



Revista EAN
ISSN: 0120-8160
Universidad EAN

Cabrera-Arias, Carlos Arturo; Garay-Rairan, Fabián Steven;
Contreras-Gutiérrez, Diana Carolina; Gómez-Vargas, Oscar Edilson
Modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación:
caso de estudio banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU1
Revista EAN, no. 89, 2020, July-December, pp. 235-256
Universidad EAN

DOI: <https://doi.org/10.21158/01208160.n89.2020.2819>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20669889013>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Scientific Information System Redalyc
Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and Portugal
Project academic non-profit, developed under the open access initiative

Modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación: caso de estudio banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU¹

DOI: <https://doi.org/10.21158/01208160.n89.2020.2819>

Carlos Arturo Cabrera-Arias²
Escuela de Aviación Ejército Nacional (ESAVE)
carlo0075@gmail.com

Fabián Steven Garay-Rairan³
Escuela de Aviación Ejército Nacional (ESAVE)
fabiangarayrairan@cedoc.edu.co

Diana Carolina Contreras-Gutiérrez⁴
Escuela de Aviación Ejército Nacional (ESAVE)
dianacontrerasgutierrez@cedoc.edu.co

Oscar Edilson Gómez-Vargas⁵
Escuela de Aviación Ejército Nacional (ESAVE)
oscar.gomezvar@buzonejercitomil.co

Fecha de recepción: 17 de abril de 2020

Fecha de aprobación: 12 de noviembre de 2020

Fecha de publicación: 18 de marzo de 2021



Cómo citar este artículo / *To reference this article / Comment citer cet article / Para citar este artigo:*
Cabrera-Arias, C. A.; Garay-Rairan, F. S.; Contreras-Gutiérrez, D. C.; Gómez-Vargas, O. E. (2020). Modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación: caso de estudio banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (89), 235-256. DOI: <https://doi.org/10.21158/01208160.n89.2020.2819>

Resumen

La Escuela de Aviación del Ejército Nacional de Colombia desarrolla desde hace un tiempo proyectos de innovación en tecnología sin modelos de gestión que respondan a las características de los productos y las necesidades de la industria aeronáutica. Por esta razón, se presenta un modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología dirigido a este campo, integrando buenas prácticas de gestión de proyectos desde el análisis y el desarrollo de productos, modelos y estándares internacionales de la ingeniería para su aplicación en futuros proyectos. El modelo construido se aplicó al diseño de un banco de pruebas digital

¹ Los resultados de la investigación que se presentan en el artículo son producto del proyecto de investigación «Diseño y fabricación del banco portátil digital para las pruebas caza fallas de la GCU —Generator Control Unit— de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350, ejecutado por la Escuela de Aviación del Ejército Nacional y financiado por la Dirección de Ciencia y Tecnología del Ejército». La fase del proyecto de investigación es un desarrollo tecnológico con modelo de madurez nivel 4. La fecha de inicio es del 2017 y de finalización el 2019.

² Ingeniero Electrónico, Fundación Universitaria Los Libertadores. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5230-3941>

³ Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Especialista en Gestión de Proyectos de la Universidad Piloto de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8863-5673>

⁴ Administradora Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Especialista en formulación y evaluación social y económica de proyectos de la Universidad Católica de Colombia; Magíster en desarrollo y gerencia integral de proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8996-5348>

⁵ Profesional en ciencias militares de la Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova; Magíster en Gerencia de proyectos Universidad Militar Nueva Granada. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5371-9444>

para las pruebas caza fallas de la GCU —*Generator Control Unit*— de las aeronaves Beechcraft King, en las que se analizó su aplicación en cada una de las fases del desarrollo del proyecto y el resultado final respecto a tiempos, costos y alcance. Como resultado fue posible determinar que el modelo contribuyó a la correcta gestión en cada fase del proyecto y aseguró un cumplimiento adecuado del tiempo y los procedimientos técnicos y de calidad, en comparación con otro proyecto ejecutado sin el uso del modelo. La evaluación del modelo permitió verificar también la innovación del producto que para este caso fue de enfoque estructural, por lo que se puede considerar como modelo integrado IIP —Integrate, Innovation, Process—, lo que permite la generación de nuevo conocimiento y de nuevos modelos de negocio en fases posteriores de maduración y futura comercialización.

