

Extensión del estándar ISO 10303 AP-238 para la automatización del acceso a datos de procesos CNC

J. Garrido, R. Marín, J. Ignacio, J. Sáez

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Vigo,
E.T.S. Ingenieros Industriales, Campus Lagoas Marcosende, 36200, Vigo, España,
(e-mail: jgarri, marin, armesto, juansaez@uvigo.es)*

Resumen: El nuevo estándar ISO 10303-AP238 (STEP-NC) abre nuevas posibilidades para la comunicación de datos entre sistemas CAD/CAM y sistemas de fabricación CNC. Este artículo propone una extensión del modelo de información STEP-NC con nuevas estructuras de datos y nuevas funciones NC para contemplar capacidades de acceso a información en tiempo real del proceso de mecanizado, y apoyar a otras actividades avanzadas como la trazabilidad o la realización de los llamados procesos de mecanizado closed loop. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: Automation, CAD/CAM, CNC, Standards, ISO, monitoring, data acquisition.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistemas disgregados de fabricación CAD/CAM/CNC y nuevos estándares de programación CNC (STEP-NC)

Las tecnologías de la información y los avances en los sistemas de control numérico están permitiendo la migración de entornos cerrados y locales CAD (*computer aided design*)/CAM (*computer aided manufacturing*)/CNC (*computer numerical control*) a entornos de colaboración distribuidos. Esto facilitará a usuarios geográficamente distantes y dispersos trabajar conjuntamente en el desarrollo de geometrías CAD, en tareas relacionadas con CAM y en mecanizado CNC (Li *et al.*, 2005), dando lugar a los llamados sistemas de fabricación DABA (*design anywhere, build anywhere*).

Aunque en los dominios CAD/CAM se han producido avances significativos en la última década, los programas para controladores numéricos todavía siguen siendo globalmente definidos usando la norma ISO 6983 (ISO, 1982), a pesar de que supone un cuello de botella para el desarrollo de sistemas inteligentes y colaborativos de CNC. Esta norma define una serie de comandos básicos (los códigos G&M), que especifican trayectorias de herramienta y parámetros de mecanizado (velocidades, tipo herramienta, etc.), por lo que el programa comunicado al controlador se limita a información de “cómo hacer”, sin información sobre la pieza que se está haciendo (Albert, 2000). Esto dificulta que, por ejemplo, el controlador tome decisiones correctoras en tiempo de ejecución que reaccionen ante una situación cambiante del proceso, dado que el controlador ha de limitarse a seguir la secuencia de trayectorias especificada en el programa, sin la posibilidad de introducir cambios significativos dado que desconoce la forma de la pieza objetivo. Este desconocimiento de las geometrías resultantes de las operaciones de mecanizado (características mecánicas: *features*) impide, además, una integración efectiva de los códigos G&M con los sistemas CAD, CAPP (*computer-aided process planning*), CAM, etc. (Suh *et al.*, 2002), cuyos modelos de datos sí están construidos en torno a estas *features* de los productos.

Para superar estas limitaciones, ISO (*International Organization for Standardization*) ha desarrollado un nuevo conjunto de estándares conocido como STEP-NC (IMS, 2001) (Xu, 2006): la norma ISO 14649 (ISO, 2003) y la norma ISO 10303 AP-238 (ISO, 2002b). La primera de ellas define un modelo de los requerimientos de información para el intercambio de datos entre sistemas CAM y sistemas CNC de distintas tecnologías: torneado (ISO, 2004), fresado (ISO, 2005), etc. A partir de este modelo de alto nivel, la norma AP-238 (oficialmente estándar internacional desde el año 2007) define un modelo orientado a la implementación utilizando recursos comunes de STEP (ISO 10303: *Standard for the Exchange of Product data models*) (ISO, 1994a), los cuales son también empleados por otras partes del estándar para el intercambio de datos entre sistemas CAD, CAM, CAPP, etc.

STEP-NC, en su conjunto, proporciona información de alto nivel al sistema CNC que facilitará el desarrollo de una nueva generación de controladores más capaces de desarrollar funciones inteligentes y proporcionar nuevos servicios avanzados (Zhang *et al.*, 2006). Con STEP-NC se especifica no solamente cómo hacer una pieza, sino que también qué pieza se está haciendo ya que se comunica al controlador la geometría de esta (Simchi-Levi, *et al.*, 2003; Weck *et al.*, 2001). Las características de fabricación de la pieza mecanizada (*features*) son el elemento principal de la descripción geométrica de una pieza, y son clave en la integración con otras partes del estándar STEP (como se describirá en la sección dos del artículo).

1.2 Nuevos servicios en sistemas disgregados CAD/CAM/CNC: acceso a datos y trazabilidad.

La investigación en la fabricación colaborativa y disgregada se ha centrado en los flujos de datos descendentes (desde los sistemas CAD/CAM al CNC), tratando de encontrar soluciones a problemas tradicionales de intercambio de datos, como por ejemplo: visibilidad, integridad, etc. (Xu *et al.*, 2004). Sin embargo, nuevos requerimientos económicos como la fabricación flexible de productos hechos a medida y bajo pedido, requerimientos de dispersión geográfica y diversidad tecnológica de los procesos de fabricación (distintas entidades pueden usar

distintos sistemas CAM y CNC), y legales (control de calidad, trazabilidad, etc.), hacen necesario tener en cuenta nuevos requerimientos de información y su integración en entornos de colaboración amplios y flexibles. Así, resulta cada vez más necesario que información generada en la planta esté disponible para sistemas CAD, CAPP, y CAE (*Computer Aided Engineering*), por lo que es necesario establecer flujos de datos ascendentes que permitan que los sistemas de bajo nivel se comuniquen e integren con otros procesos de más alto nivel (Garrido *et al.*, 2006).

La trazabilidad de las actividades de fabricación es uno de estos procesos donde los datos monitorizados en planta tienen que estar a disposición de otros sistemas de ingeniería. La trazabilidad se puede definir como un conjunto de prácticas para el registro de información relevante acerca del proceso de fabricación, para su posterior análisis en caso de fallo del producto. Con mecanismos de trazado y rastreo (*tracing* y *tracking*) se analizan los datos de trazabilidad para deducir las posibles causas del fallo (de serlo debido a un defecto de fabricación), e identificar otras unidades fabricadas en las mismas condiciones que las del producto defectuoso (Jansen-Vullers *et al.*, 2003).

Por otro lado, hay un interés creciente en el acceso en tiempo real a datos de la máquina para apoyar a procesos avanzados de fabricación (Eastec, 2005). Esta información podría ser usada, por ejemplo, en procesos de *closed loop* (Hardwick *et al.*, 2006), que consisten en la ejecución de tareas de inspección geométrica realizadas después de que las *features* han sido mecanizadas (Chen *et al.*, 2003). Estas inspecciones se realizan por medio de palpadores que analizan las *features* mecanizadas de la pieza y las comparan con las diseñadas, para decidir si es necesaria una reparametrización del mecanizado o la realización de operaciones adicionales de corrección. Disponiendo de información del proceso, las técnicas de *closed loop* podrían trabajar no sólo con datos obtenidos a través de palpadores (una vez finalizada la fabricación), sino con los datos registrados durante la fabricación, como por ejemplo la desviación entre la trayectoria deseada para la herramienta y la realmente monitorizada a través de los *encoders*.

1.3 Nuevas funcionalidades para la automatización de acceso a datos y trazabilidad en STEP-NC

La dispersión de los procesos, la globalización, hace que las entidades que diseñan los productos no sean las que finalmente los fabrican. Sin embargo, las primeras son las responsables del producto de cara al mercado y, por tanto, las responsables de un proceso de trazado y análisis de datos en caso de que aparezcan defectos. Por todo ello, la trazabilidad ya no es vista como un proceso interno, sino que ha de realizarse de forma coordinada por todos los integrantes de la cadena.

En este contexto de colaboración entre sistemas disgregados CAD/CAM y sistemas CNC, el problema es como especificar al controlador que tiene que realizar tareas de acceso a datos de forma automática, y como asegurar la correcta interpretación de los datos trazados por otros sistemas distintos al controlador. Ha habido algunas aproximaciones para el problema del acceso a datos de proceso en entornos de fabricación STEP, aunque se han limitado a la especificación de modelos de datos extendidos para la representación de información proveniente de la máquina (Garrido *et al.*, 2006, Wosnik *et al.*, 2006, Fichtner *et al.*, 2006). Todas estas propuestas de modelos resolverían convenientemente el problema de la correcta interpretación de los datos recogidos, dado que aprovechan el flujo de datos descendentes armonizado según las *features* STEP (flechas 1 de la Figura 1) y del conocimiento compartido de las mismas por los distintos sistemas en entornos de fabricación STEP. Sin embargo no resolverían, de una forma fácil, el problema de la automatización de las tareas de trazabilidad y, muy especialmente, el de la interpretación automática de los requerimientos por parte del controlador (flecha 2 de la Figura 1), y la consiguiente recolección automática de los datos (flecha 3 de la Figura 1).

