

## THE BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT

This journal offers immediate free access to its content, following the principle that providing free scientific knowledge to the public provides greater global democratization of knowledge. The authors are advised to make their articles available in institutional databases and repositories. Fonte: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/about>. Acesso em: 05 ago. 2022.

## REFERÊNCIA

JAMES, Cristhian Ivan Riaño et al. Método para implementación de inspección dimensional y geométrica en un lazo cerrado de manufactura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.6, p. 45811-45829, jun.,2022. DOI 10.34117/bjdv8n6-210. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/49290/0>. Acesso em: 05 ago. 2022.

## **Método para implementación de inspección dimensional y geométrica en un lazo cerrado de manufactura**

## **Método para implementação de inspeção dimensional e geométrica num circuito fechado de fabrico**

DOI:10.34117/bjdv8n6-210

Recebimento dos originais: 21/04/2022

Aceitação para publicação: 31/05/2022

### **Cristhian Ivan Riaño James**

Doutorado

Institución: Universidade de Brasilia

Dirección: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

CEP: 70910-900, Caixa Postal: 04386

Correo electrónico: cristhian.riano@unipamplona.edu.co

### **Renan Bonnard**

Doutorado

Institución: (SENAI – SC)

Dirección: (SENAI – SC), Florianópolis, Brazil

Correo electrónico: renan.bonnard@sc.senai.br

### **Julio Benavente Ticona**

Doutorado

Institución: Universidade Federal de Santa Catarina

Dirección: Departamento de Engenharia Mecânica, GRIMA, Florianópolis, Brazil

Correo electrónico: metrojulio@yahoo.es

### **João Carlos Espindola Ferreira**

Doutorado

Institución: Universidade Federal de Santa Catarina

Dirección: Departamento de Engenharia Mecânica, GRIMA, Florianópolis, Brazil

Correo electrónico: j.c.ferreira@ufsc.br

### **Alberto José Álvares**

Doutorado

Institución: Universidade de Brasilia

Dirección: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil

CEP: 70910-900, Caixa Postal: 04386

Correo electrónico: alvares@AlvaresTech.com

## **RESUMEN**

Avances en la manufactura han promovido progresos en diferentes áreas como aeronáutica, robótica y producción, pero existen cuestiones relevantes que impiden estar a la vanguardia en materia de integración. Para atender los desafíos que propone la cuarta revolución industrial, la manufactura necesita de cambios en el manejo y tratamiento de la información. En este artículo se expone un método para implementar un sistema integrado CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI (Diseño, Planeamiento de procesos,

Planeamiento de inspección, Manufactura e Inspección asistidas por computador) adherente al estándar ISO 10303. Los recursos integrados en los protocolos de aplicación AP238 y AP219 son usados para soportar el lazo cerrado de manufactura y retroalimentar los resultados de inspección. El flujo de información y las actividades funcionales requeridas para la integración son expuestas con el modelo funcional AAM (Application Activity Model) y modelo de referencia ARM (Application Reference Model) creados en IDEF0 (Integration DEFinition language 0) y lenguaje EXPRESS. El artículo define el camino para integrar el sistema de manufactura e inspección en lazo cerrado.

**Palabras clave:** industria 4.0, inspección asistida por computador (CAI), planeamiento de inspección asistida por computador (CAIP), STEP-NC.

## RESUMO

Os avanços no fabrico têm promovido progressos em diferentes áreas como a aeronáutica, robótica e produção, mas há questões relevantes que impedem estar na vanguarda da integração. Para responder aos desafios da quarta revolução industrial, o fabrico necessita de mudanças no tratamento e processamento da informação. Este artigo apresenta um método de implementação de um sistema integrado CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI (Computer Aided Design, Process Planning, Inspection Planning, Computer Aided Manufacturing and Inspection) aderindo à norma ISO 10303. Os recursos integrados nos protocolos de aplicação AP238 e AP219 são utilizados para apoiar o fabrico em circuito fechado e os resultados da inspeção de feedback. O fluxo de informação e as actividades funcionais necessárias para a integração são expostas com o modelo funcional AAM (Application Activity Model) e o modelo de referência ARM (Application Reference Model) criados no IDEF0 (Integration DEFinition language 0) e na linguagem EXPRESS. O artigo define a forma de integrar o sistema de fabrico e inspeção em circuito fechado.

**Palavras-chave:** indústria 4.0, inspeção assistida por computador (CAI), planeamento da inspeção assistida por computador (CAIP), STEP-NC.

## 1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de procesos cada vez más eficientes e sustentables propone nuevos desafíos que requieren de grandes cambios dentro del ambiente de fabricación. En el contexto de interoperabilidad, la manufactura avanzada evidencia vacíos y cuestiones aún sin resolver que se convierten en barreras para la inclusión de nuevas tecnologías emergentes (Mario, Tobias, & Boris, 2015). Las tecnologías digitales usadas dentro del contexto de industria 4.0, permiten controlar, monitorear, analizar y optimizar los procesos. Para conducir la manufactura hacia este enfoque de industria digital, es necesario integrar la información de todos los procesos involucrados en el desarrollo de una pieza, así como generar nuevas estrategias el control de flujo de información que brinden soluciones a las actuales limitaciones de integración de procesos que presenta la industria (Danjou, Le Duigou, & Eynard, 2015).

Los sistemas de manufactura en lazo cerrado (CLM) son considerados un método para optimización del proceso de fabricación, basado en el análisis de resultados de inspección y de condición de operación de las maquinas herramienta. En los sistemas de lazo cerrado se comparte a través de una arquitectura, la información de las distintas fases del proceso como lo son CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI (Diseño, Planeamiento de Procesos, Manufactura e Inspección asistida por computador) (Majstorovic, Sibalija, Ercevic, & Ercevic, 2014). La inspección dimensional desempeña un papel importante en el control de calidad de un producto, pero dentro de un lazo cerrado los alcances de la medición son superiores, permitiendo no solo tomar decisiones para compensar el error de fabricación sino también la detección de las posibles fallas, consiguiendo perfeccionar el proceso en cada retroalimentación.

El estándar ISO 10303 también conocido como STEP (*Standard for the Exchange of Product model data*) proporciona un mecanismo para estructurar la información dentro de una arquitectura para el lazo cerrado (Pratt, 2005). El estándar define los principios básicos de la representación de datos y el intercambio de información utilizados en la norma ISO10303. La tecnología de modelado de piezas basada en *features*, es considerada el principal componente de integración entre los procesos asociados al ciclo de vida de producción de una pieza. El estándar STEP basado en *features* proporciona un formato neutral, para definición de datos de producto e intercambiar información entre procesos (Bhandarkar & Nagi, 2000).

En este artículo se presenta un modelo de integración en lazo cerrado para retroalimentar los resultados de inspección dimensional basada en el estándar ISO 10303. Con este modelo se brinda una arquitectura alternativa para el manejo de información proporcionando integración e interoperabilidad a través de tecnologías digitales.

