

# Design and Fabrication of Machines with a Focus on PLM: Case Study of CNC Machines in the School of Engineering

Carlos M. Echeverri, Msc.<sup>1</sup>, Carlos A. Rodríguez, Msc.<sup>2</sup>, Jorge E. Montoya, Bsc<sup>3</sup>, and Andres F. Alzate, Student<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad EAFIT, Colombia, cechever@eafit.edu.co, jmonto73@eafit.edu.co, aalzat16@eafit.edu.co

<sup>2</sup> Universidad EAFIT, Colombia, carodri@eafit.edu.co.

*Abstract– The challenge to design and manufacture machinery that is adaptable to production needs is a challenge that an organization should undertake on an ongoing basis in engineering. The independent study (Curso Proyecto) known as “Fundamental of Machine Elements” at EAFIT university, it is how students are prepared to take on this challenge using a defined methodological framework to provide them which direct their efforts to create value as a result of the integration of human resources and knowledge supported by technology. This particular paper presents results for projects wherein machinery were developed and constructed using CNC machines with an integrated focus of PLM detailing the scope, budget, resources, phases – all key tasks, with an eye to creating a functional prototype which is shared with different areas of the university and which were achieved in short periods of time that did not surpass 16 weeks. Additionally, the paper demonstrates how a strategy of shared knowledge within PLM helps transfer tools and strengths within an engineering project setting that can be used by seasoned engineers in the field of designing machinery for industrial use.*

*Keywords: Academic Methodology for Machine Projects, PLM Management, Framework for Project Fundamentals, Project Management, Engineering Education*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.191>  
ISBN: 978-0-9822896-9-3  
ISSN: 2414-6390

# Diseño y fabricación de máquinas con enfoque PLM: Caso de estudio máquinas de mecanizado CNC en la facultad de ingeniería.

Carlos M. Echeverri, Msc.<sup>1</sup>, Carlos A. Rodríguez, Msc.<sup>2</sup>, Jorge E. Montoya, Bsc.<sup>3</sup>, and Andres F. Alzate, Student<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad EAFIT, Colombia, cechever@eafit.edu.co, jmonto73@eafit.edu.co, aalzat16@eafit.edu.co

<sup>2</sup> Universidad EAFIT, Colombia, carodri@eafit.edu.co.

*Abstract– El reto de diseñar y construir maquinaria que se ajuste a los procesos productivos dentro de las organizaciones es un desafío que deben asumir de manera continua las áreas de ingeniería. El curso de proyecto de elementos de máquinas de la universidad EAFIT, es la forma con la cual se prepara al estudiante a asumir este reto dentro un marco metodológico definido bajo el cual puedan orientar sus esfuerzos a la creación de valor como resultado de la integración del recurso humano y conocimiento soportado por tecnología. En este caso de estudio en particular se presentan los resultados de proyectos para los cuales se han desarrollado y construido maquinaria para mecanizado de control numérico bajo un enfoque integrador de PLM detallando el alcance, presupuesto, recursos, fases, tareas clave transformándose en el logro de un prototipo funcional que es entregado a diferentes áreas de la universidad y que han sido alcanzados con cronogramas cortos no mayores a 16 semanas. Además, en el presente artículo se demuestra como la estrategia de conocimiento compartido dentro de PLM, ayuda a transferir herramientas y fortalezas dentro del campo de proyectos en ingeniería que puedan ser utilizadas por ingenieros experimentados en el desarrollo de máquinas para procesos industriales dentro de sistemas productivos complejos*

**Palabras Clave:** Metodología académica para proyectos de máquinas, Administración del ciclo de vida del producto (PLM), Marco de fundamentación de proyectos, Administración de proyectos, Educación en ingeniería.

## I. INTRODUCCIÓN

La asignatura de proyecto de elementos de máquinas es uno de los cursos bajo el cual el departamento de ingeniería de producción de la universidad EAFIT, busca forma profesionales que desde su etapa académica se vean retados a diseñar y desarrollar mejoras en procesos productivos, partes técnicas y las máquinas que participan en ellos.

Para el logro de este objetivo metodológicamente propone un enfoque bajo el cual el estudiante conoce una necesidad industrial y emplea sus estudios en diferentes áreas de ingeniería para erigir un proyecto y ejecutarlo. Durante el ciclo de vida de estos proyectos se emplean diferentes marcos de fundamentación para madurar al estudiante dentro de esta disciplina teniendo claro que un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. [1] y que además, la gestión de uno o varios

proyectos involucra el entendimiento de variables de riesgo que pueden surgir como dificultades para el logro del objetivo, en la situación particular del campus académico al tener paralelismo con otros proyectos, se presentan situaciones que homologan el entorno laboral como el uso de recursos compartidos y priorización de tareas que afecten el desarrollo de uno o varios proyectos y que finalmente puede marcar el éxito o el fracaso de los mismos[2].

Ahora, para este caso de estudio el tema específico es el diseño y construcción de una maquina ruteadora CNC con recursos que se limitan a las maquinas herramientas que provee la universidad, el equipo de trabajo de 5 estudiantes y un cronograma de 16 semanas.

### A. Diseño De Elementos Mecánicos

El diseño de elementos mecánicos o maquinados es parte integral del campo del diseño mecánico el cual es más extenso y general. En el diseño mecánico, un diseñador o un ingeniero en diseño crean un dispositivo o sistema que satisface una necesidad particular. Por lo regular, un dispositivo implica partes movibles que transmiten energía y logran un patrón específico de movimiento. Un sistema mecánico se compone de varios dispositivos mecánicos. [3]

El proceso de diseño de máquinas comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto, a menudo la necesidad no es del todo evidente, seguido a esto se da la definición del problema, esta acción es más específica que la identificación de una necesidad, ya que incluye todas las especificaciones del objeto que va a diseñarse[4]. A continuación, se pasa al proceso de síntesis, que consiste en la concepción de varios esquemas que deben proponerse, investigarse y cuantificarse en términos de medidas establecidas, los mejores esquemas se comparan de manera que se pueda elegir el camino que conduzca al producto más competitivo, siendo los procesos de síntesis y análisis y optimización procesos relacionados de forma íntima e iterativa. Posteriormente el proceso de evaluación representa la prueba final de un diseño exitoso y por lo general implica la prueba del prototipo en laboratorio, en esta actividad se desea descubrir si el diseño en verdad satisface la necesidad previamente identificada. Finalmente se llega a la etapa de presentación que consiste en “vender” la nueva solución al personal administrativo, gerencial o de supervisión, a fin de

iniciar etapas de gestión del cambio o transformación desde la alta gerencia.