Por ello, e independientemente de como y según que modelo se representen los datos, el artículo aborda la automatización de la interpretación de los requerimientos de configuración de la trazabilidad comunicados desde los sistemas de diseño a los sistemas de planta. El artículo propone el traslado de requerimientos de información de acceso a datos a nuevas funciones NC para trazabilidad, que expanden las funciones NC ya existentes en el estándar STEP-NC.

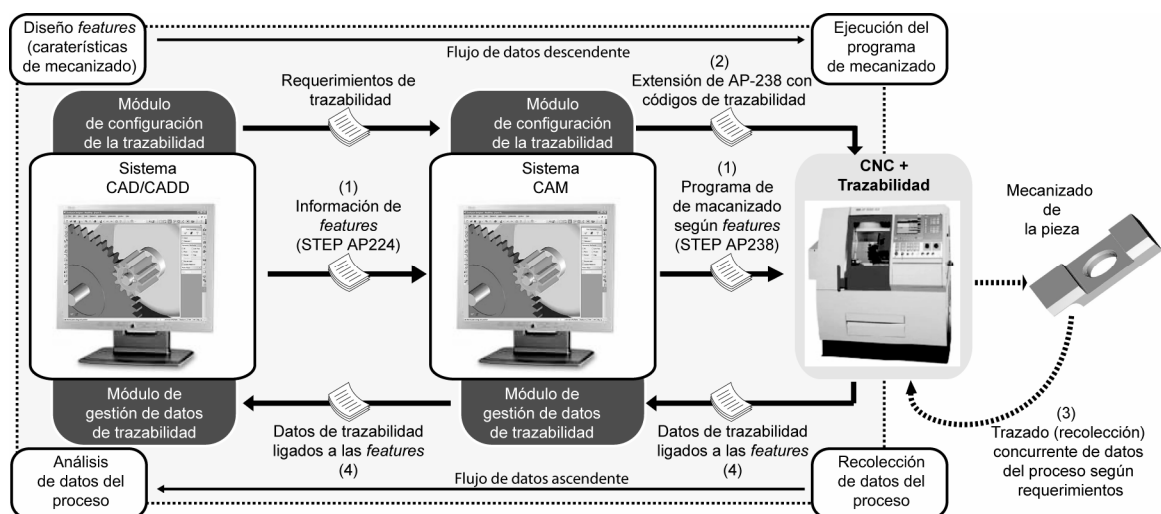


Figura 1. Actividades en entornos distribuidos: acceso a datos y trazabilidad.

A través del mecanismo de las funciones NC para trazabilidad (presentadas en la sección 3 del artículo), los requerimientos pueden ser automáticamente interpretados en los sistemas de planta, y automatizar las tareas de acceso a datos y su registro. Los datos registrados (enlazados con la información estándar de *features* del producto: flecha 4 en la Figura 1) seguirán el camino ascendente, desde la planta a los sistemas de alto nivel de diseño, planificación, gestión, control de calidad, etc.

La sección 4 del artículo presenta una implementación prototipo de trazabilidad del proceso de mecanizado en un entorno de fabricación STEP-NC, utilizando algunas de las funciones NC presentadas en la sección 3: desde la especificación de requerimientos en la fase de diseño, a la recolección automática de datos y su posterior revisión.

2. SISTEMAS DE FABRICACION STEP: "STEP MANUFACTURING SUITE" O "STEP ENABLED MANUFACTURING"

El estándar ISO STEP, desde su aparición, ha sido empleado como tecnología para el intercambio de datos entre sistemas en el mismo dominio: por ejemplo entre sistemas CAD heterogéneos. Sin embargo, STEP es un estándar en expansión y se están desarrollando nuevos modelos de datos para cubrir entornos de ingeniería CAD/CAM/CNC. Estos modelos, también conocidos como Protocolos de Aplicación (*Application Protocols: APs*), definen información de ingeniería de productos para que pueda ser compartida y comunicada electrónicamente. Todos los modelos STEP relacionados con fabricación, que van desde el diseño CAD (AP-203) al modelo para programación CNC (AP-238), conforman los llamados "sistemas o entornos de fabricación STEP" (*STEP-enabled manufacturing systems*). Todos ellos comparten Unidades Funcionales armonizadas (*UoF, units of functionality*), que cubren requerimientos de información específicos a distintas actividades, y que hacen posible un alto grado de eficiencia en la integración, interoperatividad e intercambio de datos (Hardwick, 2004).

La información de características de fabricación (*features*) ha sido armonizada en una Unidad Funcional común que es usada por todos los APs que conforman estos "entornos de fabricación STEP". Esto evita la necesidad de transformaciones de datos, con el riesgo de corrupción y pérdida de la información que ello conllevaría. El resultado es un flujo de información de entrada y salida en formato STEP desde los sistemas de diseño y

planificación de procesos hasta los sistemas de fabricación, permitiendo un intercambio directo entre sistemas CAD/CAM y CNC (Newman *et al.*, 2008).

La Figura 2 muestra este escenario de "entornos de fabricación STEP" (todavía en desarrollo en muchas de sus partes) para la fabricación y ensamblado de partes mecánicas diseñadas teniendo en cuenta las características de fabricación (*features*) (OMAC, 2005). El flujo de datos de la figure 2 puede describirse como sigue:

- En la primera fase, el diseño del producto se especifica empleando el AP-203, que incluye toda la información geométrica así como información básica de gestión de la configuración. Sin embargo un diseño AP-203 no incluye información de características de fabricación. Es necesario procesar los datos geométricos del AP-203 e identificar la geometría de dichas características para, en pasos sucesivos, asociarles datos relativos a la planificación y ejecución de su mecanización. El resultado es un diseño de datos AP-224 que contiene ambos, la información geométrica del AP-203 además de la información de las características de fabricación (*features*).
- A partir del diseño AP-224 los sistemas CAM pueden realizar procesos de planificación de tareas. El protocolo AP-240 podría ser usado para especificar el "macro process planning" (información sobre facilidades, controladores numéricos disponibles y la distribución del trabajo).
- Posteriormente, el Protocolo de Aplicación AP-238 especifica el "micro process planning". Esto es, la creación de programas para ser interpretados por controladores CNC que mecanicen piezas con características de fabricación descritas por un AP-224, pero manteniendo la relación entre la información geométrica de estas y las operaciones de mecanizado programadas.
- La información de características de fabricación armonizada hace posible el desarrollo de otros protocolos de aplicación STEP basados en ellas. Por ejemplo, el AP-219 para la inspección geométrica de los productos mecanizados en máquinas CMM (*Coordinate Measurement Machines*).

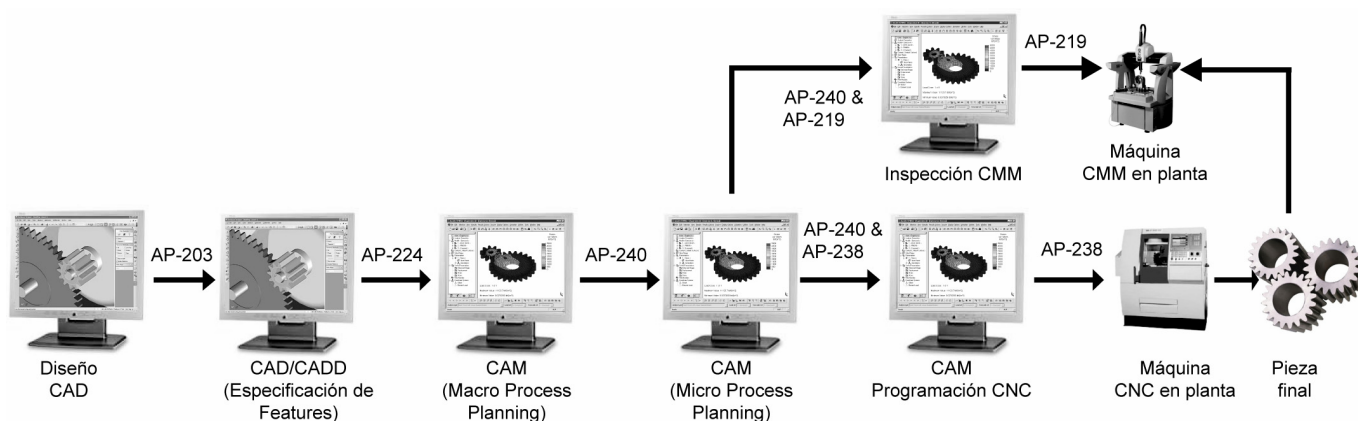


Figura 2. Escenario STEP de diseño y fabricación de piezas mecanizadas.