## **2 INTEGRACIÓN BASADA EN EL ESTÁNDAR STEP**

Se observa una tendencia creciente en el uso del estándar STEP para compartir la información de producto entre sistemas. Existen gran cantidad de trabajos relacionados con manufactura en lazo cerrado que describen las barreras de comunicación encontradas en la integración de manufactura e inspección (Brecher, Vitr, & Wolf, 2006). En esta sección se mencionan algunos trabajos relacionados con el manejo de datos soportados por STEP-NC que permiten formar un conocimiento sobre las bases fundamentales para la integración de CAD/CAPP/CAIP/CAM/CAI/CNC.

Po Hu, propone e implementa un CLM basado en un controlador abierto CNC y STEP-NC para realizar mecanizado en línea y tiempo real. La arquitectura de CLM es construida con las actividades funcionales de diseño, planeación y manufactura asistida por computador, incluyendo mecanismos para información e interoperación (Po, Hongya, Zhenyu, & Dedong, 2014).

X.W. Xu, presenta una recopilación de información sobre la integración e intercambios de datos en sistemas de manufactura tomando como referencia el estándar ISO 6983; mostrando las razones que promovieron y permitieron el surgimiento del estándar STEP y la evidente necesidad que la industria manufacturera presentaba por carecer de un estándar neutro con las características de STEP para promover su evolución (Xu & He, 2004).

Christophe Danjou, enfoca su investigación en crear una propuesta basada en modelo OntoSTEP-NC para la configuración de lazo de manufactura basado en sistemas PLM. El objetivo principal es gestionar el conocimiento para el mecanizado CNC en los sistemas CAM con la función de ayudar al programador CAM en hacer cambios para planeación de nuevas secuencias, buscando la retroalimentación de sistemas CNC para sistemas CAM. Considera importante integrar la información del reconocimiento de características con el conocimiento y razonamiento obtenido en operaciones de manufactura (Danjou, Le Duigou, & Eynard, 2015).

Raphaël Laguionie, describe una propuesta para programación de trayectorias con la creación de un patrón repetitivo a lo largo de una curva guía. La integración de estrategias de patrones en el estándar STEP-NC impulsa al desarrollo de nuevas estrategias con mejores rendimientos y genera nuevas posibilidades para STEP-NC. Una cadena numérica completa soportada por STEP-NC y herramientas creadas para trabajar en el ciclo completo de manufactura permitió la integración de estos patrones dentro del contexto de manufactura inteligente. Varios casos de aplicación fueron experimentados en máquinas herramienta para validar este enfoque y la eficiencia de las herramientas desarrolladas (Laguionie, Rauch, & Hascoët, 2009).

X. W. XU, presenta una revisión comprensiva de desarrollos STEP-NC para un rango de procesos CNC. Incluye proyectos con importantes contribuciones a nivel internacional realizados por diferentes grupos de investigación. Muestra una visión y perspectivas de aplicaciones STEP-NC para integración CAD/CAPP/CAM/CNC. Formula algunas cuestiones y desafíos donde provee un enfoque de cadena de proceso

compatible con STEP-NC soportada para modelo de manufactura de producto (Xu\*, et al., 2005).

Fiona Zhao, proporciona un modelo de datos STEP-NC para una línea de inspección dentro de una estructura de datos STEP-NC que permite mecanizado en lazo cerrado. En la investigación el propósito principal es conseguir una cadena cerrada CAD/CAPP/CAM/CAI. Desarrollan un nuevo interpretador para implementar la estructura de datos propuesta y validarla con un caso de estudio (Zhao Y. F., 2012).

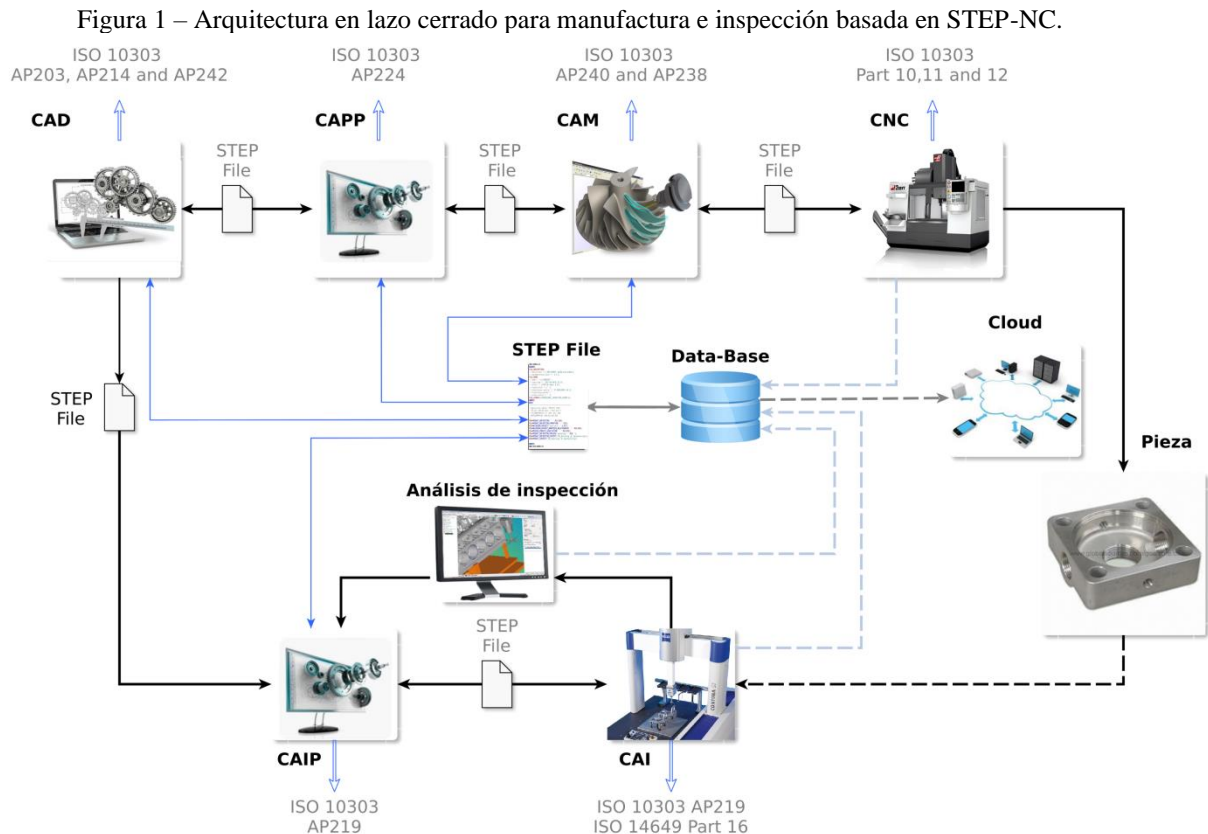
### **3 ARQUITECTURA DEL MODELO EN LAZO CERRADO DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA E INSPECCIÓN BASADO EN STEP-NC**

En los sistemas de manufactura convencionales, las trayectorias de herramienta son generadas por plataformas CAM partiendo de un prototipo virtual CAD y son compactadas en un archivo de control numérico computarizado (NC) para un posterior procesamiento (Huiying, 2014). El controlador numérico computarizado y la máquina de medición de coordenadas ejecutan el archivo de programa NC sin que exista la posibilidad de adaptar o corregir el archivo para enfrentar cambios producidos en el entorno de fabricación. En estos sistemas convencionales además de tener una comunicación unidireccional, presentan pérdida de información e incompatibilidad con tecnologías de propietarios, impidiendo la completa integración y la interoperabilidad del sistema (Zhao, Kramer, Brown, & Xu, 2011).