Palabras clave: industria aeronáutica; proyectos de innovación; modelo de gestión; innovación en tecnología; gestión de proyectos; gestión de innovación; desarrollo tecnológico.

Model for the development of innovation projects in aviation technology: case study - —□— **digital test bench or GCU troubleshooting tests**

Abstract

For some time now, the Colombian National Army Aviation School has been developing technology innovation projects without management models that respond to the characteristics of the products and the needs of the aeronautical industry. For this reason, this document presents a model for the development of technology innovation projects focused on this field, integrating good project management practices from the analysis and development of products, models, and international engineering standards for their application in future projects. This model was applied to the design of a digital test bench for the Generator Control Unit (GCU) troubleshooting tests on the Beechcraft King aircraft, where we analyzed its application in each phase of development of the project and the final result regarding time, costs, and scope. As a result, it was possible to determine that the model contributed to the correct management of the project in each phase, and ensured adequate compliance with time, and technical and quality procedures, compared to another project executed without the use of the model. The evaluation of the model also made it possible to verify the innovation of the product, which in this case had a structural approach, so it can be considered an IIP (Integrate, Innovation, Process) integrated model, allowing the generation of new knowledge and new business models in later phases of maturation and future commercialization.

Keywords: aeronautical industry; innovation projects; management model; technology innovation; project management; innovation management; technological development.

Modelo para o desenvolvimento de projetos de inovação em tecnologia de aviação:estudo —□— **de caso de banco de provas digital para testes de caça de falhas da GCU**

Resumo

A Escola de Aviação do Exército Nacional da Colômbia vem desenvolvendo há algum tempo, projetos de inovação em tecnologia sem modelos de gestão que atendam às características dos produtos e às necessidades da indústria aeronáutica. Por esse motivo, é apresentado um modelo para o desenvolvimento

de projetos de inovação tecnológica voltados para esta área, integrando boas práticas de gestão de projetos a partir da análise e desenvolvimento de produtos, modelos e padrões internacionais de engenharia para a sua aplicação em projetos futuros. O modelo construído foi aplicado ao desenho de um banco de provas digital para o GCU -Generator Control Unit- das aeronaves Beechcraft King, nas quais sua aplicação foi analisada em cada uma das fases de desenvolvimento do projeto e o resultado final foi sobre os tempos, custo e escopo. Como resultado, foi possível constatar que o modelo contribuiu para o correto gerenciamento em cada fase do projeto e garantiu o cumprimento adequado dos prazos e procedimentos técnicos e de qualidade, em comparação com outro projeto executado sem a utilização do modelo. A avaliação do modelo permitiu também verificar a inovação do produto, que para este caso foi de abordagem estrutural, e pode ser considerado como um modelo IIP integrado -Integrar, Inovação, Processo-, que permite a geração de novos conhecimentos e novos modelos de negócios em estágios posteriores de maturação e futura comercialização.

Palavras-chave: indústria aeronáutica; projetos de inovação; modelo de gestão; inovação em tecnologia; gestão de projetos; gestão da inovação; desenvolvimento tecnológico.

Modèle de gestion de projet en innovation technologique pour le secteur aéronautique:étude de cas d'un banc d'essai numérique pour des tests de résolutions de pannes de GCU

Résumé

L'École d'aviation de l'armée nationale de Colombie développe des projets d'innovation technologique, sans modèles de gestion, répondant aux caractéristiques des produits et aux besoins de l'industrie aéronautique. Cette étude tentera de répondre à cette problématique en présentant un modèle de gestion pour développer de futurs projets d'innovation technologique dans ce domaine et intégrer de bonnes pratiques de gestion sur la base de l'analyse et du développement de produits, de modèles et de normes agréées en ingénierie internationale. Ce nouveau modèle de gestion a été utilisé lors de la conception d'un banc d'essai numérique pour des tests GCU (Generator Control Unit) afin de rechercher des pannes sur des avions Beechcraft King. L'application du modèle a été analysée lors de différentes phases de développement du projet ainsi que sur le résultat final en termes de temps, coût et bénéfices. Il a été possible de déterminer que ce modèle a contribué à la bonne gestion de chaque phase du projet et a permis de respecter les délais et procédures techniques et de qualité. L'évaluation du modèle de gestion a également permis de vérifier l'innovation du produit - ici une approche structurelle - et peut donc être considéré comme un modèle IIP (Integrated Innovation Process) permettant la création de nouvelles connaissances et de nouveaux modèles d'entreprise en stade de maturité avancé ou de pré-commercialisation.