2.1 El lenguaje de programación AP-238

De entre los distintos Protocolos de Aplicación involucrados en un “sistema de fabricación STEP”, el AP-238 (*application interpreted model for computerized numerical controllers*) cubre requerimientos de información necesarios para la programación de sistemas CNC para varias tecnologías (fresado, torneado, etc.). Estos requerimientos de información se organizan alrededor de un conjunto de Unidades Funcionales cubriendo datos geométricos (*workpiece*, *geometric tolerances*, *toolpath*, *manufacturing features...*), estructuras de control para el programa ejecutable (*executable*), información de tecnologías y otro tipos de datos (*management*) (Hardwick *et al.*, 2001).

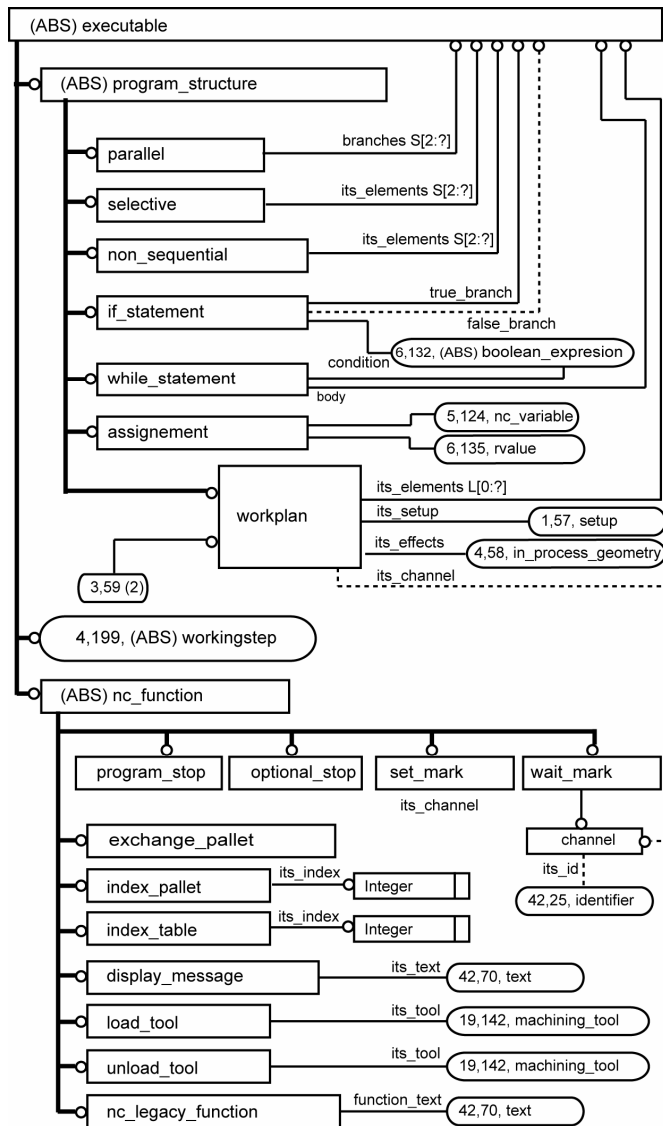


Figura 3. Estructuras de control en la Unidad Funcional *executable* de STEP-NC.

Los programas AP-238 pueden definir un conjunto de tareas complejas estructuradas para mecanizar las características de fabricación de una pieza (*features*). Esta organización de tareas se modela dentro de la unidad funcional *executable* que se muestra en la Figura 3 en forma de diagrama EXPRESS-G. Esta unidad funcional especifica los requerimientos de información necesarios para describir el flujo de control de un programa de

mecanizado, así como algunas acciones que no son de mecanizado pero que pueden ser realizadas por el CNC. De la entidad base (entidad *executable*) derivan el resto de entidades que describen las acciones del proceso. Estas entidades derivadas se pueden clasificar en tres tipos de objetos:

- *Workingsteps* describen operaciones de fabricación o de preparación que suponen movimientos de ejes. Se ejecutan sobre una pieza (*workpiece*) y son los bloques formales principales para un programa CNC.
- Las funciones NC describen operaciones puntuales o eventos singulares que no suponen el movimiento de ejes.
- Las estructuras de programación se usan para construir bloques lógicos y para la estructuración de las operaciones de fabricación. Estas estructuras de programa tienen ascendencia sobre la secuencia real de fabricación, siendo la más importante el *workplan*, que permite combinar varios *workingsteps* y funciones NC ordenados secuencialmente.

Además, como puede verse en la Figura 3, la unidad funcional *executable* permite el diseño del programa de acuerdo a estructuras más complejas. La naturaleza recursiva de la figura 3 se puede explicar mejor a través de la entidad *workplan*, que es una lista de elementos estructurales ejecutables: estos pueden ser *workingsteps*, funciones NC o incluso otros *workplans*.

3. MODELO EXTENDIDO DE STEP NC PARA TRAZABILIDAD

El artículo propone la extensión de las funciones NC del AP-238 con nuevas funciones NC de acceso a datos, con el objetivo de *automatizar* las actividades de trazabilidad. La Figura 4 muestra como las funciones NC propuestas de acceso a datos/trazabilidad se incorporan dentro del modelo STEP-NC existente. En una primera propuesta, las funciones han sido divididas en tres grupos. Las del primer grupo son funciones empleadas para describir acciones puntuales de recolección de valores individuales como: recoger tiempo de ejecución, el código que identifica al material base, a la máquina o a la herramienta actualmente en uso, etc. (desde *get_time* hasta *get_sensor_data*, en la Figura 4). Estas funciones son funciones de bloqueo o modales. Cuando están insertadas en un programa, y mientras son ejecutadas, el CNC no puede realizar la siguiente acción hasta que se complete la función de trazabilidad. Estas funciones ponen el valor accedido en una variable NC (variables internas del controlador definidas en STEP-NC) donde puede ser revisado en tiempo real o ser volcado a fichero una vez finalizada la fabricación.

Las funciones del grupo II se dividen en pares de funciones para el arranque y la detención de procesos de acceso a datos (*start_measuring_./stop_measuring_.*). Estas funciones monitorizan diversas variables del proceso de mecanizado a lo largo de las trayectorias de la herramienta (*toolpaths*). Estas funciones solamente se aplican a acciones que tienen un *tool path*, y ponen sus resultados en estructuras de datos compatibles con el tipo de datos STEP *bounded curve* (curvas acotadas). De esta forma, los datos recogidos tienen una componente geométrica, lo que facilita que pueden ser interpretados posteriormente por una aplicación que los ubica a lo largo del correspondiente *tool path*.