En la Figura 1 se presenta la arquitectura propuesta para crear un lazo cerrado de manufactura integrada con resultados de inspección adherente al estándar STEP-NC.

En el lazo cerrado de manufactura e inspección, el proceso inicia con un modelo CAD que codifica la información de la pieza en un formato ya normalizado por medio de los protocolos de aplicación ISO 10303-203,214 y 242 (Fiona, Xun, & Shane, 2005). Las características geométricas, dimensionales, tolerancias y datos de la pieza son extraídas posteriormente usando el protocolo de aplicación ISO 10303-224, que contiene las definiciones de requerimiento de información usadas en el planeamiento de proceso. Los sistemas CAPP/CAM/CAI utilizan una secuencia de operaciones normalizadas para mecanizado e inspección basados en los protocolos ISO10303-240,238 y 219. El objetivo en el planeamiento es determinar los valores óptimos para los parámetros de proceso de mecanizado e inspección relacionados con la selección de herramientas, material, sensores, trayectorias e intercambio de información de inspección dentro del lazo de manufactura.

La información generada en cada una de las fases del ciclo de vida de fabricación de un producto se puede almacenar, compartir y comparar con una base de conocimiento. El estándar proporciona las entidades para crear una implementación computacional y desarrollar modelos completamente integrados e interoperables, lo que facilita atender las demandas que el nuevo enfoque industria 4.0 requiere (Lee, Bagheri, & Kao, 2015) (Newman, et al., 2008).



### 3.1 FLUJO DE DATOS PARA LAZO CERRADO DE MANUFACTURA E INSPECCIÓN

Los datos de diseño, operación y resultados de inspección, se integran dentro de una estructura para construir el flujo de información bidireccional. El flujo de información en el sistema en lazo cerrado contiene información de cuatro actividades funcionales que son: 1. Diseño y creación de piezas, 2. Integración y planeación de procesos, 3. Control de procesos y mecanizado e inspección. 4. Gestión del Conocimiento. Los datos de salida en cada actividad funcional deben ser codificados en un formato neutral, que permita ser integrados con otras informaciones generadas en el sistema. Los datos para el control de mecanizado e inspección son definidas dentro de este mismo formato, los cuales pueden

ser interpretados directamente por el controlador evitando el post-procesamiento (Jr & Newman, 2003).

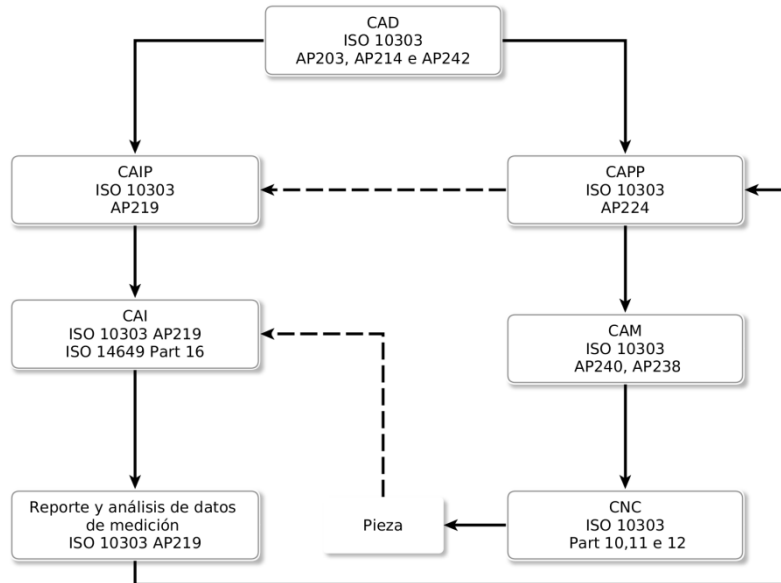
En los sistemas CAM y CAI la información es retroalimentada para las actividades funcionales previas y usadas para ajustar el proceso de forma continua y promover la generación de conocimiento que permita optimizar el proceso de manufactura.

Existen varias estructuras para transferencia de datos en cada sistema, esta diversidad de formatos representan barreras en la integración ya que conducen a separar y fragmentan el flujo de información. El diseño de piezas es usualmente ejecutado en plataformas CAD comerciales donde sus formatos por defecto son incompatibles con tecnologías de propietarios y el intercambio usando formatos de datos neutrales como IGES, PDE, SET, VDA FS puede generar pérdidas de información. Los planes de proceso de mecanizado son generados por plataformas CAM focalizadas en generación de trayectorias de herramienta y condiciones de mecanizado, ignorando gran información de alto nivel acerca de la pieza. Las trayectorias de herramienta generadas, precisan de post-procesamiento. Los planes de proceso de inspección son administrados por interfaces de medición DMIS (*Dimensional Measuring Interface Standard*) que definen un lenguaje neutral de comunicación entre sistemas de información y equipos de medición dimensional. El modelo de datos STEP adoptado para integración de datos, unifica toda la información de estos sistemas, bajo una misma estructura que soporta todo el ciclo de vida de fabricación de la pieza.

Es importante destacar que emplear un sistema estandarizado para el intercambio y flujo de información como el propuesto, basado en el estándar ISO 10303 permitirá la comunicación bidireccional, integración con tecnologías digitales y compatibilidad con diferentes sistemas.