### B. PLM- Product life cycle management.

PLM es una solución empresarial que tiene como objetivo agilizar el flujo de información sobre el producto y los procesos relacionados a lo largo del ciclo de vida del producto, facilitando la información adecuada en el contexto adecuado en el momento adecuado.[5] Para lograrlo, en PLM se integran adecuadamente las metodologías de trabajo y la ingeniería concurrente permitiendo el trabajo colaborativo independientemente de la ubicación geográfica de los responsables del proceso, integrando así todos los departamentos de la empresa, proveedores, distribuidores, entre otros que están relacionados con la información asociada con el producto [6]

En el caso de una empresa dedicada a la manufactura es normal que esta se dedique a la fabricación de más de un producto con múltiples piezas dentro de su portafolio, La gestión eficiente de múltiples productos que satisfagan las necesidades de múltiples disciplinas es un tema importante que PLM es capaz de abordar con el fin de apoyar la innovación de producto mediante la reducción de todos aquellos procesos que causan la redundancia de datos. [7] [8]

Teniendo en cuenta estas dos definiciones resulta fácil entender porque el enfoque PLM proporciona ventajas sustanciales a la hora de realizar un proyecto académico con los actores interactuando continuamente en términos de ingeniería colaborativa. En especial para este caso específico es sustancial destacar que el entorno productivo viene evolucionando de manera continua y permite tener herramientas informáticas de forma costo-eficiente para proporcionar acceso a la información del proyecto de forma controlada [9]. Ahora, con esta actualidad en las aulas y recintos de investigación se crea una tendencia en cuanto a formas de trabajo, que cada vez se torna menos individual desde etapas tempranas de la identificación de las soluciones y empieza a mostrar un ambiente que se dirige la generación de valor a través de la colaboración interdisciplinaria durante las diferentes etapas del proyecto investigativo, mostrando un mejor desarrollo si se logra proporcionar un entorno con los métodos, tecnologías y herramientas que permitan incrementar la colaboración con diligencia en el desarrollo de proyectos de ingeniería.[10]

### C. Gestión de proyectos

La construcción de una máquina herramienta como la de caso de estudio implica pasar de una etapa de diseños y pruebas en simulación a una etapa de manufactura en la cual es requerido no solo una catalogación adecuada de la información sino además un enfoque de gestión de proyectos con un marco de fundamentación específico. Para el caso de la

asignatura de proyectos la universidad ha determinado apearse a estándares internacionales que proporciona el PMI (Project Management Institute), para el cual la gestión de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo[1]. Considerando que existen 5 grupos de procesos para los cuales estas últimas deben ser integradas y estos son: Inicio, Planeación, Ejecución, Monitoreo y control, y cierre.

En la actualidad la universidad EAFIT invierte grandes esfuerzos en lograr establecer marcos de trabajo común para las áreas de ingeniería, teniendo en consideración la importancia que tiene tener un lenguaje común de proyectos como el que proporciona el PMI que ha llegado a ser reconocido por la American National Standards Institute (ANSI)[11], acompañados de tecnologías que permitan incrementar los beneficios de llevar la trazabilidad de la información de requerimientos, diseños, casos de prueba y resultados de la implementación de manera controlada como lo hace la estrategia PLM[12], sin dejar de lado que los proyectos son ejecutados por recurso humano que de manera colaborativa aseguran el logro de resultados. Es por esto último y basados en estas prácticas internacionales, se propone la utilización de estos enfoques para el desarrollo de proyectos con el fin de darle al estudiante herramientas para interactuar con equipos interdisciplinarios en distintos lugares del mundo y además, esté en capacidad de acreditarse de una manera más natural en disciplinas de alta capacidad de transformación como la dirección de proyectos.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LOS PROYECTOS DE MÁQUINAS:

En un entorno de globalización que se encuentra en constante cambio, en el que cada vez las soluciones de ingeniería se deben diseñar para responder a situaciones de mayor complejidad, el desarrollo de productos y la investigación acerca de la administración del ciclo de vida de productos tiene una gran importancia[13]. Para hacer frente a esta situación, se impulsa el logro de los objetivos estratégicos de la organización a través de múltiples proyectos con diferentes tamaños, prioridades y necesidad de recursos, que de llevarse a cabo determinaran el éxito o el fallo de toda la organización[2].

Reducir la incertidumbre en la ejecución de los proyectos y determinar el estado de las organizaciones es vital para estas mismas. De esta forma, se busca evaluar la situación actual a través de medidas que puedan representar el rendimiento actual, el pasado y evaluar posibles resultados futuros a través de indicadores clave de rendimiento (KPI)[14]. Dicho de otro modo, Los objetivos, que serán justificación de los proyectos, deben ser entonces monitoreados para asegurar su cumplimiento [15] dando criterios para precisar si se están alcanzando [16].

Si se ven los proyectos de diseño y fabricación de máquinas, como la entrega de un producto que finalmente busca fortalecer y robustecer la infraestructura tecnológica de la organización. Estos necesitan ser gestionados, medidos, ejecutados y controlados diligentemente haciendo uso de un enfoque sistémico que mejore la gestión de proyectos, el desarrollo de productos y los procesos de ingeniería [10]. Una vez definido el proceso es importante definir la metodología de trabajo y de ser posible la utilización de un sistema de información apalanque los resultados y las eficiencias en el mismo. La sinergia entre las metodologías, herramientas y los procesos de la empresa es la única manera de desarrollar sistemas complejos como máquinas, aviones o carros [12][7].

