



*II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010*

Desarrollo de un Sistema de Monitoreo para el Proceso de Torneado

Matias D. Jaliff Perez¹, Rogelio L. Hecker², Gustavo M. Flores³

^{1,2,3}**Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Pampa**
Calle 110 y 9, (6360) General Pico, La Pampa
²**CONICET – Facultad de Ingeniería – UNLPam**
E-mail: hecker@ing.unlpam.edu.ar

RESUMEN

La continua demanda sobre la calidad y sobre la reducción de costos de los productos de manufactura mecánica impulsa el desarrollo de equipamiento adecuado para medir y controlar las principales variables de los procesos. El monitoreo de estas variables; tales como esfuerzos de corte, temperatura de la herramienta y vibraciones; permite tanto la optimización del proceso como la detección temprana de fallas.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una plataforma para monitorear las fuerzas de corte y la temperatura en la interfase herramienta-viruta para el proceso de torneado. La fuerza de corte es medida mediante la instalación de galgas extensiométricas en el mango porta-insertos. Mientras que la temperatura en la zona de corte es estimada mediante la medición de la temperatura en la base de la placa de corte, utilizando un termopar, más la implementación de un estimador recursivo. También se presenta el desarrollo de una interfaz de usuario donde se pueden visualizar y guardar las variables medidas.

Este trabajo presenta en detalle tanto la implementación del hardware como el desarrollo del software. Finalmente se incluyen datos experimentales de las principales variables y conclusiones sobre el funcionamiento del sistema de monitoreo, obtenidos a partir de pruebas de desempeño.

Palabras Claves: Monitoreo; Torneado; Temperatura; Fuerzas.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo y control de los procesos de remoción de viruta 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 maquinar [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 el proceso 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 de monitoreo del estado de la herramienta de corte [2], los cuales estiman el estado de la herramienta basados en medidas indirectas tales como: fuerzas de corte, temperatura de corte, vibraciones, emisiones acústicas, entre otras. Estos métodos son los más apropiados para implementarlos en tiempo real, es decir, para monitorear el estado de la herramienta de corte en forma continua durante el proceso, lo cual permitiría llevar adelante acciones de control.

En el presente trabajo se desarrolla un sistema para medir en tiempo real la fuerza de corte y la fuerza de avance, y también estimar la temperatura de corte. Para la medición de las fuerzas de corte se pegan galgas extensiométricas sobre la superficie del porta-insertos; un antecedente de este método se puede encontrar en [3]. Para conocer la temperatura de corte se hace una estimación de la misma partiendo de la medición de la temperatura de la herramienta a una cierta distancia de la zona de corte. Para hacer las mediciones de temperatura necesarias se coloca un termopar en la zona próxima a la zona de corte, tal como se hace en [4,5]. Para hacer la estimación de la temperatura se emplea una técnica de filtros iterativos [5] [7].

Se aborda además el desarrollo del software de adquisición y procesamiento de datos bajo el entorno de DASyLab. Se diseña y se construye una aplicación para el monitoreo del proceso de corte que muestra en pantalla las fuerzas y la temperatura de corte y guarda la información en planillas de cálculo para análisis posteriores.

2. SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL

El sistema de monitoreo en tiempo real propuesto consiste en dos subsistemas independientes, uno para monitorear temperatura de corte y otro para monitorear fuerza de corte y fuerza de avance. La aplicación del monitoreo que corre en la PC se encarga de adquirir y procesar los datos de temperatura y de fuerzas, y de controlar el sistema a partir de la intervención del usuario.

Se desarrollan en cada una de las subsecciones siguientes cada uno de los subsistemas, la conectividad y el desarrollo de la aplicación de monitoreo.

2.1 Subsistema de monitoreo de temperatura 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.

Se plantea un modelo directo para el problema de conducción de calor, esquematizado en la Figura 1, el cual siendo validado sirve para plantear el problema inverso. El detalle del modelo fue presentado en [6] y aquí solo se presentan las generalidades para poder presentar la implementación del estimador. 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, tal como muestra la Fig. 1.