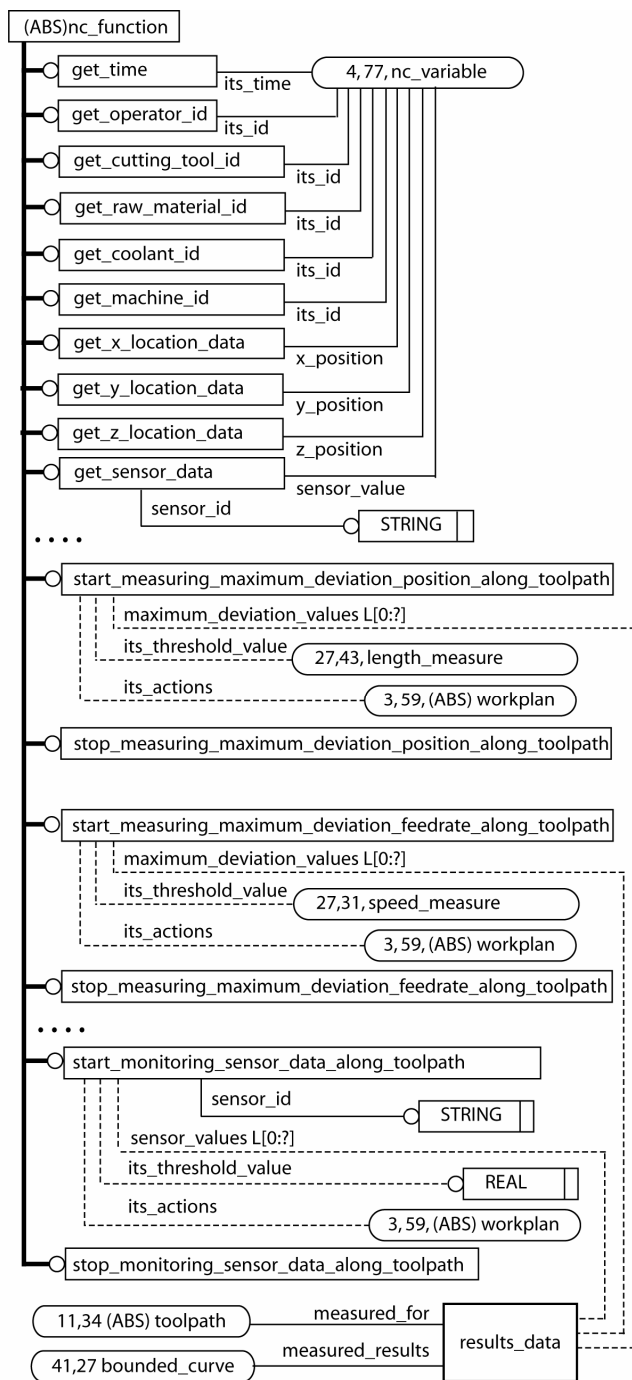


Figura 4. Algunas de las nuevas Funciones NC propuestas para el acceso a datos para el estándar STEP AP-238.

Son muchas las posibles variables a ser trazadas o evaluadas en procesos de mecanizado (Brecher *et al.*, 2006). La propuesta del artículo dedica una serie de funciones específicas a medir la máxima desviación de aquellas variables de mecanizado que tienen, dentro del modelo AP-238, un valor de tolerancia pre-establecido para dicho segmento, como por ejemplo la posición y velocidad de avance de la herramienta, dando lugar a:

```

start_measuring_maximun_deviation_position_along_toolpath
start_measuring_maximun_deviation_feedrate_along_toolpath

```

pero se deja abierto el acceso a cualquier otro valor de sensor o variable interna a través de la función genérica:

```

start_monitoring_sensor_data_along_toolpath

```

Finalmente, las funciones del grupo III extienden las funciones del grupo II añadiendo la posibilidad de iniciar acciones (un *work plan*) en caso de que una condición se cumpla. El propósito es enriquecer las operaciones *closed loop* de STEP-NC para ser capaz de reaccionar “durante la fabricación” en función de los datos monitorizados y realizar en consecuencia acciones preprogramadas.

Como ejemplo, a continuación se muestra la definición de dos funciones (una del grupo I y otra de los grupos II/III) en el lenguaje de modelado orientado a objetos definido por STEP: EXPRESS (ISO, 1994b). Ambas funciones heredan de la entidad “nc_function” ya definida en el AP-238, lo que sugiere que pueden ser utilizadas en un ejecutable en las mismas condiciones que lo hacen las funciones estándar.

La segunda de las entidades tiene, además del atributo *maximum_deviation_value*, que enlaza con la estructura de datos en donde se van a ir guardando los valores máximos calculados para cada segmento de *toolpath* (de tipo “*results_data*”), dos atributos opcionales (etiquetados como *OPTIONAL*). Estos serían nulos en caso de tratarse de una función del grupo II, o tendrán datos en el caso de tratarse de la función equivalente del grupo III. En este caso, el atributo “*its_threshold_value*” especificaría el valor de la máxima desviación de la trayectoria de la herramienta permitida que, de ser sobrepasada, provocaría la ejecución del *workplan* definido en el atributo “*its_actions*”.

```

ENTITY get_time SUBTYPE OF (nc_function);
    its_time: nc_variable
END_ENTITY

```

```

ENTITY
start_measuring_maximum_deviation_position_along_toolpath
SUBTYPE OF (nc_function);
    maximum_deviation_value: LIST [0:?] OF
        results_data;
    its_threshold_value: OPTIONAL length_measure;
    its_actions: OPTIONAL workplan;
END_ENTITY

```

La siguiente sección (sección 4) mostrará, a modo de ejemplo, como estas dos funciones son utilizadas en un caso de aplicación para registrar los tiempos de ejecución de un *workingstep* concreto y las desviaciones sobre su *toolpath*.

4. PROTOTIPO DE VALIDACION

Un escenario prototipo ha sido desarrollado para demostrar el funcionamiento práctico de las funciones NC propuestas en la sección anterior. Se ha realizado un sistema de simulación STEP-NC codificado en C++ y bajo MS Visual Studio .NET 2005, utilizando las librerías C++ ROSE STEP proporcionadas por STEP Tools ST-Developer v 11.0 (STEP Tools, 2006), las librerías gráficas Open Cascade (Open CASCADE, 2004) y MS XML API.

Se han realizado tres módulos principales. El primero es un módulo de configuración (A1 en la Figura 6) que genera diseños AP-238 extendidos con las funciones NC de trazabilidad convenientemente insertadas (presentado en la subsección 4.1).

El segundo módulo es un simulador de controlador CNC bajo STEP-NC que es usado para simular la ejecución del fichero extendido AP-238 generado anteriormente (presentado en la subsección 4.2). Finalmente, un tercer módulo ha sido realizada para la visualización y revisión de los datos trazados (presentado en la subsección 4.3).

4.1 Configuración: estableciendo requerimientos en el diseño CAM AP-238

El proceso de configuración permite, básicamente, la selección por parte del diseñador de la información que se quiere monitorizar o registrar, y especificar acciones dependiendo de los valores medidos (por ejemplo, usarlos para acciones de *closed loop*, de análisis de datos, de trazado). Este módulo hace posible identificar y seleccionar de forma gráfica cada una de las *features* de una pieza y sus correspondientes *workingsteps*, y configurar una serie de parámetros para ser monitorizados y registrados durante la ejecución.

El módulo A1 está compuesto de un bloque procesador de diseños (A11 en la Figura 6), y un bloque de configuración y parser (A12 en la Figura 6). El bloque “procesador de diseños” lee e interpreta los ficheros AP-238, creando una estructura equivalente en memoria, que hace posible *insertar* los requerimientos de información (de trazabilidad) directamente sobre los elementos geométricos de la pieza (por ejemplo, establecer funciones de recogida de datos de determinadas *features*). Finalmente, el bloque *parser* traslada estos requerimientos en las funciones NC y estructuras de control correspondientes, insertándolas en el diseño original de AP-238 y generando un AP-238 extendido.

La Figura 7 muestra una pieza de ejemplo tal y como se visualiza en la aplicación de configuración. En el ejemplo se selecciona el tiempo de ejecución y la máxima desviación de las posiciones de la trayectoria de la herramienta a lo largo de la curva de trayectoria 3 (entidad #8157 en la Figura 7) del *workingstep* con identificador #10914. Con esta información de configuración, la aplicación inserta el código correspondiente y genera un AP-238 extendido. En la Figura 5 se muestra la programación de una función *get time* a través de un nuevo bloque de código para recoger el momento de comienzo y finalización del *workingstep*.

En la Figura 5 (arriba), la nueva función (objeto #5361) y los objetos que son necesarios para su inserción en un diseño STEP AP-238, aparecen representados en formato STEP parte 21 (ISO, 2002a), que es la parte de STEP que especifica como los objetos de un diseño se pueden hacer persistentes en un fichero de texto para su intercambio. Sin embargo, se puede ver que los nombres de los objetos no se corresponden exactamente con los definidos en la Figura 4.

Esto es debido a que el modelo de funciones de la Figura 4 es un modelo de alto nivel, orientado a personas, también llamado ARM (*Application Referente Model*). Sin embargo, para su procesado electrónico conforme con la metodología de integración de protocolos STEP, tiene que ser transformado en un modelo de bajo nivel que utilice recursos comunes definidos por el estándar, llamado AIM (*Application Interpreted Model*). El paso de un modelo a otro se realiza mediante un proceso que consiste en hacer un *mapping* entre cada entidad ARM hacia entidades AIM predefinidas y compartidas por varios AP's.