Dicho lo anterior, dentro del área de proyectos diseño y fabricación de máquinas se han evidenciado los siguientes problemas asociados a la gestión de proyectos y la administración del ciclo de vida del producto:

- Durante la última década los fabricantes de equipos de ingeniería están tratando de mejorar su conocimiento y rendimiento en el área de gestión de proyectos con el uso efectivo de métodos de gestión. Sin embargo, los retos encontrados no son problemas aislados y por tanto un enfoque sistémico es requerido. [17]

- La mejora de la gestión de proyectos, desarrollo de productos y procesos de ingeniería es para muchas empresas un hito crucial para sobrevivir en un entorno que cambia rápidamente. Sin embargo, estas actividades rara vez se integran bien debido a la diversidad de las partes interesadas con el conocimiento individual sobre proyectos, productos y procesos [10].

- En la industria Aeroespacial y de defensa, así como las empresas de automoción son muy conscientes del hecho de que es imposible sobrevivir en la actualidad o adquirir nuevos segmentos de mercado sin una estrategia organizativa adecuada y orientada al ciclo de vida del producto[18][19].

- Al no tener procesos claros y llevarse a cabo los proyectos se presenta falta de consistencia de las métricas de los mismos, teniendo diferentes indicadores que expresan la misma métrica, utilizan la misma información, pero se calculan y se definen de forma diferente. Esto impide, por ejemplo, realizar comparaciones de rendimiento de los proyectos, iniciativas y objetivos alcanzados dentro de la misma organización. [20]

Ahora, la definición de un proceso formal y posterior estandarización hacia la metodología a utilizar de estos proyectos bajo la unificación del marco de fundamentación de gestión de proyectos del Project Management Institute (PMI) en conjunto con la integración de las estrategias y herramientas de gestión de ciclo de vida del producto (PLM), surge como una propuesta de solución que busca garantizar el éxito de estos esfuerzos, minimizando el riesgo de desperdicios en términos de tiempo y dinero.

### III. METODOLOGÍA ACADÉMICA PARA PROYECTOS DE MÁQUINAS

La finalidad del proyecto de elementos de máquinas que se imparte en la universidad EAFIT es proporcionar al estudiante un reto de ingeniería para el cual deba interactuar en equipos de trabajo y además utilice líneas específicas del conocimiento del diseño de soluciones técnicas sin desconocer el papel administrativo en el uso eficiente de recursos en el semestre. Para lograrlo el estudiante debe tener un perfil específico que este en capacidad de utilizar las siguientes líneas de conocimiento que se encuentran dentro del currículo académico del programa de ingeniería de producción:

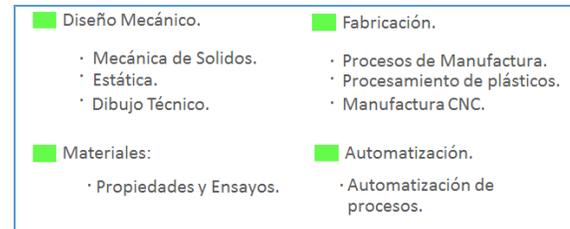


Fig. 1: Caracterización del estudiante, Líneas de conocimiento.

Como apoyo al trabajo de los estudiantes y a fin de brindar un ambiente de trabajo estable con acuerdos de servicio entre las diferentes partes involucradas de la universidad, se erige una metodología de gestión de proyectos que permita utilizar el marco de dirección de proyectos del PMI como una guía, de la cual se extraerán términos y conceptos, al mismo tiempo que se referencian inputs y outputs que son necesarios para los entregables de este proyecto específico. La utilización de este marco como guía permite tener grandes ventajas respecto a la formación del estudiante en su hacer profesional llevándolo a un entorno más real en el que la aplicación sucede desde la necesidad misma del proyecto. Es decir, al utilizar este marco como guía se brinda al estudiante espacios diferentes a la memorización, la cual puede hacer que su proceso de aprendizaje se vea afectado negativamente[21].

Para profundizar un poco más en las ventajas del uso del marco del PMI cabe mencionar que este permite la muestra al estudiante de códigos de ética y conducta profesional que son esperados por los interesados dentro de su vida laboral ilustrando las expectativas que deben tener respecto a sí mismos y a sus equipos de trabajo[22]. Formando así desde la etapa más temprana del proyecto el perfil psicológico que debe asumir el estudiante en la asignatura.

Una vez se tienen estos elementos definidos se procede a utilizar una metodología basada en liberaciones de subensambles del producto para ser probados como alternativa al uso de la metodología secuencial tipo cascada. Este tipo de metodología es Agile y es comúnmente utilizada en la ingeniería de software, como respuesta a las limitaciones que se tienen en las metodologías en secuencia[23], con el objetivo de que los equipos estén en capacidad de responder a eventos

de incertidumbre, con ejecución en modo de incrementales y etapas iterativas.[24]

El valor agregado del uso de la metodología aplicada consiste en lograr traer prácticas y conocimiento de áreas diferentes de ingeniería para lograr integrar el conocimiento de diseño mecánico y fundamentos de fabricación con áreas de administración de proyectos que permitan acortar los tiempos de entrega de la maquinaria al sistema productivo. Adicionalmente, con la estrategia de PLM e ingeniería colaborativa se proponen herramientas de TI para el manejo de información del proyecto de manera ordenada y controlada por el equipo mismo. Para detallar e ilustrar la implementación de la metodología esta partió de la definición iteraciones para la construcción del prototipo (Ver figura 2) dentro de las cuales se contemplan 5 etapas: 1. Levantamiento de requerimientos, 2. Diseño detallado, simulación y pruebas del diseñador, 3. Fabricación y ensamble de componentes para prototipo, 4. Planeación y ejecución de casos prueba de producto, 5. Liberación, evaluación y priorización del siguiente ciclo (Ver figura 3).