Mots-clés: entrepreneuriat; entrepreneuriat durable; culture d'entrepreneuriat durable; diagnostic de l'entrepreneuriat; développement durable.

1. Introducción

La industria aeroespacial y aeronáutica ha tenido un gran impacto en la interacción entre el sector privado y el gubernamental, de manera que llega a realizar acciones mutuas para la consolidación de diversas instituciones de apoyo y el desarrollo de la industria, enfocadas en el fortalecimiento de la innovación y el desarrollo de proyectos tecnológicos (Landoni y Ogilvie, 2019). Si bien los proyectos tecnológicos en aviación en Colombia se han desarrollado a través de procesos de gestión tradicionales, basados en los criterios básicos de la metodología de investigación, muchas veces son poco eficientes y no llegan a una transferencia del conocimiento exitosa.

El Ejército Nacional, como institución pública, ha incursionado en la industria aeronáutica, de modo que hace parte del sector aeronáutico a través de la Aviación del Ejército Nacional (Documento CONPES 3582, 2016). A partir del 2010 implementó procesos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación para la realización de proyectos que permitieran la obtención de productos de mantenimiento aeronáutico, con el fin de suplir sus necesidades. Durante este tiempo se ha especializado en la construcción de los bancos de pruebas digitales para el mantenimiento de aeronaves tales como Beech 350 King Air, CASA C-212, Cessna 208, Caravan y Antonov AN-32, pertenecientes al Ejército Nacional de Colombia.

Son amplios los desafíos si se tiene en cuenta el aumento de las necesidades de la industria de la aviación, entre las cuales, según Moallemi, Shannon, Jafer, Raja y Thigpen (2019), se incluyen el creciente tráfico aéreo y el rápido avance tecnológico de las aeronaves, lo que obliga a las instituciones en este campo a realizar diseños e implementar nuevos proyectos tecnológicos y de innovación de manera constante.

En el ámbito nacional colombiano, el sector aeronáutico se propone para el 2030 desarrollar capacidades con miras a la independencia tecnológica y aumentar el 30 % de los proyectos de investigación, así como el desarrollo productivo en este campo (Documento CONPES 3582, 2016). Es por esto que desde la Escuela de Aviación del Ejército Nacional y su Centro de Investigación se direccionan proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en diversas áreas de la aviación, especialmente en el mantenimiento aeronáutico de aeronaves de ala fija.

En un análisis sobre el desempeño gerencial de los últimos diez proyectos desarrollados por el centro, principalmente en el cumplimiento de la triple restricción alcance, cronograma y costo, se puede evidenciar que los proyectos no han presentado inconvenientes para el cumplimiento del alcance en términos de resultados de investigación. Sin embargo, a fin de materializar la producción científica se han presentado problemas por depender de unidades terceras para los trámites de propiedad intelectual.

En cronograma, el 80 % de los proyectos han presentado retrasos en su ejecución, lo que ha llevado al investigador a solicitar prórrogas con el fin de cumplir con el alcance. En cuanto al costo, para los proyectos financiados con recursos propios del Ejército Nacional se debe planear y ejecutar el presupuesto antes de la ejecución técnica del proyecto, dejando como riesgo no tener un recurso asignado para imprevistos. Ahora bien, aunque el 100 % de los proyectos no han necesitado recursos adicionales a los planeados, los investigadores han hecho uso de contrapartidas o en la planeación del presupuesto solicitan insumos adicionales con miras a prevenir insuficiencia de materiales en la ejecución técnica del proyecto.

El presente artículo nace de la necesidad de innovar en el sector aeronáutico y así presentar un modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología dirigidos a la aviación. Esto, dado que son la innovación y la investigación factores que influyen de forma positiva en la industria aeronáutica y son fundamentales para el desarrollo del sector a nivel mundial (Chamónica y Gómez, 2017). A fin de sustentar el modelo, desde los preliminares se abordan conceptos y técnicas de innovación, así como el estudio de modelos de referencia aplicados a sectores tecnológicos y del sector de la aviación.