La Figure 5 (abajo) muestra el mecanismo de *mapping* propuesto que sigue las pautas de otras funciones NC ya presentes dentro del estándar, y que se hacen explícitos en unas *tablas de mapping* (mecanismo establecido todos los APs STEP).

```

/*Application object:
NC_MACHINING_FUNCTION(#5360,5361) ITS_WORKINGSTEP:
#3986, #5360 ITS_RECORDED_VALUES: #5370, #5371*/

#5360=ACTION_METHOD_RELATIONSHIP('data_collection',
'link for data collection functions', #5361,#3986);

#5361=MACHINING_NC_FUNCTION('get_time',
'workingStep time recording',$, $);

#5362=(GEOMETRIC_REPRESENTATION_CONTEXT(0)
GLOBAL_UNIT_ASSIGNED_CONTEXT($)
REPRESENTATION_CONTEXT('units_data_recording -
TIME', $));

#5363=ACTION_PROPERTY_REPRESENTATION('execution_time_
measurement',
'WS 2 time data collection',#5364,#5365);

#5364=ACTION_PROPERTY('measured
values','workingstep execution times',#5361);

#5365=REPRESENTATION('WS 3
traceability', (#5370,#5371),#5362);
/*Application object: NC_VARIABLE(#5370)
ITS_WORKINGSTEP: WS 4 start time
ITS_INITIAL VALUE: #5370, #5371, */

#5370=(
EXPRESSION()
EXPRESSION_REPRESENTATION_ITEM()
GENERIC_EXPRESSION()
GENERIC_VARIABLE()
NUMERIC_EXPRESSION()
NUMERIC_VARIABLE()
REAL_NUMERIC_VARIABLE()
REPRESENTATION_ITEM('WS 2 start Time')
SIMPLE_GENERIC_EXPRESSION()
SIMPLE_NUMERIC_EXPRESSION()
VARIABLE());

#5371=REPRESENTATION_ITEM_RELATIONSHIP
('WS4','simple nc_variable', 5370,$)

```

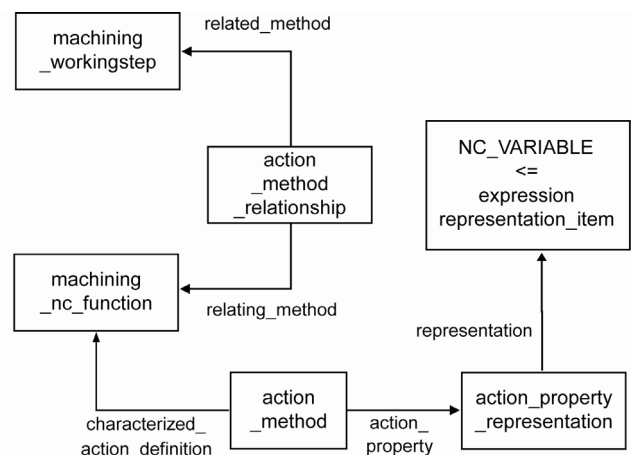


Figura 5. Extracto de código (arriba) utilizando el modelo AIM propuesto para nuevas funciones NC (abajo).

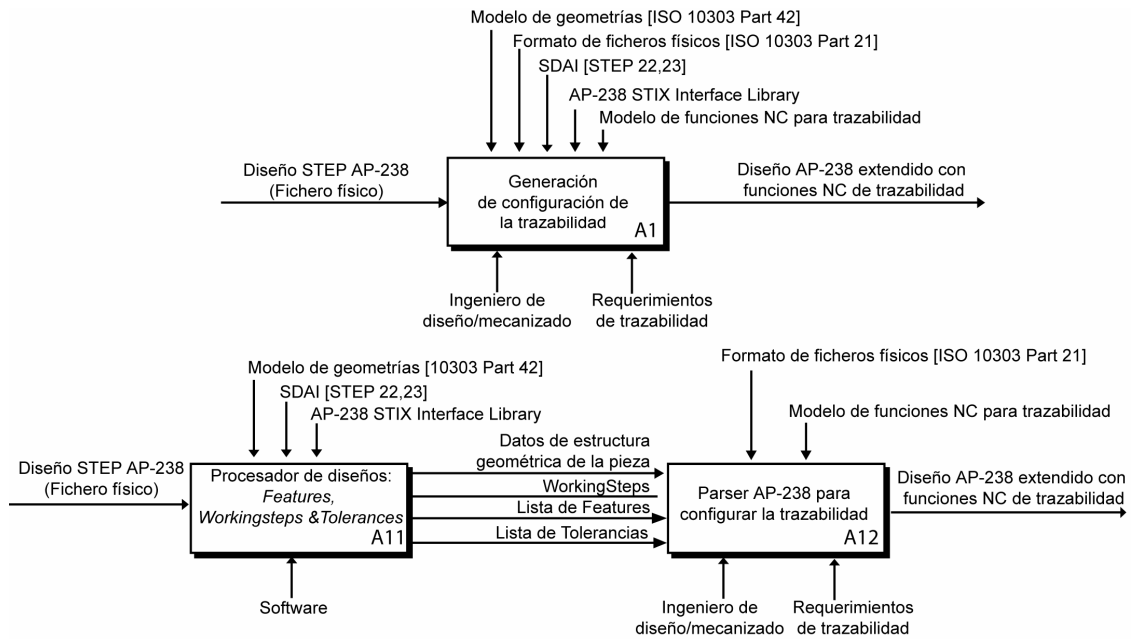


Figura 6. Módulo configuración.

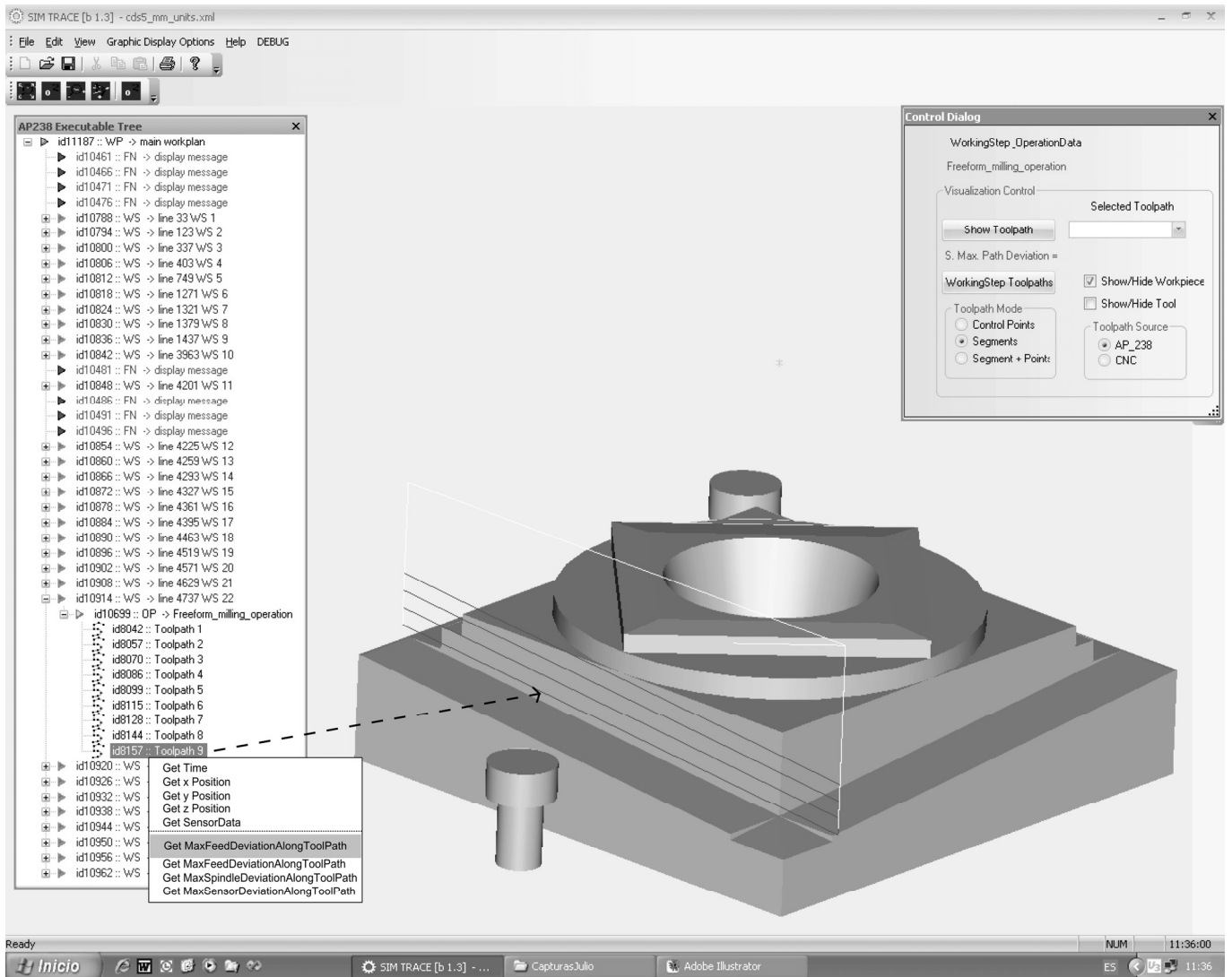


Figura 7. Aplicación de configuración.