Figura 2 – Flujo de datos basado en STEP/STEP-NC



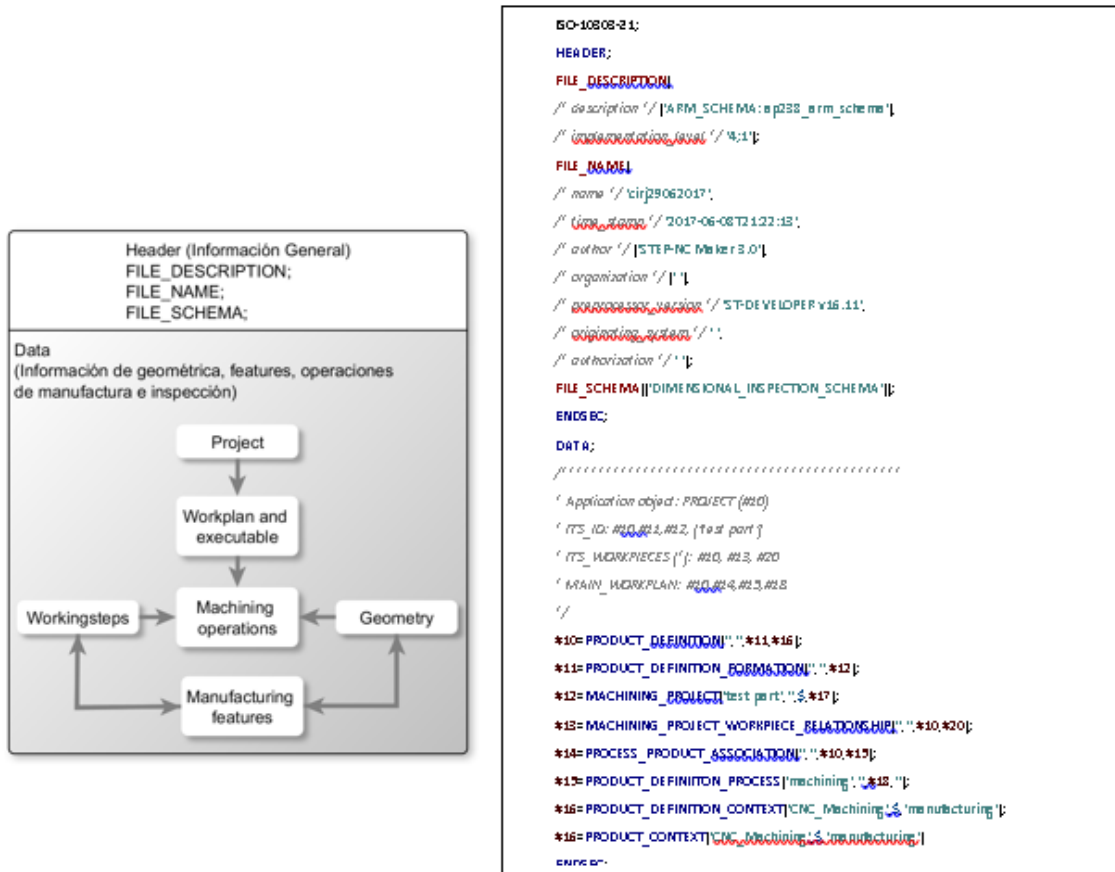
La elección del estándar STEP como estructura de datos para el modelo de integración en lazo cerrado de manufactura e inspección es justificada por el soporte que ofrece para requerimientos de información en cada sistema. En la

Figura 2 se presenta en un esquema el flujo de datos en lazo cerrado y los recursos del estándar que respaldan cada sistema.

### 3.2 ESTRUCTURA DEL FORMATO NEUTRAL PARA INTERCAMBIO E INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una de las principales ventajas del formato de datos STEP-NC es que ofrece un programa para ejecución orientado a objetos en términos de *features*, que evita las secuencias de funciones con código directo como están definidas en la norma ISO 6983. Los objetos en este formato son características de manufactura (*features of manufacturing*) asociadas a operaciones o datos del proceso.

Figura 3 – Estructura de un archivo STEP ( ISO 10303-21)



El formato neutral STEP-NC es descrito en un archivo acorde al estándar ISO 10303-21 que contiene dos secciones encabezado (*Header*) y datos de proceso (*Data*).

La

Figura 3 muestra la estructura interna de un programa STEP p21 junto con una extracción de código de un archivo (Majstorovic, Sibalija, Ercevic, & Ercevic, 2014).

La sección *Header* contiene información general y comentarios sobre el programa. La sección *Data* contiene información de operaciones, geometrías, dimensiones y tolerancias.

El archivo codificado según la estructura presentada en la

Figura 3 es la base de transferencia de información dentro del lazo cerrado de manufactura e inspección del modelo. La información contenida en este archivo es accedida de forma paralela en cada una de las fases que recorre la pieza en el ciclo de vida de fabricación. Al final del proceso el archivo puede contener información tanto de proceso de mecanizado como resultados de inspección, útiles para generar acciones correctivas.

#### **4 MODELO DE INTEGRACIÓN EN LAZO CERRADO PARA INSPECCIÓN DIMENSIONAL Y GEOMÉTRICA**

Para exponer el modelo propuesto de integración de inspección dimensional y geométrica es creado un modelo AAM (*Application Activity Model*) en IDEF0 (*Integration Definition for Function Modeling*). Las funciones requeridas para realizar inspección dimensional y geométrica están estructuradas dentro de planeamiento e inspección asistida por computador CAIP/CAI y son integradas en el sistema *STEP Modeler*, sistema desarrollado en la Universidad Federal de Santa Catarina (Benavente, Ferreira, Goulart, & Oliveira, 2013).

Con la integración de inspección dimensional y geométrica en lazo cerrado se consigue determinar los parámetros requeridos para planear y ejecutar la medición de piezas, determinar el valor del error e incertidumbre de la medición, comparar los datos de inspección obtenidos con el modelo nominal proyectado, identificar causas posibles del error, compensar el error sobre el archivo de intercambio p21 que se ejecuta en la maquina CNC y finalmente compartir y almacenar los resultados del proceso.