Con este trabajo se presenta un modelo para el desarrollo de proyectos que permita su gestión eficiente desde la innovación en tecnología, integrando buenas prácticas de gestión de proyectos desde el análisis y el desarrollo de productos,

basados en modelos y estándares internacionales de la ingeniería. De la misma forma, se presenta un caso de aplicación para el diseño de un banco de pruebas digital dirigido a las pruebas caza fallas de la GCU —Generator Control Unit—, de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350.

El documento inicia con la sección de preliminares en la que se indaga sobre algunos conceptos y referentes de modelos para gestión de la innovación tecnológica y metodologías tales como TRIZ, las cuales sirvieron como base para la fundamentación teórica del modelo. Posteriormente, se presentan los insumos en la construcción del modelo y las fases desarrolladas en detalle; finalmente, se presenta el caso de aplicación y el resultado fase. Se concluye con la comparación de un proyecto B desarrollado sin el uso de modelo, a manera de referencia.

2. Preliminares

2.1 Conceptos y técnicas de innovación

Se puede encontrar una gran variedad de técnicas a fin de procurar la gestión de la innovación, las cuales varían según su aplicación y uso. Entre las más relevantes en el área de la tecnología se encuentran cuatro categorías claramente diferenciables:

- innovaciones de producto o de proceso;
- innovaciones radicales o incrementales;
- *competence enhancing* o *competence destroying*;
- innovaciones de arquitectura o modulares.

2.1.1 Innovaciones de producto o de proceso.

Esta categoría se basa en la naturaleza de la propia innovación, pues es la que se incorporan a un producto o un servicio. Las innovaciones en los procesos hacen referencia a cambios en la forma en

la que las instituciones desarrollan sus actividades y se orienta al mejoramiento de su eficiencia o eficacia, así como suponen un incremento en la competitividad institucional. Las innovaciones de producto, por su parte, se hacen más visibles debido a que introducen en el mercado un producto o servicio mejorado y novedoso en relación con sus características, especificaciones, su tecnología, sus finalidades o prestaciones. Las innovaciones de producto y de proceso no son excluyentes la una de la otra y pueden enlazarse mutuamente, por lo que pueden revolucionar industrias clásicas, como, por ejemplo, el caso de la aeronáutica en Colombia (Ribechini, 2014).

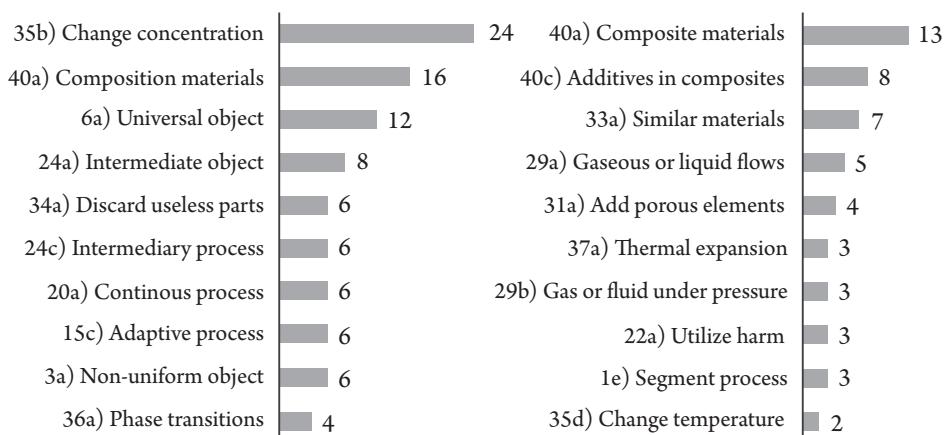
2.1.2 TRIZ.

TRIZ es la sigla rusa para *Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach* —Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva—. Es una metodología

basada en el conocimiento, propuesta en 1946 por el ingeniero y científico ruso Genrikh Altshuller, construida al revisar 200 000 patentes, clasificadas por su principio inventivo. La definió como un «proceso sistemático, permite a cualquier técnico desarrollar significativamente sus habilidades de pensamiento crítico y fomentar sus capacidades tanto inventiva como creativa para la resolución de problemas» (Torrubiano, 2013, p. 13). Con esta teoría fue posible identificar los pasos necesarios aplicables a futuras nuevas invenciones con la identificación de 39 parámetros ingenieriles y cuarenta principios inventivos.

