, que difieren en la velocidad de corte ( $V_c$ ) y el avance ( $t_0$ ), como muestra la tabla 1. El rango de parámetros de corte se ubica dentro de los recomendados para la herramienta empleada, marca Sandvik, modelo SNMG 09 03 08-QM, calidad H13A. Las experiencias se realizaron en un torno CNC marca Promecor modelo SMT03.

Tabla 1. Parámetros del proceso y valores medidos.

Experimento	$V_c$ [m/min]	$t_0$ [mm/rev]	$w$ [mm]	Fuerzas Promedio [N]		Temp Estimada ( $t=160$ s) [°C]
				$F_c$	$F_t$	
1	70	0,3	1	859,3	454,8	1038,0
2	70	0,2	1	686,2	470,5	1032,1
3	45	0,3	1	922,7	676,9	1001,2
4	45	0,2	1	614,8	333,0	839,9
5	20	0,3	1	990,9	611,2	775,3
6	20	0,2	1	627,2	330,8	639,0

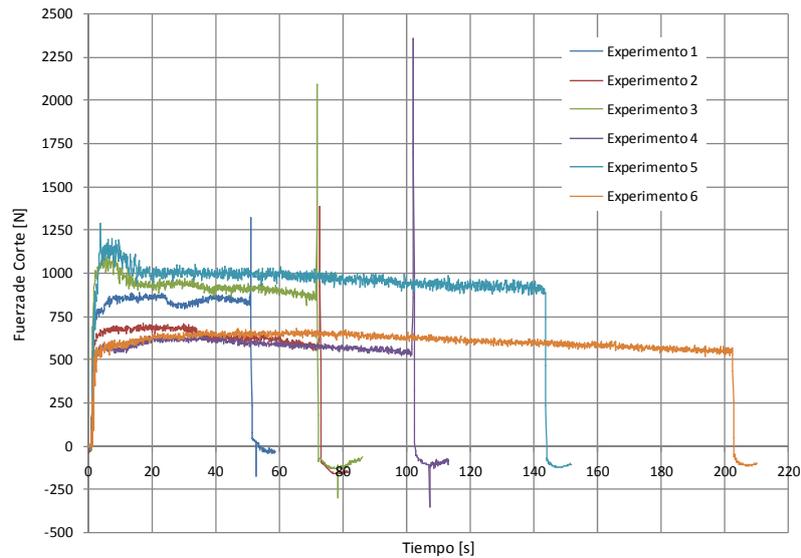


Fig. 4. Evolución temporal de la fuerza de corte.

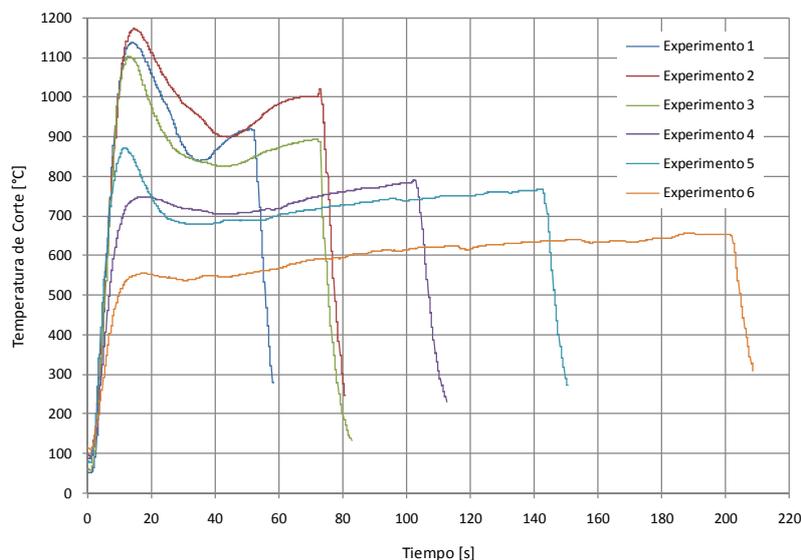


Fig. 5. Evolución temporal de la temperatura de corte.

## 4.2. Resultados de los experimentos

La Fig. 4 muestra la evolución temporal de la fuerza de corte medida, donde se puede apreciar un leve descenso hacia el final, atribuido al aumento de la temperatura en la zona donde se encuentra pegada la galga, lo cual induce un error de medición. Este error también se puede observar en el desvío de cero residual al finalizar cada maquinado. El pico que se observa al finalizar las experiencias 1, 2, 3 y 4, tiene que ver con que la herramienta se encuentra con un borde al finalizar el maquinado, lo que significa un aumento considerable de la profundidad de corte y por lo tanto de la fuerza; esto se corrige en las últimas pasadas.

La Fig. 5 muestra la evolución temporal de la temperatura estimada en la zona de corte donde se aprecia un período transitorio antes del establecimiento de la medición, este transitorio es producto de la dinámica del estimador y no de la temperatura real a estimar. Se define en el estimador un valor inicial diferente de

cero para la fuente de calor por lo que es de esperar que los valores de temperatura al inicio del monitoreo sean superiores a la temperatura ambiente.

Para comparar las mediciones obtenidas entre las diferentes experiencias se calcula un valor para cada una de las fuerzas y para la temperatura, como se muestra en las tres últimas columnas de la tabla 1. Se muestran fuerzas promedio de corte y de avance donde las señales son más estables. La temperatura que se muestra en la tabla corresponde al valor estacionario extrapolado en  $t = 160$  s para cada experimento.