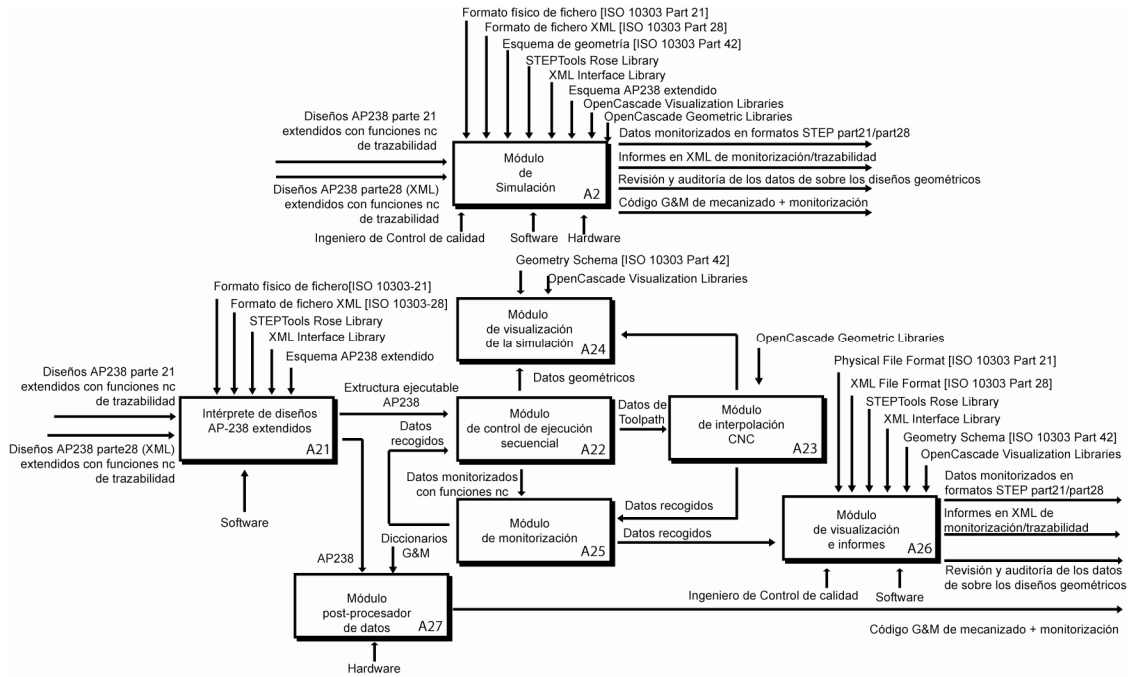


Figura 8. Módulo de simulación.

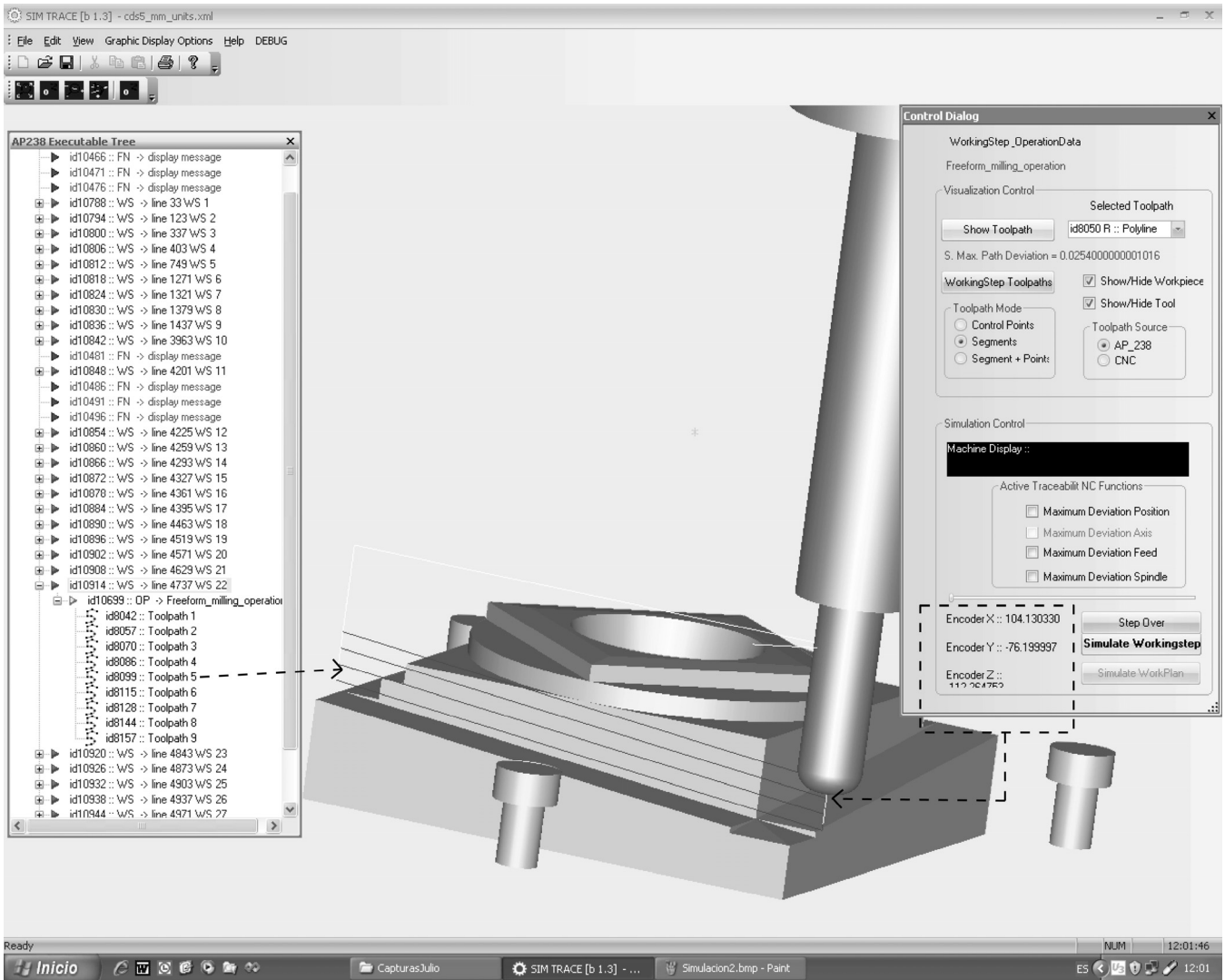


Figura 9. Aplicación de simulación de proceso de mecanizado STEP-NC y trazabilidad.

4.2 Simulación de ejecución de un AP-238 y del acceso a datos

Código como el anterior es insertado en los ficheros AP-238 originales para generar nuevos ficheros AP-238 extendidos con capacidades de acceso a datos de proceso. Estos ficheros extendidos son leídos por un módulo simulador de ejecución de programas STEP-NC (módulo A2 de la Figura 8). El simulador examina y chequea la estructura del ejecutable del AP-238 y simula la realización de las tareas paso a paso. La estructura del módulo se representa en la Figura 8. El módulo A21 interpreta el fichero AP-238 extendido y extrae la estructura del programa ejecutable, que es utilizada por el módulo A22 para realizar la simulación del mecanizado, tal como representa la Figura 9. El módulo A23 simula la interpolación de la trayectoria de la herramienta del CNC. Estos datos son usados por el módulo A24 para la representación gráfica de la simulación y por el módulo A25 responsable de los procesos de trazabilidad.

La Figura 9 muestra la ejecución del simulador para el ejemplo en donde, al mismo tiempo que se simula la realización del mecanizado, se llevan a cabo las tareas de acceso a datos especificadas. Cuando el simulador encuentra la función *get_time*, captura el momento actual y actualiza el valor en una variable (*nc_variable*) asociada a la función.