Ahora bien, nuevas investigaciones y análisis, especialmente en el área de la ingeniería de procesos, amplían este espectro, lo que arroja como resultado la lista completa de 160 operadores inventivos en el marco de cuarenta principios inventivos de TRIZ (Livotov, Chandra-Sekaran, Law y Reay, 2019). En la figura 1 se presenta una clasificación de los subprincipios de innovación más frecuentes encontrados en invenciones.

Figura 1. Subprincipios de innovación más frecuentes encontrados



Nota. Los diez subprincipios de innovación más frecuentes encontrados en 150 documentos de patente en [%]: izquierda-farmacéutico; derecha-operaciones cerámicas.

Fuente. Livotov *et al.*, 2019.

La metodología TRIZ se aplica, esencialmente, para la resolución de problemas a través de la determinación de cinco niveles de solución, Nivel 1-elemental —sin invención—, este nivel está caracterizado por ser el de las soluciones ya conocidas y con información fácilmente accesible; Nivel 2-mejora, integra algunas mejoras a las ya existentes; Nivel 3-invención dentro del paradigma, en el que las mejoras que se aplican son esenciales; Nivel 4-invención fuera del paradigma, aquí las soluciones son conceptuales y se aplican a la generación de una novedad, de modo que se hacen cambios en los principios y comportamientos ya existentes; por último, el Nivel 5-descubrimiento,

también llamado «invención pionera», el cual se aplica a soluciones o sistemas esencialmente nuevos (Livotov *et al.*, 2019).

2.2 Referentes en modelos para gestión de la innovación tecnológica

El sector aeronáutico está condicionado a la integración de los últimos avances tecnológicos, lo cual provoca que la incertidumbre aumente debido a la falta de datos acumulados. Además, los proyectos en las instituciones de investigación y desarrollo aeronáutico se han vuelto grandes y complejos (Ahn, Kim y Choi, 2018). Estos proyectos son un conjunto

temporal de actividades con altos riesgos, destinados a cumplir con el descubrimiento científico y la producción de nuevos conocimientos materializados en productos (Forozandeh, Teimoury y Makui, 2019).

En consecuencia, se ha reconocido la importancia de ocurrencia de diferentes riesgos para el desarrollo de proyectos de desarrollo tecnológico e innovación en la industria aeronáutica, por lo cual para la alta dirección es fundamental tomar decisiones con base en sistemas de gerencia y gestión a fin de operar las organizaciones con éxito y obtener eficiencia en el desarrollo de los productos; finalmente, busca lograr avances significativos en la industria (Ahn *et al.*, 2018; Bonzel, 2017; Zhu, Bricogne, Durupt, Remy y Eynard, 2016).

La gestión activa de proyectos permite la mitigación de riesgos en una cartera de proyectos de investigación (Goldstein y Kearney, 2020). De lo contrario, según McCurdy (2013), una incorrecta aplicación de técnicas desarrolladas para la gerencia de proyectos genera una serie de proyectos problemáticos en la innovación. De esta manera, a medida que la ciencia y la tecnología se han convertido en una tendencia de convergencia en el sector aeronáutico, los proyectos se han vuelto grandes, complejos y diversificados y, por tanto, requieren una toma de decisiones rápida, razonable y objetiva para llevar a cabo proyectos con éxito (Ahn *et al.*, 2018).

Las organizaciones ahora se ven obligadas no solo a introducir continuamente nuevos productos, sino también a acortar los tiempos de desarrollo, a reducir costos y mejorar la variedad y la calidad de sus productos (Bonzel, 2017). Para Goldstein y Kearney (2020), en proyectos de investigación y desarrollo tecnológico con ocurrencia, el personal modifica proyectos frecuentemente, en especial plazos, de modo que estos cambios son sensibles en buen rendimiento. También se encuentra que estos proyectos tienen una línea de tiempo corta

y un presupuesto reducido, lo que genera menos probabilidades de generar resultados a corto plazo. En este sentido es evidente la práctica de la gestión de proyectos con el fin de mejorar la productividad de financiación.

Para la gerencia de proyectos de desarrollo tecnológico Fernandes, Moreira, Araújo, Pinto y Machado (2018) identifican un modelo con 32 prácticas, de las cuales quince son gerencia ágil, tres en cascada y las catorce restantes transversales. En cuanto a proyectos de aviación militar, Monroy y Ramírez (2018) proponen para la gestión de proyectos estratégicos en la División de Aviación Asalto Aéreo del Ejército Nacional combinar elementos empresariales modernos con conceptos doctrinarios tradicionales del planeamiento militar, emitiendo una guía gerencial con miras a reducir tiempos y optimizar recursos.