En la

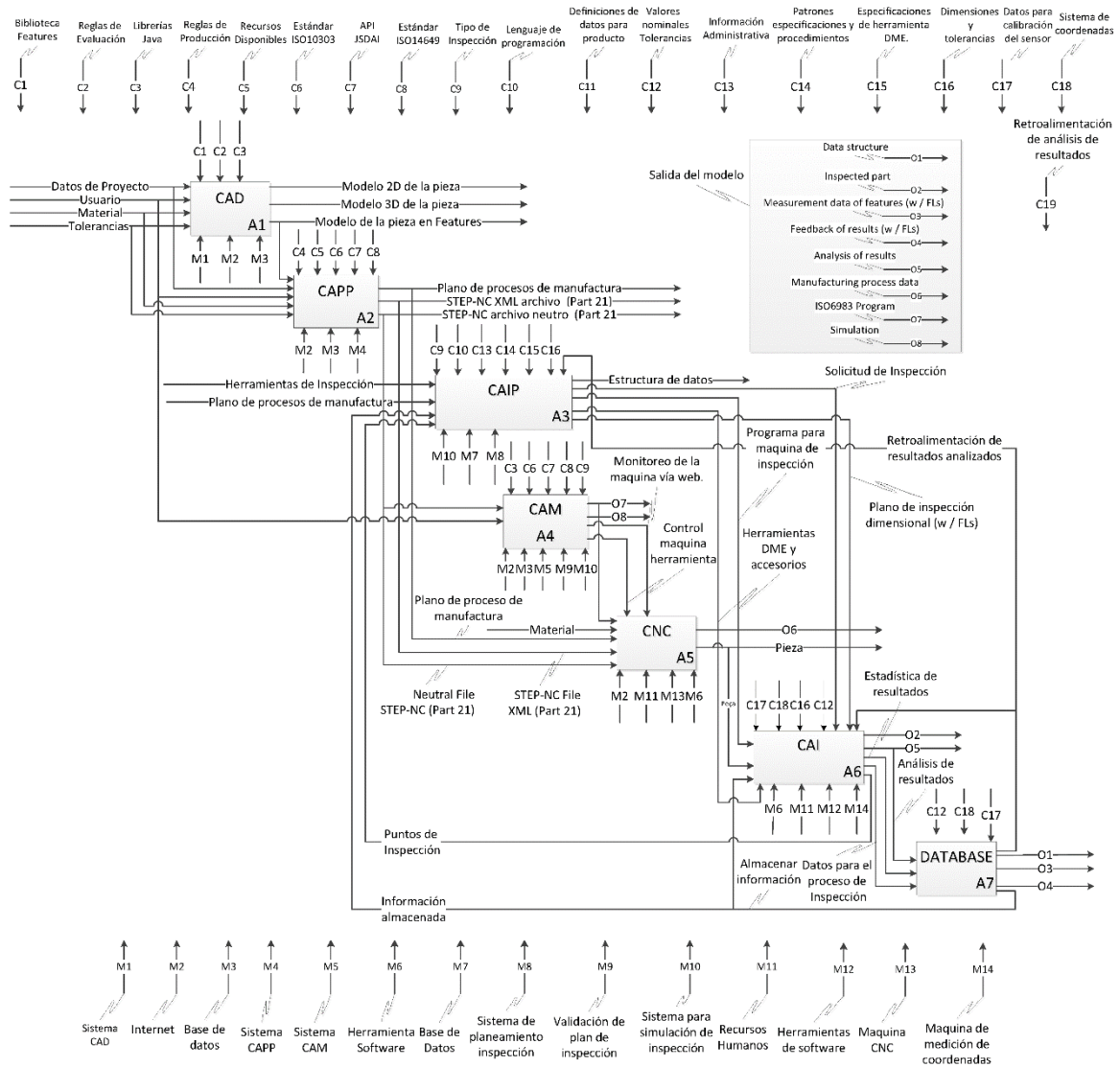
Figura 4 se presenta el modelo AAM de integración CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/ CAI. Se pueden observar las actividades funcionales contempladas en el nivel interno de A0. El modelo muestra en cada uno de los siete bloques funcionales las entradas ubicadas a la izquierda de cada bloque. Los mecanismos usados para transformar las entradas están indicados en la parte inferior de cada bloque (M1-M14), representan las herramientas necesarias para la transformación de cada una de las entradas. Los medios de control ubicados en la parte superior de cada bloque funcional (C1-C18) representan las reglas o procedimientos necesarios para construir correctamente las salidas. Cada bloque contiene un conjunto de salidas ubicadas en la parte derecha de cada bloque (Riaño, Espindolo, Ticona, & Alvares, 2017).

A partir del modelo AAM presentado en la

Figura 4 se obtiene el modelo ARM (*Application Reference Model*) usado como referencia para la implementación computacional. El modelo contiene las definiciones y estructura de datos requeridas para la implementación.



Figura 4 – Modelo AAM de integración CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI



## 5 MÉTODO PARA IMPLEMENTACIÓN DE INSPECCIÓN DIMENSIONAL Y GEOMÉTRICA

La norma STEP describe una metodología para implementación la cual precisa de definir los objetivos y crear un modelo AAM con las diferentes actividades funcionales necesarias para satisfacer esos objetivos. El modelo AAM es creado en IDEF0 donde es definido el alcance de la propuesta y la relación entre las variables y definiciones del proceso. A partir del modelo AAM es creado el modelo ARM. El modelo ARM define la relación de las entidades y sus atributos que posteriormente son mapeadas al modelo AIM (*Application Interpreted Model*).

Figura 5 – Extracción de esquema definido en lenguaje EXPRESS

```
SCHEMA shape_tolerance_schema;
REFERENCE FROM measure_schema -- ISO 10303-41
(derive_dimensional_exponents, dimensional_exponents, length_measure_with_unit,
measure_with_unit,
measure_value, plane_angle_measure_with_unit);
*

TYPE area_unit_type = EXTENSIBLE ENUMERATION OF
(circular,
square,
rectangular);
END_TYPE;
*

ENTITY geometric_tolerance_relationship;
name : label;
description : text;
relating_geometric_tolerance : geometric_tolerance;
related_geometric_tolerance : geometric_tolerance;
END_ENTITY;
*

RULE subtype_exclusiveness_geometric_tolerance FOR
(geometric_tolerance);
WHERE
WR1: SIZEOF(QUERY (gt <* geometric_tolerance | NOT (type_check_function(gt,
['SHAPE_TOLERANCE_SCHEMA.ANGULARITY_TOLERANCE'] , 2 ) ))) = 0;
END_RULE;
*

FUNCTION sts_get_product_definition_shape
(input : geometric_tolerance_target) : product_definition_shape;
CASE TRUE OF ('SHAPE_DIMENSION_SCHEMA.DIMENSIONAL_LOCATION' IN TYPEOF(input)) :
RETURN(input\shape_aspect_relationship.relatig_shape_aspect\shape_aspect.of_shape);
('SHAPE_DIMENSION_SCHEMA.DIMENSIONAL_SIZE' IN TYPEOF(input)) :
RETURN(input\dimensional_size.applies_to\shape_aspect.of_shape);
('PRODUCT_PROPERTY_DEFINITION_SCHEMA.PRODUCT_DEFINITION_SHAPE' IN TYPEOF(input)) :
RETURN(input);
('PRODUCT_PROPERTY_DEFINITION_SCHEMA.SHAPE_ASPECT' IN TYPEOF(input)) :
RETURN(input\shape_aspect.of_shape);
OTHERWISE : RETURN(?);
END_CASE;
END_FUNCTION;
END_SCHEMA; -- shape_tolerance_schema
```