En cuanto a los valores de fuerzas, se pueden observar tendencias. Para una misma velocidad de corte, se tienen en general valores de fuerzas más altos para el mayor avance. No se puede observar una variación considerable de las fuerzas al comparar entre diferentes velocidades de corte, aunque los valores aumentan levemente a medida que la velocidad disminuye. Las fuerzas de avance en todos los casos son menores a las correspondientes fuerzas de corte. Por otro lado, los valores de temperatura aumentan tanto con la velocidad de corte como con el avance, como es de esperar.

## 5. CONCLUSIONES

Se obtuvo un sistema que monitorea, procesa y almacena en tiempo real las fuerzas y la temperatura de corte de un proceso de torneado, donde se destacan el acondicionamiento y la integración de diferentes tipos de señales y la comunicación entre los diferentes softwares (Matlab, Excel y DasyLab).

La celda de carga empleada muestra claras deficiencias a partir del efecto de las variaciones de temperatura sobre las galgas extensiométricas. Sin embargo, en este trabajo resultó útil para probar el sistema de monitoreo desarrollado.

Finalmente, la estimación de la temperatura resulta satisfactoria, aunque la duración del transitorio establece un tiempo mínimo de mecanizado necesario para poder estimar la temperatura estacionaria de corte. Cabe destacar, que la temperatura estimada muestra una alta sensibilidad frente a variación de los parámetros de corte. Por lo que es de esperar que también presente alta sensibilidad frente a cambios en el proceso, como ser desgaste de herramienta o cambios en las propiedades del material a maquinarse, y pueda de esta manera ser usado para monitorear el estado del proceso.

## REFERENCIAS

- [1] Liang, S., Hecker, R., Landers, R., "Machining process monitoring and control: The state-of-the-art", *ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering*, **126**, 297-310 (2004)
- [2] Sick, B., "On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: A review of more than a decade of research", *Mechanical System & Signal Processing*, **16**(4), 487-546 (2002)
- [3] Korkut, I., "A dynamometer design and its construction for milling operation", *Materials & Design*, **24**(8), 631-637 (2003)
- [4] Yıldız, S., Ünsaçar, F., "Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement", *Materials & Design*, **27**(10), 839-846 (2005)
- [5] Tay, A.A.O., "A Review of Methods of Calculating Machining Temperature", *Journal of Materials Processing Technology*, **36**, 225-257 (1993)
- [6] Usui, E., Shirakashi, T., Kitagawa, T., "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process, Part 3: Cutting Temperature and Crater Wear of Carbide Tool", *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, **100**, 236-243 (1978)
- [7] Herchang, A., Wen-Jei, Y., "Heat transfer and life of metal cutting tools in turning", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **41**, 613-623 (1998)
- [8] Muller, B., Renz, U., "Time resolved temperature measurements in manufacturing", *Measurement Journal*, **34**, 363-370 (2003)
- [9] Davies, M.A., Ueda, T., M'Saoubi, R., Mullany, B., Cooke, A.L., "On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes", *Annals of the CIRP*, **56**/2 (2007)
- [10] Santochi, M., Dini, G., Tantussi, G., Beghini, M., "A sensor integrated tool for cutting force monitoring", *Annals of the CIRP*, **46**(1), 49-52 (1997)

- [11] D'errico, G.E., "A System Theory Approach to Modeling of Cutting Temperature with Experimental Identification", *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, **37**(2), 149-158 (1997)
- [12] Ji, C.-C., Tuan, P.-C., Jang, H.-Y., "A Recursive Least-squares Algorithm for On-line 1-D Inverse Heat Conduction Estimation", *International Journal of Heat Mass Transfer*, **40**, 2081-2096 (1996)
- [13] Olson, L., Throne, R., "Estimation of Tool/Chip Interface Temperatures for On-Line Tool Monitoring: An inverse Problem Approach", *Inverse Problems in Engineering*, **9**(4), 367-388 (2001)
- [14] Hecker, R., Manassero, F., Gessaghi, V., Flores, G., "Modelo térmico de una herramienta de corte para el desarrollo de un transductor de temperatura", *Actas del 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica* (2007)
- [15] Franklin, G., Powell, D., Workman, M., *Digital control of dynamics systems*, Addison-Wesley (1990)
- [16] Li, K.-M., Liang, S., "Modeling of Cutting Temperature in Near Dry Machining", *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, **128**(2), 416-425 (2006)

### **FORCE AND TEMPERATURE MONITORING SYSTEM FOR TURNING PROCESSES**

**Abstract** – Quality improvement and cost reduction drives the development of equipment to measure and control the main process variables in mechanical manufacturing. Particularly, in material removal processes, the monitoring of force, temperature and vibration can lead to process optimization and early failure detection. Following this concept, this paper presents the development of a system to monitor the cutting force and the temperature at the tool-chip interface. The force is directly measured using strain gauges in the tool system. Although this is a simple set-up, it is useful to test the complete monitoring system. Whereas, the cutting temperature is estimated using the measurement of a thermocouple placed in the base of the cutting tool together with an iterative filter. Finally, the detailed implementation is presented and experimental results from turning operations are shown.

**Keywords** – Monitoring, Turning process, Temperature, Force.