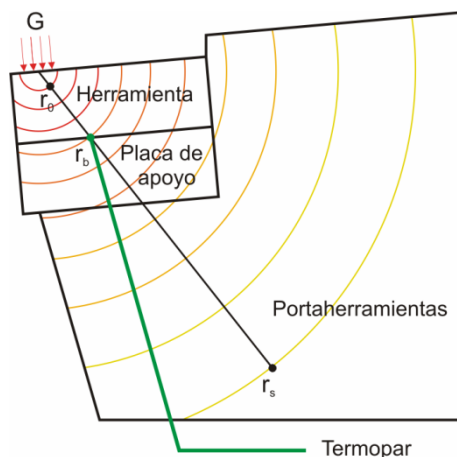


Figura 1 Modelo directo del problema de conducción de calor

Como condiciones de contorno tenemos en primer lugar a la fuente de calor, que se ubica en la interface viruta-herramienta; la cual se genera a partir de la deformación plástica de la viruta y de la fricción entre viruta y herramienta. Esta fuente de calor se asume variante en el tiempo y distribuida en una superficie rectangular sobre la herramienta. Debido a que la fuente no es puntual, la simetría esférica se considera para radios mayores a r_0 convenientemente seleccionado, como se describe en [6]. Una segunda condición tiene en cuenta los elevados gradientes de temperatura en las cercanías de la fuente de calor, tendiendo a cero al alejarse de la fuente; se asume entonces un gradiente de temperatura nulo a una cierta distancia r_s del origen de coordenadas. 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.

A partir de estas consideraciones se formula la ecuación de conducción de calor en coordenadas esféricas de la cual sólo se considera la componente radial, ya que el problema presenta simetría esférica. El modelo directo se discretiza espacialmente en diferencias finitas bajo un esquema de diferencias centradas, obteniéndose la descripción en variables de estado, donde la dinámica de cada nodo está en función de los nodos adyacentes y de las condiciones de contorno. De igual forma, se discretiza temporalmente. De esta manera el valor de la temperatura de cada nodo queda almacenado en un vector de estados el cual cambia en función de tiempos discretos.

En este problema no se conoce 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. Se busca entonces estimar el estado de cada uno de los nodos, en particular el estado de r_0 , donde justamente se considera la máxima temperatura de corte. Además se busca estimar el calor que ingresa al sistema. Se construye para esto un estimador compuesto por dos procesos recursivos, tal como muestra el diagrama de bloques de la Figura 2. Los detalles de este tipo de estimadores se encuentran en [5] y [7], donde aquí solo se muestran las generalidades para poder entender la implementación.

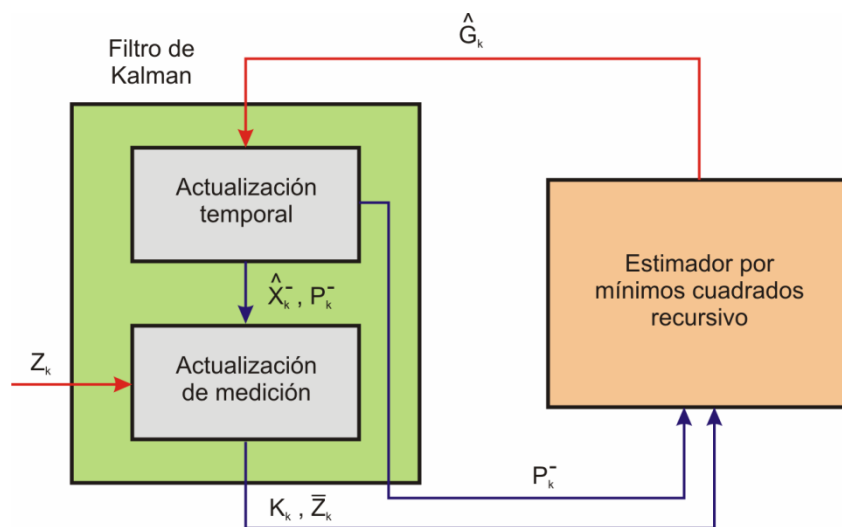


Figura 2 Diagrama de bloques del estimador de filtros recursivos, [7]