Además del tiempo, la simulación del ejemplo realiza la medida de la máxima desviación de la trayectoria de la herramienta en los segmentos del *tool path* de cada uno de los *workingsteps* seleccionados. El algoritmo de cálculo de las desviaciones (funciones NC del bloque II) sería particular a cada sistema CNC y caería fuera del ámbito de este artículo. Para la realización de la simulación, el módulo A25 implementa un algoritmo que trabaja en una serie de puntos de control seleccionados sobre cada segmento de una trayectoria de herramienta. Con estos puntos de control y con la lectura de la posición actual de la herramienta (de los *encoders* de la máquina simulados por el módulo A23), se puede calcular la desviación de la trayectoria de la herramienta (*deviation error* en la Figura 10).

El algoritmo utilizado (1) calcula los puntos proyección p_i (*projected points* en la Figura 10) de los puntos de toma de medidas q_i (*measured points* en la Figura 10) a lo largo de la trayectoria.

$$\epsilon_i = p_i T_{CM}^{ref} - q_i T_{CNC}^{ref} \quad i = 1, n \quad (1)$$

donde:

$$T_{CNC}^{ref} \text{ y } T_{CM}^{ref}$$

son matrices homogéneas de transformación para referir ambos puntos al mismo sistema de coordenadas. Comparando estos valores a través de la ecuación 1 se obtiene un vector de estimaciones de la desviación o error. Estos valores se guardan para calcular la máxima de las desviaciones para cada segmento de trayectoria de la herramienta (*toolpath*). Cuando se completa el recorrido de la herramienta, estos valores son transferidos a una estructura de datos *bounded curve* (una lista de valores máximos de desviaciones) con la misma parametrización, en términos de puntos de comienzo y final, que la trayectoria de la herramienta.

4.3 Explotación de datos: closed loop y trazabilidad

Los datos registrados pueden utilizarse durante el proceso para apoyar operaciones de *closed loop* o bien pueden ser almacenados para trazabilidad o análisis del proceso fuera de línea, una vez finalizado. La Figura 11 muestra un ejemplo de visualización de los datos recogidos (correspondientes a la desviación de la trayectoria de herramienta “*tool path deviation*” de un *workingstep*). La Figura muestra como es posible seleccionar, en la estructura del ejecutable del programa CNC, un *workingstep*, que se representan en la pantalla gráfica, en donde es posible acceder a cada uno de sus segmentos por separado y visualizar los valores registrados. El enlace implícito entre los datos recogidos, y los datos de *feature* compartidos por las aplicaciones CAD/CAM/CNC, aporta significado a dichos datos y hace posible que sean interpretables por sistemas distintos del de fabricación (CNC). Por ejemplo, es lo que permite visualizar y asociar los datos recogidos a representaciones de *features* en una aplicación CAM.

Las mismas aplicaciones CAD y CAM que, convenientemente modificadas, han servido previamente para configurar sobre los diseños gráficos los requerimientos de acceso a datos, pueden servir ahora para visualizar y auditar, sobre los mismos diseños gráficos, los valores trazados de forma automática (Figura 11). Esto resalta el hecho de que los datos accedidos en planta pueden ser entendidos y procesados dado que mantienen la misma estructura de datos que la del proceso de mecanizado que representan, que sigue un modelo estándar: el ISO 10303:AP-238.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El acceso a variables del proceso de mecanizado y su registro “local”, es una práctica común en las tecnologías propietarias de CNC actuales. El artículo ha mostrado como el acceso a datos y la trazabilidad basada en características de fabricación (*features*) puede ser eficientemente integrada con otros procesos en entornos CAD/CAM/CNC disgregados sobre el estándar ISO STEP.

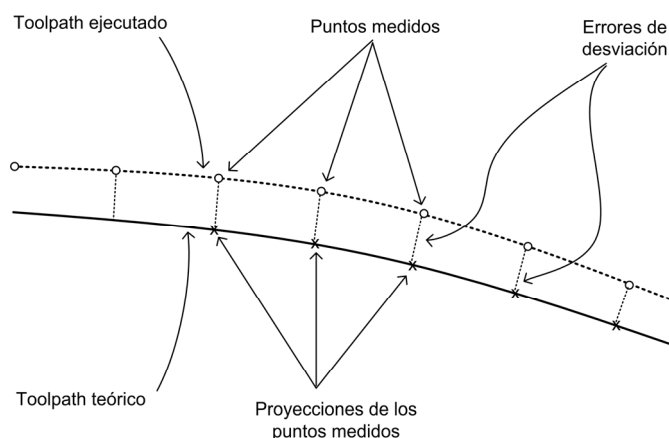


Figura 10. Puntos de ejecución del algoritmo para el cálculo de la desviación de la trayectoria de la herramienta

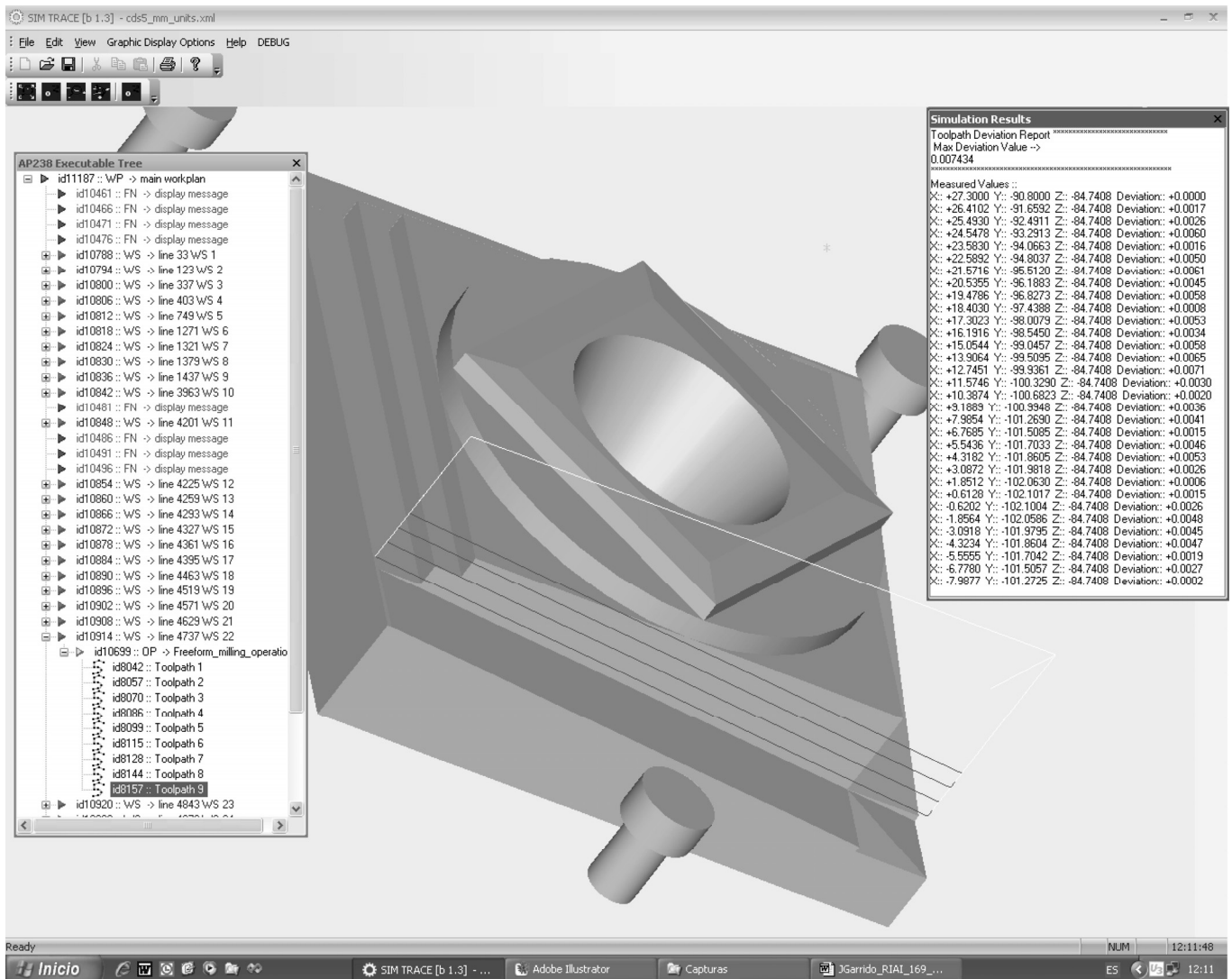


Figura 11. Visualización de datos correspondientes a la desviación de la trayectoria de la herramienta en los segmentos del *tool path* de los *workingsteps* de una *feature*.