El desarrollo de proyectos tecnológicos en aviación ha tenido un gran impacto en la industria; principalmente, para la reducción de costos en el mantenimiento aeronáutico, el desarrollo de bancos de pruebas permite aumentar la frecuencia de pruebas a un menor riesgo. Mickels *et al.* (2019) desarrollaron un banco de pruebas de motor de cohete móvil como parte de los proyectos de investigación de motores ERPL (*Experimental Rocket Propulsion Lab*), en el cual en el diseño de banco se identificaron requerimientos tales como resistencias y sistemas de anclaje.

Para este prototipo se definieron como subsistemas estructura, sistema de montaje, sistema de anclaje y el sistema integrado de adquisición y control de datos. Nandana, Udaya y Manjunatha (2020) afirman que para el desarrollo de un banco de pruebas modular no se enfocan en la gerencia del desarrollo de proyecto, sin embargo, fundamentan para su elaboración la obtención de requisitos, la cual implica una serie de condiciones que debía cumplir el banco a fin de luego diseñarlo, fabricarlo e instalarlo y, finalmente, verificar mediante diferentes pruebas.

3. Metodología

3.1 Diseño del modelo

Para el diseño del modelo se identificaron diferentes estándares y metodologías tanto en el campo de la ingeniería como en el campo de la gerencia, además de modelos de innovación en el desarrollo de invenciones. Las metodologías utilizadas de proyectos de ingeniería tales como *Systems Engineering Management* (SEM), International Council on Systems Engineering (Incose), *Systems Engineering Research Center* (SERC) y la *IEEE Computer Society* (2018), son todas de gran robustez e implican un costo alto en su implementación.

Los estándares en gerencia de proyectos como los que plantean el *Project Management Institute* (PMI), Scrum o PRINCE2 «*Projects in Controlled Environments*» se centran en la dirección de proyectos bajo una generalidad y no en la generación de un producto de ingeniería específico, aunque sería de gran importancia la adaptación a una metodología con la cooperación y adecuación de PMI y SEM (Xue, Baron, Esteban y Zhang, 2014).

Finalmente, se tuvieron en cuenta estándares internacionales tales como ANSI/EIA 632:1998 (*Electronic Industries Alliance*, 1999), IEEE 1220-

2005 (IEEE, 2005), y 15288:2015 (ISO/IEC/IEEE, 2015). De cada estándar y/o metodología se desplegaron las capacidades primordiales que se alineen a la tecnología y a la aviación, para finalizar con una selección de actividades y herramientas que permitan una ruta de trabajo orientada al desarrollo de proyectos tecnológicos en aviación.

A fin de identificar las herramientas del modelo se realizó una evaluación de alternativas de los estándares en gerencia de proyectos y de metodologías para el desarrollo de proyectos en ingeniería, desarrollo tecnológico e innovación (véase la Tabla 1). En esta evaluación primero se determina el sector que utiliza estas herramientas, luego se usan los criterios necesarios para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología, como lo son capacidad y agilidad, así como criterios identificados como restricciones: control del tiempo y validación del alcance —cada criterio de restricción se reconoce como una de las falencias que presentan este tipo de proyectos—.

Tabla 1. Evaluación de alternativas

| Metodología | Sector | Capacidad | Agilidad | Control del tiempo | Validación del alcance |
|-------------|---------------------|---|----------|--|---|
| PMP | Todos los sectores. | Estándar para la gerencia de proyectos. | 2 | Determinar el estado del cronograma, identificar factores que generen y gestionen cambios. | Recopile requisitos, revise la aceptación formal de los entregables: control de calidad, criterios de aceptación, cumplimiento de requisitos. |
| PRINCE 2 | Todos los sectores. | Estándar para la gerencia de proyectos. | 3 | El control del tiempo se hace por cada fase. | Gestión de la entrega de productos: establecer requisitos, entregar trabajos por paquete. Control por fase: se entrega fase para aprobación de la siguiente fase. |