Uno de los procesos del estimador consiste en un filtro de Kalman que estima la temperatura de los nodos dentro de la herramienta. Las ecuaciones del filtro de Kalman se dividen en dos grupos: las ecuaciones de actualización temporal y las ecuaciones de actualización de la medición. Se puede considerar a las ecuaciones de actualización temporal como las encargadas de la predicción de los estados usando la dinámica supuesta de la planta. Mientras que las ecuaciones de actualización de la medición se pueden considerar como las responsables de la corrección del estado proyectado en base a la medición realizada de la temperatura en la base de la herramienta. El otro de los procesos es un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo para estimar el flujo de calor que ingresa a la herramienta desde la fuente; éste algoritmo emplea dos parámetros del proceso anterior: la diferencia entre el estado medido y el estado estimado, y la ganancia de Kalman.

2.2 Subsistema de monitoreo de fuerzas de corte

Para el monitoreo de las fuerzas se diseñó una celda de carga sencilla que consiste en el propio porta-insertos, sobre cuya superficie se adhieren galgas extensiométricas para medir las deformaciones, tal como se muestra en la Fig. 3. Para definir el diseño no se consideran requerimientos particulares de desempeño, aunque sí se buscó una implementación económica y sencilla. Con este diseño se logran monitorear la fuerza de corte y la fuerza de avance.

El porta-insertos que se emplea es marca Sandvik modelo PSNBL 1616H 09, el cual se vincula a la torreta del torno por medio del VDI marca IMTE modelo B1-20x16(5/8"). Partiendo de la disposición original en que se emplean estos elementos, se genera un voladizo mayor para amplificar las deformaciones que se manifiestan en el porta-insertos.

Las galgas extensiométricas que se utilizan son marca Omega modelo SG-3/350-LY11, con resistencia nominal de 350Ω y *gage factor* aproximado de 2. Se emplean dos galgas, una por cada dirección de medición, las cuales van adheridas a las superficies del porta-insertos sobre las que se espera obtener deformaciones amplificadas a partir del voladizo modificado. El voladizo, además de permitir mayor deformación, libera la zona donde va colocada la galga en la cara superior del porta-insertos.

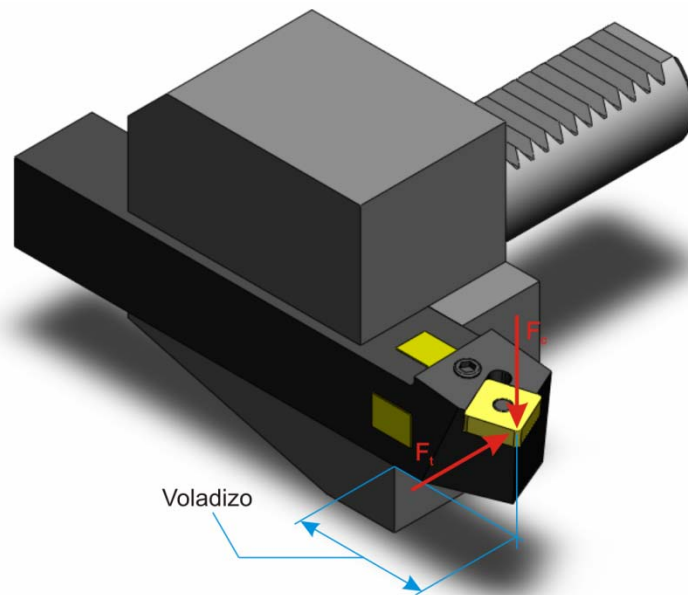


Figura 3 Modelo de la celda de carga

Para valorar el comportamiento del porta-insertos ante la nueva configuración, se llevan adelante análisis por elementos finitos sobre un modelo aproximado del mismo. Los valores que se emplearon para el análisis son 1000 N para la fuerza de corte y 800 N para la fuerza de avance. Los resultados indican que, en las zonas donde se colocan las galgas, con el voladizo ampliado se obtienen incrementos de 160 % para la deformación sobre la cara superior y de 116 % para la deformación sobre la cara anterior. Por otro lado, la rigidez disminuyó un 72 % en ambas direcciones. La sensibilidad cruzada que se obtiene oscila entre 2 % y 4 % para ambas direcciones, lo cual representa un buen valor.