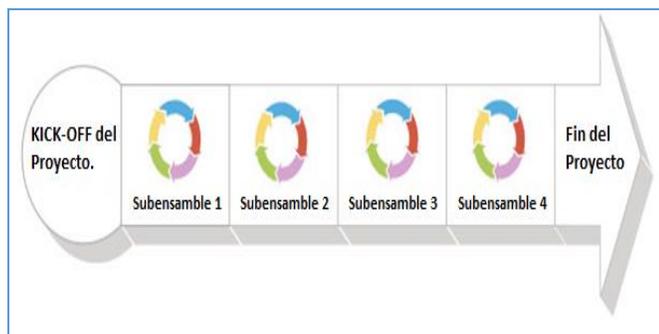


Fig. 2. Metodología Académica para el proyecto de elementos de máquinas.



Figura 3. Detalle de las etapas dentro de cada iteración.

### A. Levantamiento de requerimientos

El levantamiento de requerimientos consiste en la identificación, determinación y documentación de necesidades relacionadas al objeto específico del proyecto las cuales

ilustran la solución de un problema o la oportunidad de mejorar un proceso productivo a través de la introducción de una máquina de ruteo CNC. Esta etapa de la iteración, se realiza por medio de workshops con participación de todos los estudiantes en compañía de los docentes de la asignatura, expertos técnicos y de manufactura, a fin de tener una estrecha relación entre los interesados y los equipos de ejecución del proyecto.

El entregable de esta etapa es llamado el product backlog, este es un documento que recopila las características mínimas con las que deberá cumplir el producto o los errores que necesitan ser solucionados como parte del proyecto para que el producto sea aceptado por los interesados, detallando inclusive criterios de aceptación[25]. Esta etapa es crucial en cada uno de las iteraciones dado que dependiendo de la calidad de la descripción y documentación de los requerimientos se obtendrá el beneficio de definir e interiorizar el alcance del proyecto y del producto por parte de todos los actores [1].

Una vez se tiene este output se sube a la plataforma Eafit interactiva (EI) para ser consultado en cualquier momento por todos los equipos de trabajo de la asignatura teniendo en cuenta que este documento solo podrá ser modificado por el grupo de interesados, que en este caso serían los profesores de la asignatura. Además, esta etapa considera un segundo entregable, el acta de constitución de proyecto oficializando el alcance, cronograma, equipo de trabajo y caso de negocio que será trabajado durante la asignatura. Ambos entregables serán el contrato con el que los estudiantes ejecutarán el proyecto.

Ahora, por parte de los interesados en paralelo a la entrega de ambos documentos (backlog-acta de constitución del proyecto) se determina y se socializa el plan para la administración de requisitos en el cual se describen actividades como: priorización de requisitos, proceso de control de cambios, métricas de producto que se utilizarán para determinar el cumplimiento y la trazabilidad entre los requisitos y los productos entregados.

Dentro de la estrategia de PLM, el desarrollo de la estrategia está basado en el modelo de estandarización de procesos y documentos establecido en la norma ISO 9000[6]. De este modo dentro del curso se hace uso de diferentes formatos a fin de homologar los entregables y paquetes de trabajo liberados con el fin de la actividad.

Tabla 1  
Formato Product Backlog

| ID_Req | Prioridad  | Yo como                                  | Deseo                                  | Finalidad                                    |
|--------|--|--|--|--|
| Req_01 | [Importancia del requerimiento dentro de la iteración] | [Rol respecto a interacción con maquina] | [Tarea a ser realizada por la máquina] | [Resultado esperado de la acción de máquina] |
|        | [Importancia del requerimiento dentro de la iteración] | [Rol respecto a interacción con maquina] | [Tarea a ser realizada por la máquina] | [Resultado esperado de la acción de máquina] |
| Req_02 |  |  |  |  |

En este formato se registrarán todos los requerimientos y acciones, tareas y/o procesos que necesitan ser realizadas por la máquina y que son requeridos para el proyecto.

Tabla 2  
Formato de criterios de aceptación.

| ID_Requerimiento | ID_Aceptación | Criterio de aceptación  |
|------------------|---------------|---|
| Req_001          | Ac_001        | Caso:[Nombre Corto]<br>Dado: [Contexto], Cuando:[Evento]<br>Entonces :[Resultado 1] y [Resultado 2] |
|                  | Ac_002        | Caso:[Nombre Corto]<br>Dado: [Contexto], Cuando:[Evento]<br>Entonces :[Resultado 1] y [Resultado 2] |

Formato de aceptación: utilizado para evitar la subjetividad en la evaluación de cada uno de los entregables. Este se socializa y se construye con cada uno de los equipos a fin de asegurar el mismo entendimiento en cuanto a lo que es requerido y como será validado. Cada requerimiento tendrá asociados uno(s) criterio(s) de aceptación.

Por último, se subirá toda la información para su administración y accesos a la plataforma EI y este será el único ítem para el que los usuarios con rol de estudiantes solo tendrán permisos de lectura(Ver figura 4) . En otras palabras, la iteración dentro de la misma no será modificada y el alcance será fijo durante su duración hasta que se tenga nuevamente una evaluación y priorización del siguiente trabajo.



Figura 4. Carga de archivos a la plataforma de administración de información.

### B. Diseño técnico detallado, simulación y pruebas del diseñador

Una vez se libera el entregable de requerimientos se procede a la realización del diseño detallado. En esta etapa se desarrolla toda la documentación de los diseños de la máquina que serán construidos como respuesta a lo detallado en el levantamiento de requisitos y su priorización de trabajo para una iteración dentro del proyecto, teniendo como objetivo fundamental el desarrollo de un diseño de producto completamente definido que esté plenamente documentado para fabricación [26].

Para el desarrollo del entregable de Diseño técnico detallado de producto (DTD) se propone a los equipos de proyecto trabajar y planear enfocados en la transformación de requerimientos, alternativas de solución existentes y arquitecturas físicas preliminares en definiciones de diseño finales e interdisciplinarias con el uso de sistemas de diseño asistido por computadora (CAD, Computer aided design), Manufactura asistida por computador(CAM, computer aided manufacturing) e ingeniería asistida por computadora( CAE, computer aided engineering).