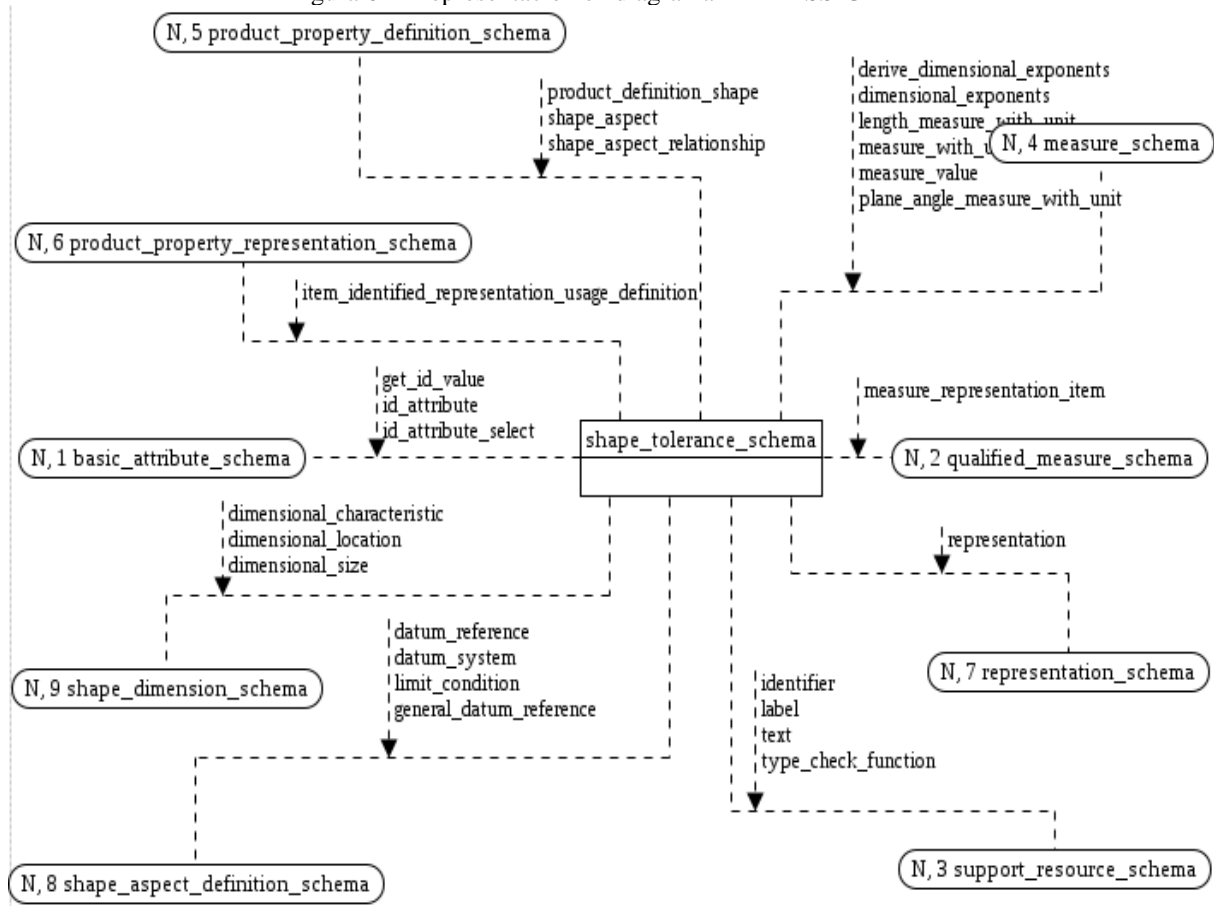
El Modelo ARM es descrito a través del lenguaje EXPRESS. El lenguaje EXPRESS definido en la ISO 110303-11 1994 es un lenguaje de referencia neutro que permite la definición de tipos, construcción de entidades, formulación de reglas, funciones y procedimientos (Zhao, Xu, & Xie, 2008). En la

Figura 5 se presenta una extracción de un código del lenguaje EXPRESS creado para definir un esquema de tolerancias de forma.

En la

Figura 6 se presenta un diagrama EXPRES-G obtenido del código presentado en la Figura 4. Un modelo de datos puede ser definido de dos formas, textual y gráficamente. Para usar como referencia visual y observar las definiciones y relaciones de interés para la aplicación, se obtiene un diagrama grafico a partir del código EXPRESS.

Figura 6 – Representación en diagrama EXPRESS-G



El Modelo ARM es descrito a través del lenguaje EXPRESS. El lenguaje EXPRESS definido en la ISO 110303-11 1994 es un lenguaje de referencia neutro que permite la definición de tipos, construcción de entidades, formulación de reglas, funciones y procedimientos (Zhao, Xu, & Xie, 2008). En la

Figura 5 se presenta una extracción de un código del lenguaje EXPRESS creado para definir un esquema de tolerancias de forma.

En la

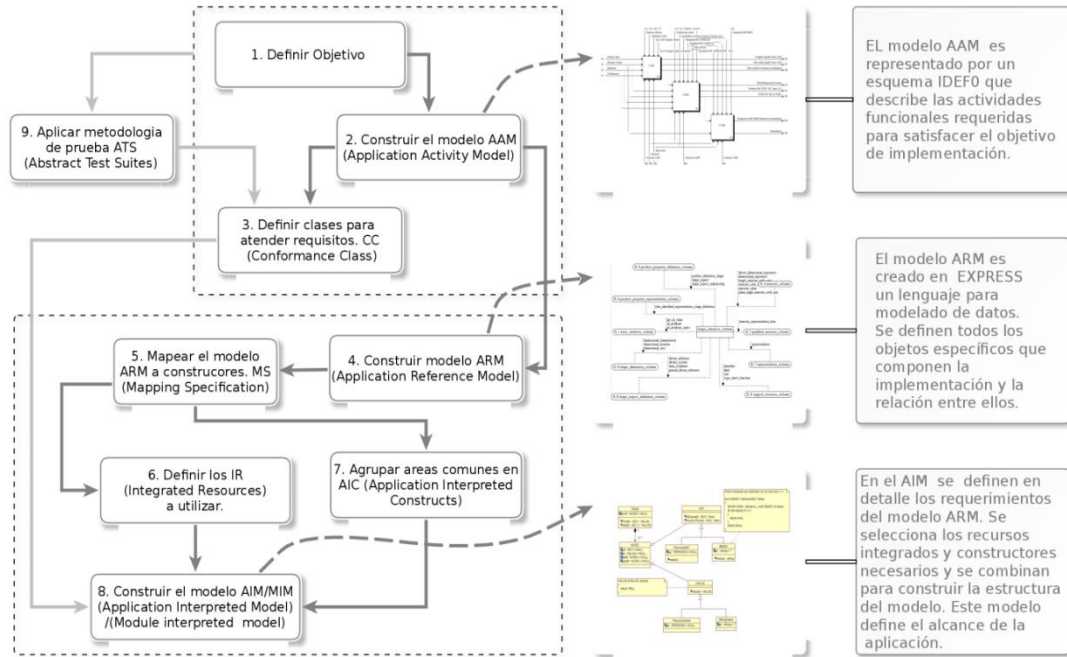
Figura 6 se presenta un diagrama EXPRES-G obtenido del código presentado en la Figura 4. Un modelo de datos puede ser definido de dos formas, textual y gráficamente. Para usar como referencia visual y observar las definiciones y relaciones de interés para la aplicación, se obtiene un diagrama grafico a partir del código EXPRESS.