2.3 Conectividad de los componentes

En la Figura 4 se aprecia el diagrama esquemático de la implementación física del sistema de monitoreo completo.

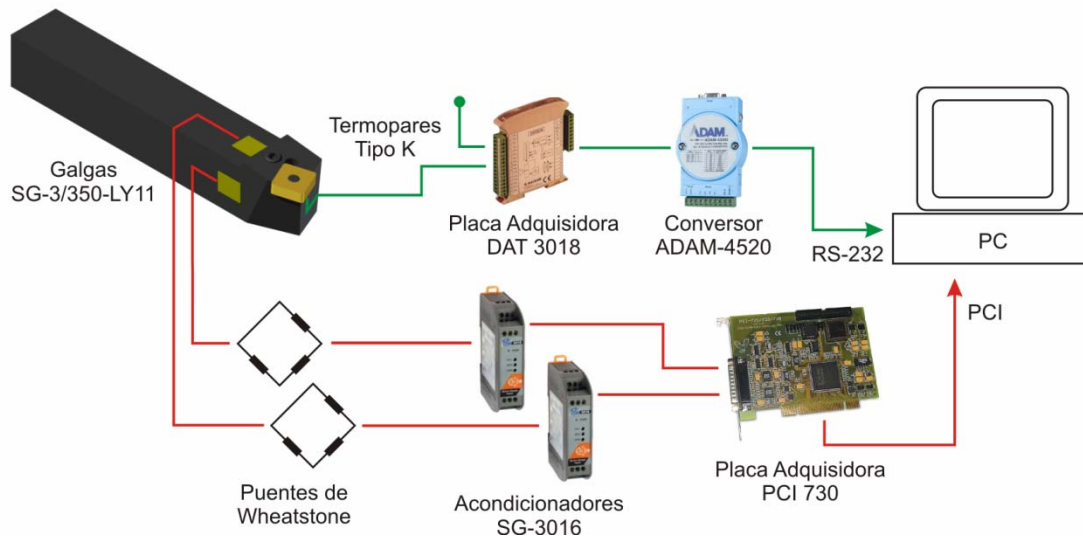


Figura 4 Diagrama esquemático de la implementación del sistema de monitoreo

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, además de las galgas extensiométricas, se cuenta con un puente de Wheatstone y un acondicionador de señal por cada componente de fuerza a monitorear, y una placa adquisidora de datos de propósito general. Los puentes de Wheatstone se construyen con resistencias comerciales, siendo variable una de ellas por puente para poder calibrar los mismos. Los acondicionadores de señal son marca ICP DAS modelo SG-3016; se selecciona como rango de entrada ± 10 mV y como rango de salida ± 10 V, obteniéndose una amplificación de 1000 veces. Se selecciona una tensión de excitación de 6,8 V, en función de la capacidad de disipación de calor de las galgas extensiométricas y de los valores de tensión y de corriente que pueden proveer los acondicionadores de señal. La placa adquisidora que se emplea es marca Eagle modelo PCI-730, de la cual se utilizan dos de sus entradas analógicas diferenciales, una por cada señal correspondiente a cada componente de fuerza; la resolución de la placa es de 14 bit y la frecuencia máxima de muestreo es de 100 kHz.

2.4 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. Es un software donde la programación se basa en gráficos o módulos interconectados y se puede generar una interfaz gráfica de usuario. 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.

Desde la aplicación de monitoreo se puede establecer comunicación con otros software 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. Se inicia una conversación DDE con Matlab, donde corre el script de estimación de temperatura. Por este medio, la aplicación de monitoreo, en cada paso de tiempo, envía la medición del termopar a Matlab y recibe la temperatura de corte estimada. 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 cada nuevo valor de cada parámetro de interés para volcarlos sobre planillas, de esta manera se guardan los datos para su posterior análisis.