En esta etapa para garantizar asesoría continua para el estudiante se programan espacios de consulta con expertos técnicos y de manufactura, además del soporte de estudiantes auxiliares de docencia para la materia que utilizando la estrategia PLM mejoran la eficiencia de los equipos de ingeniería[12].

Con este panorama, este entregable contendrá para cada iteración:

- Documentación de diseño: Contiene los modelos 3D y planos del sub-ensamble con sus partes desarrolladas en el CAD, lista preliminar de materiales y el concepto de aprobación del docente luego de la verificación de integralidad del diseño 3D. (ver Fig.3 y Fig. 4)

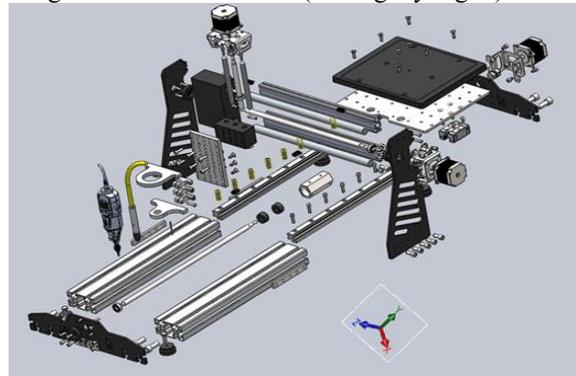


Fig. 3: Imágenes de la modelación

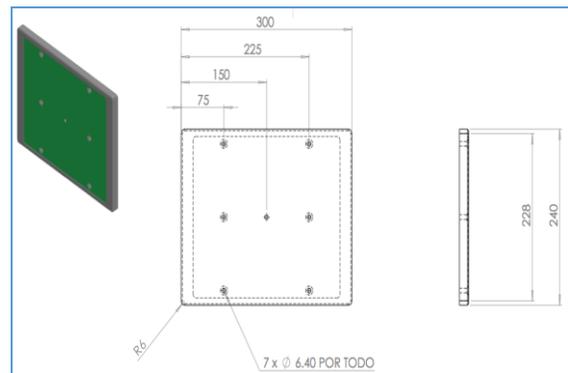


Fig. 4: planos de la máquina.

- Simulación y pruebas del diseñador: Contiene los informes de las simulaciones necesarias para la validación

de la funcionalidad del componente/sub-ensamble y ultimar la definición de materiales necesarios para la fabricación. En este punto se pueden identificar ajustes técnicos necesarios en cuanto a materiales, geometrías y volumen de cada una de las partes a fin de que se garantice la funcionalidad (ver Fig.5 y Fig. 6).

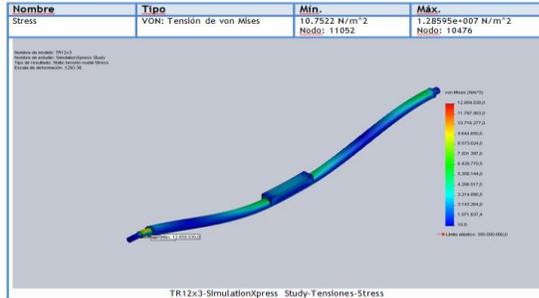


Fig. 5 Simulaciones y pruebas del simulador añadiendo material.

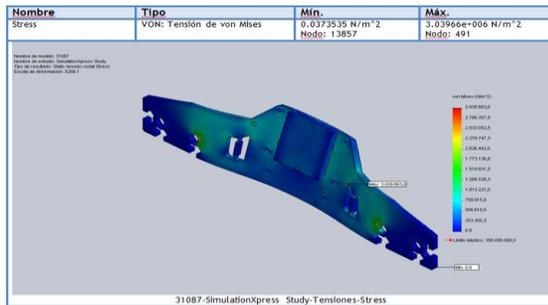


Fig. 6: Pruebas de esfuerzo del diseñador con fuerza aplicada directamente en la pieza sin adición de material.

- Liberación a Fabricación: Construcción de las cartas de proceso necesarias para la fabricación de las partes indicando: Proceso, cantidad de piezas, herramientas, maquinas herramientas utilizadas, acabados y ajustes. En este entregable se sugiere a los estudiantes entregar los códigos de Control numérico (CN) a las áreas de manufactura de la universidad a fin de lograr agilidad en los tiempos de fabricación de figuras complejas. la ventaja de este método para obtener el DTD es que con PLM se realiza una generación de valor del método de diseño de manera incremental. Es decir, cada etapa genera información vital del producto que puede llegar a ser reutilizada incrementando la colaboración y eficiencia en los diseños. (ver figura 7)



Fig. 7: Generación incremental del diseño técnico detallado con el método propuesto.

Una vez se tienen los entregables y las aprobaciones, se designa dentro de EI a un líder de equipo seleccionado en cada grupo por los estudiantes. Esté a partir de este momento será el encargado de gestionar el diseño y realizar modificaciones o ajustes que sean aprobados por los docentes como parte de un control de cambios.

### C. Fabricación y ensamble de componentes para prototipo

Una vez se determina y se entrega la documentación de diseño se conocen los detalles para la fabricación y puede proceder a la compra de materiales. Debido a que se trata de un entorno académico a los estudiantes se le proporcionan los elementos más costosos de la misma como lo son motores, tarjetas de interfaz, drivers y fuentes. Además, de esto se entrega también al equipo una caja de herramientas para trabajar con elementos de sujeción, cableado eléctrico, soldadura de estaño y ensambles en general.

Con este panorama, el equipo de proyecto es el encargado de gestionar su capacidad para realizar los mecanizados de las piezas no comerciales y que son requeridas desde su diseño, teniendo en cuenta que: su capacidad es compartida con otras asignaturas, las maquinas herramientas son un recurso finito y los horarios de trabajo de cada taller es independiente, entre otras. Razones por la cual es útil desarrollar en el equipo de proyecto un enfoque colaborativo de gestión de su proyecto[17], lo cual es un enfoque ampliamente conocido en el entorno mundial y que ayuda a facilitar la forma de trabajar con proyectos complejos[27].