En la

Figura 7 se presenta un diagrama con la metodología seguida para la implementación del modelo de inspección en lazo cerrado.



Figura 7 – Metodología para implementación del modelo de integración



### 5.1 INSPECCIÓN DIMENSIONAL Y GEOMÉTRICA

Las definiciones para productos mecánicos que permiten el intercambio de información asociada con inspección dimensional y geométrica, están especificadas en las unidades de funcionalidad UoFs del protocolo de aplicación ISO 10303-219. La Figura 8 muestra la relación de alto nivel entre cada unidad de funcionalidad del protocolo. Las UoFs soportan la planeación, administración, ejecución y registro de datos de inspección. Los modelos ARM construidos con las definiciones dadas en este protocolo, son implementadas para identificar *features*, asociar y clasificar las tolerancias dimensionales, especificar referencias dentro del proceso de medición, y otras actividades del modelo presentado en la

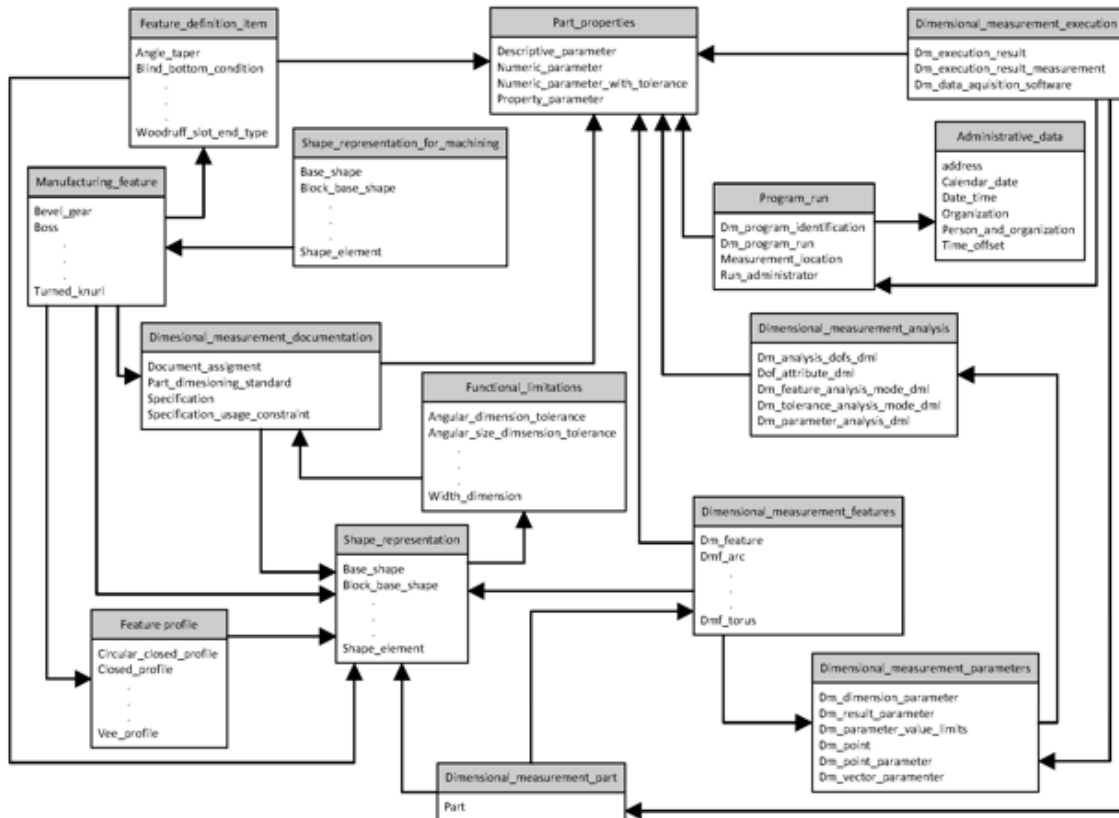
Figura 4.

La

Figura 9 muestra el esquema EXPRESS-G de las definiciones incluidas en la UoF denominada *Dimensional\_measurement\_feature*. Esta UoF contiene una serie de entidades mapeables dentro del estándar STEP para proveer información asociada con *features* de medición dimensional. La entidad *DM\_feature entity* es definida como una de las formas básicas presentadas en el esquema de la

Figura 9 (e.g. dmf\_arc, dmf\_cylinder, etc).

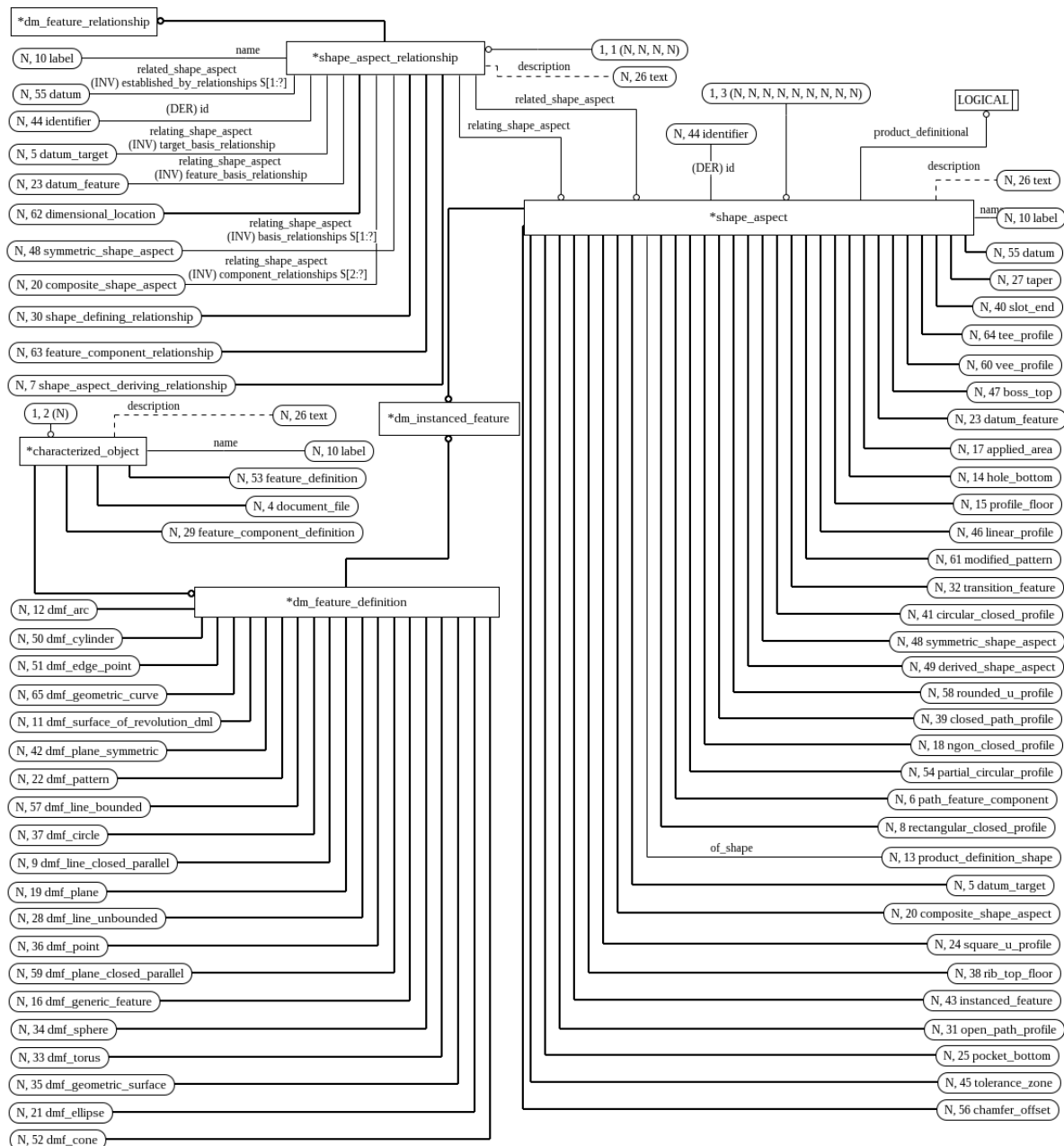
Figura 8 – Relación de alto nivel de las UoFs para inspección dimensional y geométrica.