| | | | | | |
|---|--|--|---|---|---|
| SCRUM | Sector proyectos agiles — específicamente de <i>software</i> —. | Metodología para proyectos de alta incertidumbre. | 5 | Control diario del tiempo, reuniones de quince minutos y gráficas de control. | El <i>product backlog</i> en Scrum es una lista de características que han sido priorizadas y contiene descripciones de todo lo que se desea para el producto; es variable. |
| TRIZ | Sector que maneje procesos de innovación tecnológica. | Método para identificar capacidades inventivas — generar nuevos productos, diseños, patentes, prototipos—. | 5 | No aplica | Identifica la mejor solución en unas restricciones físicas y técnicas. |
| Incose | Sector de proyectos de ingeniería de sistemas, proyectos con alta complejidad tecnológica. | Estándares en ingeniería: identifica requisitos, especificaciones funcionales y técnicas: diseño conceptual y diseño preliminar. | 3 | No aplica | Actividad test en el ciclo de vida, evalúa el sistema de forma progresiva a lo largo de las fases y así evitar modificaciones. |
| SEM — <i>Systems Engineering Management</i> — | Sector de ingeniería en investigación y desarrollo. | Matriz de estructura de diseño, metodología de procesos de objetos. | 5 | No aplica | En un enfoque basado en modelos, la información sobre el sistema se captura en un modelo de sistema compartido, compuesto por un conjunto de modelos integrados apropiados para las etapas del ciclo de vida. Este modelo se gestiona y controla durante todo el ciclo de vida del sistema. |
| SERC — <i>Systems Engineering Research Center</i> — | Proyectos de ingeniería de sistemas. | Experiencia en el desarrollo de proyectos de innovación, permite el diseño, modelación y evaluación. | 3 | No aplica | Buenas prácticas en el desarrollo de proyectos en el área de sistemas. |
| Normas IEEE | Normas enfocadas al avance tecnológico en ingeniería de <i>software</i> y de sistemas. | Normas direccionalas a la normalización de productos y/o procesos de ingeniería. | 3 | No aplica | Estándares de calidad en proyectos de <i>software</i> . |
| ANSI | Normas para servicios, productos, procesos y sistemas. | Marco para el desarrollo de estándares y sistemas de evaluación de la calidad. | 3 | No aplica | Estandariza productos, servicios y procedimientos. |

Nota: 1 al 5, siendo 1 menos ágil.

Fuente. Elaboración propia con base en el análisis de estándares y metodologías en ingeniería y gerencia de proyectos.

El modelo propuesto para el desarrollo de proyectos tecnológicos en aviación integró diferentes actividades determinadas en los estándares y metodologías para proyectos, de modo que presenta un sistema ordenado con miras a la generación de innovación en los productos construidos y evalúa las capacidades requeridas en el desarrollo de proyectos tecnológicos que son más predominantes para cada una de sus fases. En la tabla 2 se presentan estas capacidades.

Tabla 2. Fases del modelo para el desarrollo de proyectos tecnológicos

| Estándar/ metodología | Criterio de selección | Fase | Actividad |
|------------------------------|--|-------------------------|--|
| TRIZ | Identificar capacidades. | Identificación de ideas | Proceso creativo |
| Project Management Institute | Los requisitos incluyen condiciones o capacidades que el proyecto o producto debe cumplir para satisfacer un acuerdo u otra especificación formalmente impuesta. | | Definición conceptual |
| Prince 2 | El enfoque en los productos: el producto del proyecto debe definirse de la manera más detallada posible y validación por fase. | Definición del producto | Requerimientos del producto |
| Scrum | El <i>product backlog</i> : lista de características que han sido priorizadas y contiene descripciones de todo lo que se desea para el producto, es variable. | | Formalización |
| Incose | Capacidad en la integración de proyectos en aeronáutica: línea de base funcional —análisis de viabilidad— revisión del diseño del sistema. | Diseño del producto | Diseño conceptual |
| SEM | Matriz de estructura de diseño, metodología de procesos de objetos. | | Selección de diseños |
| SERC | Experiencia en el desarrollo de proyectos de innovación, permite el diseño, la modelación y evaluación. | Construcción | <i>Hardware</i> <i>Software</i> Estructura |
| Normas IEEE | Normas direccionalas a la normalización de productos y/o procesos de ingeniería. | Validación | Lista de verificación |
| ANSI | Marco para el desarrollo de estándares y sistemas de evaluación de la calidad. | | Pruebas SAT |

Nota. Se analizaron nueve estándares y metodologías en ingeniería y gerencia de proyectos, y se determinaron cinco fases con sus respectivas actividades.