Para facilitar la gestión en la ejecución, se le brinda al estudiante un formato para que diligencie allí las tareas que se debe realizar para completar el sub-ensamble, el estado de cada tarea, fechas de cierre y responsables dentro del equipo. Dado que el tiempo en ejecución debe ser gestionado cuidadosamente y se requiere que el estudiante realice un buen manejo del mismo, en este formato se solicita diligenciar las horas efectivas que representaron un avance para el logro del objetivo y las horas no productivas que pudieron representarse, entre otras, como: tiempos de espera no

planeados, transportes excesivos, re-procesos e incumplimientos por parte de proveedores, etc. (Ver Fig. 8)

| UNIVERSIDAD EAFIT<br>Abierta al mundo   |   |  |  |   |
|---|---|--|--|---|
| INFORME DE AVANCE DE PROYECTO<br>IP0257 - PROYECTO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS Y EQUIPOS |   |  |  |   |
| Nombre del proyecto   |   | Router CNC   |  | Numero de Grupo                         |
| Lider del proyecto  |   | Katherine Mejia  |  | Fecha de envio Interactiva (DD/MM/AAAA) |
|   |   |  |  | G7                                      |
|   |   |  |  | 06-04-15                                |
| Tareas Pendientes:  |   |  |  |   |
| Fecha Compromiso (DD/MM/AAAA)   | Detalle de la actividad pendiente                           | Nombre de la persona a cargo de la tarea   | Nombre de la persona a cargo de la tarea | Estado                                  |
| Semana 10   | Comprar 8 tornillos para union de placas inferiores         | Ana Laura  |  | Pendiente                               |
| Semana 10   | Confirmar y comprar elementos de sujeción para lamina-placa | Katherine  |  | Completado                              |
| Actividades realizadas en la semana:  |   |  |  |   |
| Fecha de la Actividad (DD/MM/AAAA)  | Actividad del Semana  | Descripción de la actividad realizada  |  | Numero de Horas Dedicadas               |
| 23-03-2015  | Cortar rieles   | Se analizó la longitud necesaria para los rieles de la mesa, y se cortaron a la medida (Jose y Daniel) |  | 2                                       |
| Tiempos perdidos en la semana:  |   |  |  |   |
| Fecha del Retraso (DD/MM/AAAA)  | Justificación del retraso                                   | Tiempo Perdido   | Comentarios adicionales                  |   |
|   |   |  |  |   |

Fig. 8: Formato de informe de avance de fabricación.

Este formato se carga semana a semana a la plataforma EI para continuar alojando toda la información del proyecto de manera centralizada permitiendo tener el 100% de la información relevante del proyecto guardado en el servidor de la universidad (Ver Fig. 9). Además, al subir cada documento el sistema genera alertas automáticas a los docentes para verificar el estado de cada proyecto y ser el soporte para mitigar riesgos y aprovechar oportunidades de mejora para cada equipo.

| EAFIT Interactiva                                    |                                     |
|--|-------------------------------------|
| IP0257 - PROYECTO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS Y EQUIPOS |                                     |
| <b>Recepción de Trabajos</b>                         |                                     |
| Informe de Avance 1                                  | Fecha Inicio: 2014/02/27 01:00 P.M. |
| Ver Entregas   | Fecha Fin: 2014/08/25 08:00 A.M.    |
| Informe de avance 2                                  | CERRADO                             |
| Ver Entregas   | Fecha Inicio: 2014/03/06 01:12 P.M. |
|  | Fecha Fin: 2014/03/07 03:00 A.M.    |
| Informe de avance 3                                  | CERRADO                             |
| Ver Entregas   | Fecha Inicio: 2014/03/12 06:00 P.M. |
|  | Fecha Fin: 2014/09/06 03:00 P.M.    |
| Informe de avance 4                                  | CERRADO                             |
| Ver Entregas   | Fecha Inicio: 2014/03/20 08:00 P.M. |
|  | Fecha Fin: 2014/03/22 08:00 P.M.    |

Fig. 9: Repositorios de EAFIT Interactiva (EI) para cada entregable.

#### D. Planeación y ejecución de casos prueba de producto

Una vez se liberan partes del sub-ensamble fabricado, se da comienzo a la etapa de pruebas. Para esta etapa se debe comparar el componente entregado con los requerimientos del usuario en el backlog y determinar si se está alcanzando o no el criterio de aceptación. La planeación de la prueba para este contexto específico consiste en recopilar en un documento los objetivos de las pruebas (Cumplir en primera instancia con los criterios de aceptación) y los elementos que son necesarios para poder realizarlas, junto con un criterio de salida de las mismas. Una vez se tenga este input, se procede con la construcción del diseño de la prueba en la cual los objetivos

previamente escritos se transforman en casos de prueba y condiciones tangibles para la misma.

Por ultimo para realizar la prueba se procede de un modo simple. En el método propuesto se transforma cada criterio de aceptación en un escenario de prueba y un resultado esperado que elimina la subjetividad a fin de que, si se reproduce el escenario para el sub-ensamble el criterio de aceptación será cumplido si y solo si, se produce el resultado esperado de manera repetible conservando trazabilidad entre lo requerido y lo obtenido. Estos resultados se documentan en el formato de pruebas (ver Fig. 10), se cargan los resultados en la plataforma EI y dependiendo de los requisitos cumplidos se determina si se continúa al siguiente ciclo (sub-ensamble) o si por el contrario se deben ajustar los elementos.

| ID_Aceptacion | Reproduce el resultado esperado | Comentarios |
|---------------|---------------------------------|-------------|
| Acp_001       | [SI]/[NO]                       |             |
| Acp_002       | [SI]/[NO]                       |             |
| Acp_003       | [SI]/[NO]                       |             |

Fig. 10: Formato de resultado de pruebas.