Los modelos ARM que contienen las entidades requeridas para implementar la integración de manufactura e inspección, son compiladas en un archivo p21 convirtiendo en bibliotecas las definiciones de cada entidad.

El archivo p21 es creado usando la interface de programación JSDAI que permite leer, escribir, compilar y manipular las definiciones estructuras en lenguaje EXPRESS. La biblioteca de datos creada en el formato p21 (ISO10303-21) a partir de los metadatos extraídos de los esquemas EXPRESS, contiene las librerías usadas en la implementación computacional del modelo en lazo cerrado de manufactura e inspección para piezas prismáticas. La biblioteca (*Dynamic Library Link*) habilita el uso de las definiciones para cualquier entorno de programación orientado a objetos (Lubell, Peak, Srinivasan, & Waterbury, 2004).

Figura 9 – Esquema EXPRESS-G de la UoF denominada Dimensional\_measurement\_feature.



## 6 CONCLUSIONES

El modelo de integración presentado en este artículo propone una arquitectura alternativa para interconectar los sistemas CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI basado en el estándar STEP, creando la posibilidades de integrar dentro de la manufactura avanzada tecnologías digitales adherentes al contexto de industria 4.0. El método de implementación desarrollado busca que procesos tanto de manufactura como de inspección sean compatibles con tecnologías y filosofías de a la nueva era digital.

En este artículo se describe la metodología para retroalimentar resultados de inspección geométrica y dimensional en un lazo cerrado de manufactura. Los modelos AAM y ARM creados relacionan las actividades funcionales de los sistemas CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/

CAI con las entidades definidas en el estándar ISO 10303 para crear una implementación computacional que permita estructura la información obtenida en la medición de una pieza. Es definida la relación entre *features* de manufactura con *features* de inspección usando los protocolos STEP-NC y AP219 para habilitar el intercambio de datos en los sistemas CAD/CAPP/CAIP/CAM/CNC/CAI.

Las entidades y definiciones proporcionadas por las unidades de funcionalidad son modeladas en lenguaje EXPRESS y exportadas a una biblioteca dinámica que habilita el uso de estas entidades en cualquier entorno de programación para crear la implementación computacional encargada de codificar los resultados de inspección en un archivo p21 de STEP.

## REFERENCIAS

- Benavente, J. C., Ferreira, J. C., Goulart, C. M., & Oliveira, V. G. (2013). A STEP-NC compliant system for the remote design and manufacture of mechanical components through the Internet. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26, 412-428.
- Bhandarkar, M. P., & Nagi, R. (2000). STEP-based feature extraction from STEP geometry for agile manufacturing. *Computers in industry*, 41, 3-24.
- Brecher, C., Vittr, M., & 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, 570-580.
- Danjou, C., Le Duigou, J., & Eynard, B. (2015). Closed-loop manufacturing process based on STEP-NC. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-13.
- Fiona, Z. H., Xun, X. U., & Shane, X. I. (2005). STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 200-216.
- Huiying, Q. (2014). Research on NC Simulation Technology Integrating CAD/CAM/CAPP. *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2014 7th International Conference on*, (págs. 551-554). doi:10.1109/ICICTA.2014.139
- Jr, R. a., & Newman, S. T. (2003). Estrutura de Dados para Sistemas CAD/CAM aderente á STEP. VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica--Universidade de Coimbra.
- Laguionie, R., Rauch, M., & Hascoët, J.-Y. (2009). Toolpaths programming in an intelligent STEP-NC manufacturing context. *arXiv preprint arXiv:0905.3079*.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lubell, J., Peak, R. S., Srinivasan, V., & Waterbury, S. C. (2004). STEP, XML, and UML: complementary technologies. *ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, (págs. 915-923).
- Majstorovic, V., Sibalija, T., Ercevic, M., & Ercevic, B. (2014). CAI Model for Prismatic Parts in Digital Manufacturing. *Procedia CIRP*, 25, 27-32.
- Mario, H., Tobias, P., & Boris, O. (2015). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. *Technische Universit{\\a}t Dortmund*, working paper.
- Newman, S. T., Nassehi, A., Xu, X. W., Rosso Jr, R. S., Wang, L., Yusof, Y., . . . others. (2008). Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 699-708.



Po, H., Hongya, F., Zhenyu, H., & Dedong, H. (2014). A closed-loop and self-learning STEP-NC machining system. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, (págs. 1598-1603).

Pratt, M. J. (2005). ISO 10303, the STEP standard for product data exchange, and its PLM capabilities. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 1, 86-94.

Riaño, C., Espindolo, J. C., Ticona, J. C., & Alvares, A. J. (2017). Modelo de integração para inspeção em malha fechada aderente a step-nc. *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*.

Xu\*, X. W., Wang, H., Mao, J., Newman, S. T., Kramer, T. R., Proctor, F. M., & Michaloski, J. L. (2005). STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration. *International Journal of Production Research*, 43, 3703-3743.

Xu, X. W., & He, Q. (2004). Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20, 101-109.

Zhao, F., Xu, X., & Xie, S. (2008). STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 200-216.  
Zhao, Y. F. (2012). An integrated process planning system for machining and inspection. Ph.D. dissertation, University of Auckland.

Zhao, Y., Kramer, T., Brown, R., & Xu, X. (2011). *Information modeling for interoperable dimensional metrology*. Springer Science & Business Media.