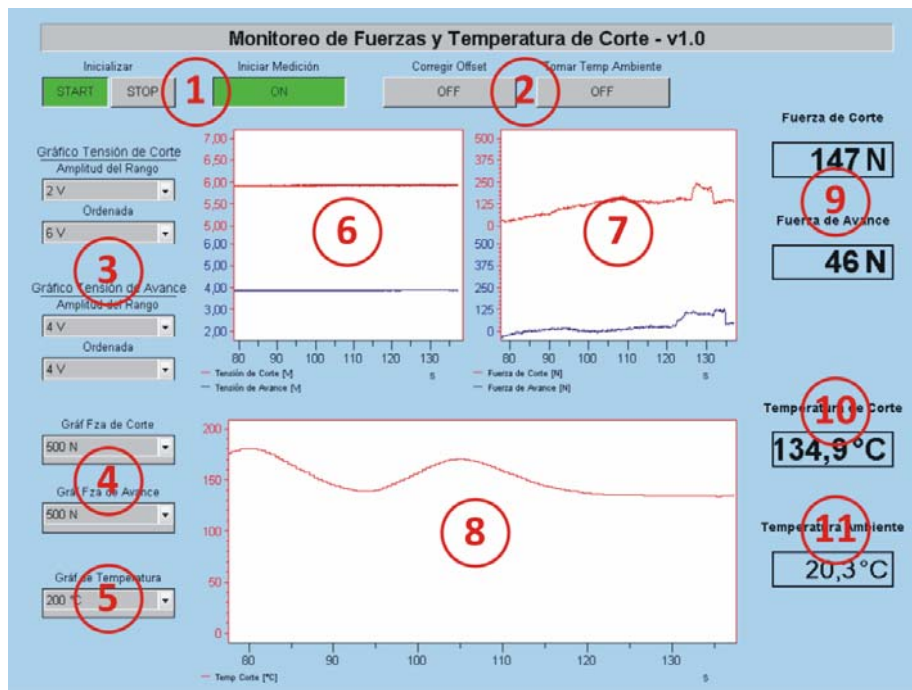


Figura 5 Interfaz gráfica de usuario de la aplicación de monitoreo

Se diseñó una interfaz gráfica de usuario empleando la herramienta VITool de DASyLab. En ella se incluyeron las siguientes características, tal como se aprecia en la Fig. 5: 1. Controles de inicio y fin de la aplicación y de la medición; 2. Controles de corrección de cero y de toma de temperatura ambiente; 3. Controles de visualización del gráfico de tensiones, 4. Controles de visualización del gráfico de fuerzas, 5. Control de visualización del gráfico de temperatura, 6. Gráfico de tensiones, 7. Gráfico de fuerzas, 8. Gráfico de temperaturas, 9. Valor instantáneo de fuerzas, 10. Valor instantáneo de temperatura y 11. Temperatura ambiente.

3. 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, donde se midieron las fuerzas de interés y se estimó la temperatura de corte.

3.1 Preparación de los experimentos

Se propuso una cantidad de seis operaciones de cilindrado, todas con una profundidad de corte de $w=1$ 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, la cual es de la marca Sandvik, modelo SNMG 09 03 08-QM, calidad H13A. El torno que se utiliza es un Promecor SMT-03.

Tabla 1 Valores representativos de fuerza de corte y de temperatura estimada de corte

Experimento	V_c [m/min]	t_0 [mm/rev]	w [mm]	Fuerzas Promedio [N]		Temp Estimada (t=160 s) [°C]
				Fc	Ft	
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

3.2 Resultados de los experimentos

La Figura 6 muestra la evolución temporal de la fuerza de corte, donde se puede apreciar un leve descenso atribuido al aumento de la temperatura en la zona donde se encuentra la galga, lo cual induce un error debido al calentamiento de la misma. 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 dos pasadas evitando maquinar el borde.