Es importante mencionar que al estudiante se le brinda la instrucción bajo la cual debe determinar elementos críticos del componente recibido y que tendrían afectación para el usuario final. De este modo, se evita tener pruebas extensivas que puedan afectar el proyecto en tiempos, esfuerzo y costos excesivos. Además, en estas pruebas deberán estar presentes los docentes en rol de usuarios para así aportar de manera temprana a la corrección de defectos y evitar la propagación de fallas, según Pettersson & Nilsson (2011) involucrar a los usuarios en etapas tempranas de desarrollo puede traer una reducción de defectos considerable y ajustes más ágiles dado que parte de los requerimientos se quedan en opiniones verbales (Ver Fig.11).



Fig. 11: Pruebas finales de aceptación al prototipo.

### E. Liberación, evaluación y priorización del siguiente ciclo.

La liberación es el proceso que ocurre una vez se han cumplido con los ítems más críticos para el docente y se determina que el resultado de la iteración cumple con los criterios de calidad requeridos. En la liberación puede ocurrir que como parte de la siguiente iteración se incluyan mejoras (Requerimientos) al sub-ensamble que acaba de ser liberado y se encuentra en estado funcional.

Como parte final del ciclo se toman nuevamente los requisitos para proceder con la evaluación y priorización de trabajo para las siguientes iteraciones. Esto, con el fin de entregar de manera más rápida los ítems que agregan más valor para el usuario y seguir avanzando en el desarrollo del alcance del proyecto.

En conclusión, este proceso será iterativo hasta lograr los objetivos del proyecto. Al final cuando se tienen todas las iteraciones ensambladas, el estudiante hace una presentación (Expo-ingenierías) ante la universitaria mostrando la maquina en estado funcional durante toda la exposición.

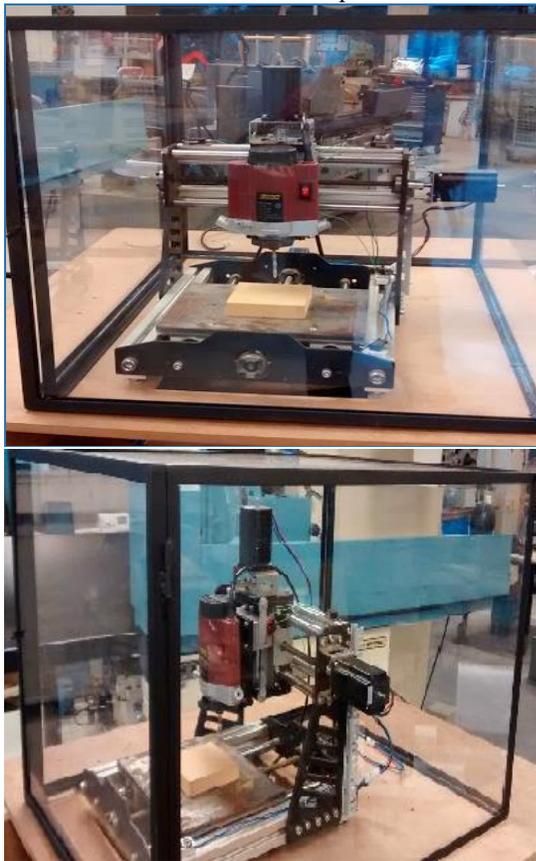


Fig. 12: Liberación del prototipo.

## IV. CONCLUSIONES

La metodología implementada con enfoque en la estrategia de PLM para el diseño y construcción de máquinas ha demostrado ser eficaz y eficiente en el uso de tiempo y recursos, permitiendo guiar a los equipos de trabajo

académicos a través de un proceso iterativo con alta flexibilidad y dinamismo sin perder trazabilidad de la información desde el inicio hasta el fin del proyecto.

En cuanto a la gestión de la información, la estrategia logró conservar el 100% de la información del proyecto en una plataforma con acceso a todos los estudiantes de manera controlada haciendo una administración básica de roles/perfiles dentro de la misma, lo cual sin restringir los permisos de lectura hacía que se pudiera dar una administración de proyectos colaborativa entre todos los interesados. Lo cual comparativamente con otras versiones de proyecto no se había logrado, no por falta de la plataforma EL, sino más bien porque nunca se le había dado el enfoque hacia PLM y la gestión de información entorno a las tecnologías CAD, CAM, CAE.

Si bien las metodologías ágiles permiten desarrollar resultados y alcanzar metas pequeñas es importante mencionar que el éxito de esta depende en gran medida de pautas o guías como las brindadas por un proceso estructurado de diseño detallado. El cual siendo bien utilizado puede brindar grandes ventajas en cuanto a reutilización de información, modelos y además garantizar trazabilidad entre conceptos y modelos físicos en 3D facilitando el trabajo colaborativo entre áreas interdisciplinarias.

El marco de fundamentación del PMI utilizado en estudiantes de semestres avanzados permite ubicar de una manera más eficiente en el que hacer del ingeniero en su vida profesional y aclarar expectativas. Si bien este marco de fundamentación es robusto, si se utiliza de manera adecuada con la información básica que necesita el estudiante, el equipo luego será capaz de colaborar de manera conjunta en la utilización de herramientas que se ajusten a su necesidad. Además, un punto importante a mencionar es que con los conceptos homologados el estudiante termina en capacidad de comunicarse en un lenguaje común con áreas de diferentes departamentos pudiendo escalar de manera más efectiva inquietudes, alertas, sugerencias llegando inclusive a una buena administración de la priorización de tareas.

El presente caso de estudio se puede notar de manera transversal la forma en la que los equipos de proyecto y el equipo de docentes hacen uso las herramientas institucionales que tiene la universidad EAFIT para la gestión de este proyecto. Sin embargo, lo documentado en el presente artículo es escalable a otras instituciones. Para lograrlo, se sugiere hacer uso de diferentes herramientas y sistemas de información a fin de reproducir lo que se ha registrado con las mismas etapas, enfoque estratégico y metodológico. Entre las aplicaciones con las que podría utilizarse el presente enfoque se sugiere: Microsoft office 365, Openoffice, Microsoft Sharepoint, Microsoft Onedrive, Dropbox o Copy como repositorios y herramientas para el tratamiento y gestión de la documentación e información de cada uno de los proyectos y equipos.