La definición de funciones NC estándar de trazabilidad proporcionaría la posibilidad de la “automatización” de actividades de trazabilidad, y esta “automatización” garantiza la calidad de los datos. Esto es, con el mecanismo propuesto de funciones NC para trazabilidad se posibilita:

- Automatizar la comunicación de requerimientos de trazabilidad a la planta, y su interpretación automática por parte de las máquinas. No siempre es necesario ni deseable recolectar datos de fabricación acerca de todas las *features* de la pieza dado que los errores más críticos se pueden encontrar chequeando un grupo selecto de estas. Con la propuesta, los controladores CNC pueden interpretar los comandos STEP-NC de trazabilidad y ejecutar de forma automática la trazabilidad en el momento en que las *features* críticas están siendo mecanizadas.
- Automatizar el proceso de acceso a datos durante la fase de fabricación, lo que trae consigo la veracidad de estos datos y la futura confianza sobre los mecanismos que, en su día, se hubiesen empleado para dicha recolección, dado que los

datos de trazabilidad pueden querer ser revisados varios años después de la fabricación, cuando pueda haber incluso desaparecido la planta donde se hayan originado.

- Por último, y no menos importante, la automatización de las tareas de revisión y análisis de los datos. La información de trazabilidad tiene un significado intrínseco (“entendible” automáticamente) ya que está relacionada con una especificación *estándar* del proceso de mecanizado: el AP-238. Por ello, los datos podrán ser correctamente interpretados por entidades ajenas a la del de origen de los mismos.

También se posibilita, con el mecanismo de funciones NC propuestos, la realización de procesos de fabricación más eficientes. Así por ejemplo, con estas funciones sería posible preseleccionar las *features* candidatas a ser inspeccionadas por un proceso de *close loop* mediante palpadores, en base a los datos recogidos a través de dichas funciones. Como resultado, solamente las *features* sospechosas serían inspeccionadas.

Las funciones NC de trazabilidad han sido presentadas al comité

ISO TC184/SC4 WG3 T24, que es el responsable del desarrollo de las partes de STEP relacionados con datos de fabricación. El autor del artículo, como miembro de dicho comité en calidad de delegado nacional, ha sido el encargado de liderar las iniciativas del comité en cuanto a trazabilidad. Las funciones propuestas, o las resultantes de estas después de una fase de prueba y discusión, están siendo formalmente consideradas para su inclusión en la siguiente edición del AP-238 (edición 2).

En su propuesta actual, y en consonancia con el nivel actual de desarrollo de las implementaciones de STEP-NC, las funciones NC de trazabilidad están pensadas para monitorizar acciones que tienen un *tool path* explícito en los fichero AP-238. Sin embargo, tendrá que ser abordado como trabajo futuro, aquellos diseños AP-238 sin *tool path* explícito, donde el controlador decide su propio *tool path* basado en información de *features* de un fichero AP-238. Para abordar esta situación, se definirán extensiones al estándar para el trazado de operaciones semánticas (por ejemplo, el fresado de una cavidad).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está siendo financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto DPI2006-05772.

REFERENCIAS

- Albert M. (2000). STEP NC - The end of G-codes?. *Modern Machine Shop*, pp. 70-80.
- Brecher C., Vittr M. and Wolf J. (2006). Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **19(6)**, 570-581.
- Chen L., Song Z. and Feng L. (2003). Internet-enabled real-time collaborative assembly modelling via an e-Assembly system: status and promise. *Computer-Aided Design*, **36**, pp. 835-47.
- Eastec (2005). Eastec demo walkthrough. On-line, accedido en Febrero 2007: <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/stepnc>.
- Fichtner D., Nester A., Dang N., Scgulze A., Carlsen U., Schreiber S. and Klemm P. (2006). Use of agents and neural networks for acquisition and preparation of distributed NC information to support NC planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **19(6)**, pp. 581-92.
- Garrido J. and Hardwick M. (2006). A traceability information model for CNC manufacturing. *Computer-Aided Design*, **38**, pp. 540-551.
- Hardwick M. and Loffredo D. (2001). STEP into NC. *Manufacturing Engineering*, **126**, pp. 38-50.
- Hardwick M. (2004). On STEP-NC and the complexities of product data integration. *ACM/ASME Transactions on Computer and Information in Science Engineering*, **4**, pp. 60-67.
- Hardwick M. and Loffredo D. (2006). Lessons learned implementing STEP-NC AP-238. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **19(6)**, pp. 523-533.
- IMS (2001). IMS project 97006 (STEP-NC). STEP_NC STEP-compliant data Interface for numerical controls. On-line, accedido en Febrero 2007: http://www.ims.org/projects/project_info/step_nc.html.
- ISO (1982). Numerical control of machines - program format and definition of address words - Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems, ISO TC 184/SC 1, Geneva, Switzerland.
- ISO (1994a). ISO 10303-1:1994. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 1: overview and fundamentals principles. ISO TC 184/SC 4, Geneva, Switzerland.
- ISO (1994b). ISO 10303-11:1994. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 11: description methods: the EXPRESS language reference manual. ISO TC 184/SC 4, Geneva, Switzerland.
- ISO (2002a). ISO 10303-21:2002. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 21: implementation methods: clear text encoding for the exchange structure. ISO TC 184/SC 4, Geneva, Switzerland.
- ISO (2002b). ISO 10303-238:2002. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 238: application protocol: application interpreted model for computerized numerical controllers. ISO TC 184/SC 4, Geneva, Switzerland.
- ISO (2003). ISO 14649-1. Industrial automation systems and integration - Physical device control - Data model for computerized numerical controllers - Part 1: Overview and fundamental principles, Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation.
- ISO (2004). ISO 14649-11. Industrial automation systems and integration - Physical device control - Data model for computerized numerical controllers - Part 11: Process data for milling, Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation.
- ISO (2005). ISO 14649-12. Industrial automation systems and integration - Physical device control - Data model for computerized numerical controllers - Part 12: Process data for turning, Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation.
- Jansen-Vullers, M.H., Dorp, C.A. and Beulens, A.J.M. (2003) Managing traceability information in manufacture, *International Journal of Information Management*, **23(5)**, pp. 395-413.
- Li W.D., Lu W.F., Fuh J.Y.H. and Wong Y.S. (2005). Collaborative computer-aided design - research and development status. *Computer-Aided Design*, **37(9)**, pp. 931-40.
- Newman, S.T., Nassehi, A., Xu, X.W., Rosso, R.S.U., Wang, L., Yusof, Y., Ali, L., Liu, R., Zheng, L.Y., Kumar, S., Vichare, P. and Dhokia, V., (2008). Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **24**, pp. 699 - 708.
- OMAC (2005). STEP-NC pilot demonstration. OMAC STEP-NC working group meeting. On-line, accedido en Febrero 2007: www.isd.mel.nist.gov/projects/stepnc/omac-orlando-2005/pilot-scenario.pdf.
- Open CASCADE, (2004). Technical overview 4/2002. On-line, accedido en Julio 2007: www.opencascade.org.
- Simchi-Levi D., Kaminsky P. and Simchi-Levi E. (2003). Designing and management the supply chain, Editorial: McGraw-Hill, Irwin, New York, NY.
- STEP Tools (2006). ST-Developer on line manuals. On-line, accedido en Febrero 2007: http://www.steptools.com/Support/stdev_docs/.
- Suh S.H., Cho J.H. and Hong H.D. (2002). On the architecture of intelligent STEP-compliant CNC. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **15(6)**, pp. 168-177.

- Weck M., Wolf J. and Kristis D. (2001). STEP-NC: the STEP compliant NC programming interface: evaluation and improvement of the modern interface. International IMS Forum. Ascona, Switzerland.
- Wosnik M., Kramer C., Selig A. and Klemm P. (2006). STEP-NC for integrated and Distributed Manufacturing Processes: Enabling feedback of process data by use of STEP-NC. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **19(6)**, pp. 559-570.
- Xu X.W. and He Q. (2004). Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **20(2)**, pp. 101-109.
- Xu X.W. (2006). Realization of STEP-NC enabled machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **22(2)**, pp. 144-153.
- Zhang C., Liu R. and Hu T. (2006). On the futuristic machine control in a STEP-compliant manufacturing scenario. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **19(6)**, pp. 508-516.