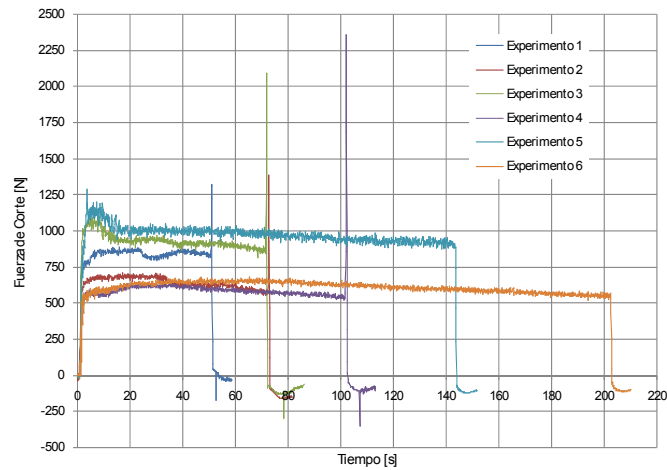


Figura 6. Evolución temporal de la fuerza de corte

La Figura 6 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 producto de la dinámica del estimador. Se define en el estimador un valor inicial para la fuente de calor, cuando el valor inicial en realidad es cero antes del contacto de la herramienta de corte con la pieza de trabajo, por lo que es de esperar que los valores de temperatura al inicio del monitoreo sean superiores a la temperatura ambiente.

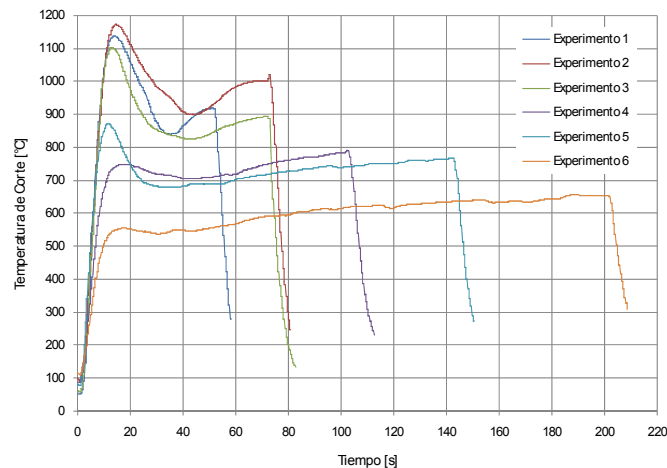


Figura 7. Evolución temporal de la fuerza de corte

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 se calcula para $t=160$ s por extrapolación.

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.

4. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo presentado resultó adecuado para este tipo de aplicación donde se destacan los siguientes puntos: la integración de diferentes tipos de señales y acondicionamiento de las mismas fue exitoso; el tiempo que consume el proceso de procesamiento y almacenamiento de datos fue adecuado para que esta sea una aplicación en tiempo real; la comunicación entre los diferentes softwares, tales como Matlab, Excel y DasyLab resultó exitosa. De esta manera se obtuvo un sistema que monitorea, procesa y almacena en tiempo real las fuerzas y la temperatura de corte de un proceso de torneado.

En cuanto a la implementación física del sistema, 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 sirvió en para probar el sistema de monitoreo desarrollado, el cual puede seguir siendo usado si se reemplaza el sistema de medición actual por una celda de carga. La medición de temperatura no presenta problemas, aunque se podría ajustar la velocidad de convergencia del filtro para disminuir el periodo transitorio.

5. REFERENCIAS

- [1] S. Liang, R. Hecker, R. Landers, Machining process monitoring and control: The state-of-the-art, *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, **126**, 297-310, 2004.
- [2] B. Sick, On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: A review of more than a decade of research, *Mech. Syst. Sign. Proc.*, **16**(4), 487-546, 2002.
- [3] M. Santochi, G. Dini, G. Tantussi, M. Beghini, A sensor integrated tool for cutting force monitoring, *Annals of the CIRP*, **46**(1), 49-52, 1997.
- [4] 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.
- [5] F. Manassero, *Desarrollo de un transductor de temperatura para torneado usando técnicas de filtros iterativos*, Trabajo Final de Grado – UNLPam, General Pico, 2008.
- [6] R. Hecker, F. Manassero, V. Gessaghi, G. Flores, *Actas del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Modelo térmico de una herramienta de corte para el desarrollo de un transductor de temperatura*, Cusco, 2007.
- [7] Ji, C-C., Tuan, P-C. and Jang, H-Y., "A Recursive Least-squares Algorithm for On-line 1-D Inverse Heat Conduction Estimation", *International Journal of Heat Mass Transfer*, **40**, pp 2081-2096, 1996.