Por último, dados los resultados observados con la estrategia PLM para este tipo de proyectos, se sugiere llevar la administración de información del producto, en conjunto con la metodología y el marco de fundamentación aplicado a un sistema de información de PLM como: Autodesk PLM, Enovia Teamcenter, Oracle Agile PLM o SAP PLM. Los cuales teniendo tecnología de punta podrían mostrar mejores resultados al dar la oportunidad de hacer una aplicación más profunda del trabajo colaborativo e ingeniería concurrente.

#### REFERENCIAS

- [1] Project Management Institute, Inc., *Guía del PMBOK*. Newtown Square, Pensilvania, 2013.
- [2] B. Lee y J. Miller, «Multi-Project Management in Software Engineering Using Simulation Modelling», *Softw. Qual. J.*, vol. 12, n.º 1, pp. 59-82, mar. 2004.
- [3] R. Mott, *Diseño de elementos de maquinas*. México: Prentice Hall, 2006.
- [4] R. Budynas, *MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*. MCGRAW-HILL, 2014.
- [5] F. Mas, R. Arista, M. Oliva, B. Hiebert, I. Gilkerson, y J. Rios, «A Review of PLM Impact on US and EU Aerospace Industry», *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 1053-1060, 2015.
- [6] S. Ruiz Arenas, «Methodology for PLM implementations», 2012.
- [7] E. Vezzetti, M. Alemanni, y J. Macheda, «Supporting product development in the textile industry through the use of a product lifecycle management approach: a preliminary set of guidelines», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 79, n.º 9-12, pp. 1493-1504, mar. 2015.
- [8] N. Bouikni, L. Rivest, y A. Desrochers, «A Multiple Views Management System for Concurrent Engineering and PLM», *Concurr. Eng.*, vol. 16, n.º 1, pp. 61-72, mar. 2008.
- [9] R. Mejia y A. Molina, «Tecnologías de información para ingeniería concurrente», en *Ingeniería Concurrente: Una metodología integradora*, 2006.
- [10] C. Ebert y J. D. Man, «Effectively utilizing project, product and process knowledge», *Inf. Softw. Technol.*, vol. 50, n.º 6, pp. 579-594, may 2008.
- [11] IEEE, «IEEE Guide--Adoption of the Project Management Institute (PMI(R)) Standard A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK(R) Guide)--Fourth Edition». 2011.
- [12] C. Ebert, «Improving engineering efficiency with PLM/ALM», *Softw. Syst. Model.*, vol. 12, n.º 3, pp. 443-449, may 2013.
- [13] G. Ducellier, P.-A. Yvars, y B. Eynard, «Managing design change order in a PLM platform using a CSP approach», *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, vol. 8, n.º 3, pp. 151-158, mar. 2014.
- [14] C. Castillo y T. Lorenzana, «Evaluation of business scenarios by means of composite indicators», *Bus. Scenar. Means Compos. Indic. Fuzzy Econ. Rev.*, vol. 15, pp. 3-20, 2010.
- [15] H. Villa, *Un Método para la Definición de Indicadores Clave de Rendimiento con base en Objetivos de Mejoramiento / An Improvement-goal-based method for defining Key Performance Indicators*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [16] D. Barone, L. Jiang, D. Amyot, y J. Mylopoulos, «Reasoning with Key Performance Indicators», en *The Practice of Enterprise Modeling*, P. Johannesson, J. Krogstie, y A. L. Opdahl, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 82-96.
- [17] Z. Xu, X. G. Ming, W. Song, L. He, y M. Li, «Collaborative Project Management: A Systemic Approach to Heavy Equipment Manufacturing Project Management», *Syst. Pract. Action Res.*, vol. 27, n.º 2, pp. 141-164, dic. 2012.
- [18] M. Alemanni, G. Alessia, S. Tornincasa, y E. Vezzetti, «Key performance indicators for PLM benefits evaluation: The Alcatel Alenia Space case study», *Comput. Ind.*, vol. 59, n.º 8, pp. 833-841, oct. 2008.
- [19] M. G. Violante y E. Vezzetti, «A methodology for supporting requirement management tools (RMt) design in the PLM scenario: An user-based strategy», *Comput. Ind.*, vol. 65, n.º 7, pp. 1065-1075, Setiembre 2014.
- [20] G. Pintzos, M. Matsas, y G. Chryssolouris, «Defining Manufacturing Performance Indicators Using Semantic Ontology Representation», *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 8-13, 2012.
- [21] J. L. R. Ochoa, J. L. B. Pérez, y L. F. Z. Rivera, «Resultados experimentales de la aplicación de un sistema de evaluación dinámico en la asignatura de Estática», *Lat. Am. Caribb. J. Eng. Educ.*, vol. 7, n.º 1, ago. 2013.
- [22] Project Management Institute, Inc., «PMI: Código de Ética y Conducta Profesional del Project Management Institute». 2006.
- [23] I. sommerville, *Software Engineering*, Ninth. Pearson education Inc., 2010.
- [24] T. Dingsøyr, S. Nerur, V. Balijepally, y N. B. Moe, «A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development», *J. Syst. Softw.*, vol. 85, n.º 6, pp. 1213-1221, jun. 2012.
- [25] L. Tal, «Building the Product Backlog», en *Agile Software Development with HP Agile Manager*, Apress, 2015, pp. 53-70.
- [26] «Diseño detallado», *soporte PTC*. [En línea]. Disponible en: [http://support.ptc.com/WCMS/files/43561/es/2071\\_Det\\_Design\\_EVRM\\_TS\\_ES.pdf](http://support.ptc.com/WCMS/files/43561/es/2071_Det_Design_EVRM_TS_ES.pdf).
- [27] S. Cirella, M. Guerci, y A. B. (Rami) Shani, «A Process Model of Collaborative Management Research: The Study of Collective Creativity in the Luxury Industry», *Syst. Pract. Action Res.*, vol. 25, n.º 3, pp. 281-300, nov. 2011.