Fuente. Elaboración propia con base en el análisis de estándares y metodologías en ingeniería y gerencia de proyectos.

El modelo se divide en cinco fases: 1) identificación de las ideas, 2) definición del producto, 3) diseño del producto, 4) construcción, y 5) validación. Las tres primeras fases corresponden a una etapa de investigación y su selección de ideas de solución y definición de parámetros del producto tecnológico hasta su implementación final; la última corresponde al proceso de validación de la innovación aportada por el producto y la protección del conocimiento. A continuación, se describe cada fase del modelo.

3.2 Fase 1. Identificación de ideas

El proceso de innovación empieza con la creatividad como recurso principal y fuente para la generación de ideas. Este proceso metodológico de generación de ideas es la clave de éxito de las organizaciones innovadoras y ha sido utilizado en campos del conocimiento tan diversos como el de la construcción. Barrio, García y Solís (2011) señalan que se aplican ciertos pasos ordenados para el correcto desarrollo de las fases de identificación de ideas. El primero implica

hacer un reconocimiento de la situación actual del problema a resolver, a través de un cuestionario a los involucrados orientado a entender la situación actual de la organización con respecto a los problemas que se presentan.

Posteriormente, con la información anterior se define el camino principal a seguir, pensando en una solución específica. Finalmente, se profundiza en el tema

elegido por medio de otro cuestionario orientado al problema y camino seleccionado previamente, buscando posibles soluciones y recomendaciones (Barrio *et al.*, 2011). Adicionalmente, el modelo requiere del uso de la metodología TRIZ para determinar los parámetros y principios de inventiva útiles que permitan resolver el problema, con lo que se obtendrá la matriz de la tabla 3.

Tabla 3. Matriz del área aeronáutica de oportunidad

| Área aeronáutica de oportunidad | Proceso de aviación a mejorar | Párametros ingenieriles TRIZ | Principios de Inventiva TRIZ |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | |

Nota. Se debe incluir todos los procesos en la aviación susceptibles a mejora identificados en el problema a solucionar.

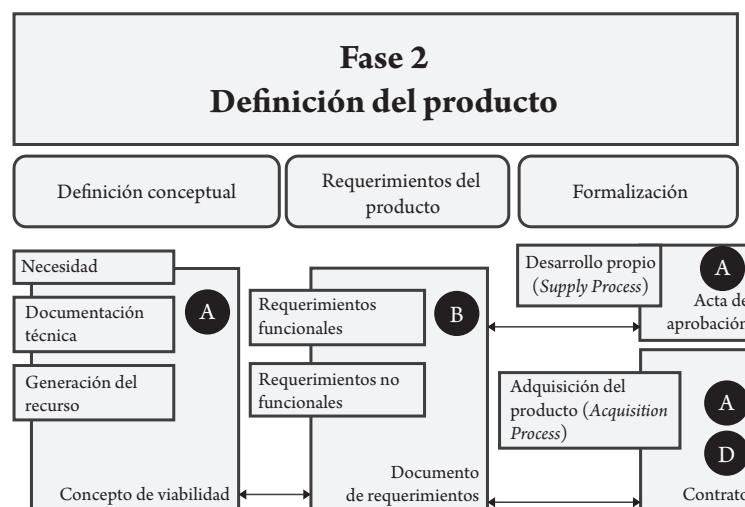
Fuente. Adaptado de Barrio *et al.*, 2011.

Como parte del proceso de investigación se incluye una revisión del estado del arte para la evaluación e identificación de las soluciones existentes, lo que contribuye a procurar la novedad de la solución final elegida. Esta fase inicial se apoya en modelos desarrollados por las grandes empresas que producen en masa como parte de procesos de innovación bien estructurados que facilitan la innovación incremental (Salerno *et al.*, 2015).

3.3 Fase 2. Definición del producto

La segunda fase, «Definición de las especificaciones del producto», presenta tres subsistemas que abarcan la definición conceptual del producto, los requerimientos y la formalización. El diagrama en bloques de esta fase se puede observar en la figura 2.

Figura 2. Fase 2. Definición del producto



Nota. Fase 2-definición del producto: definición conceptual, requerimientos del producto y formalización.

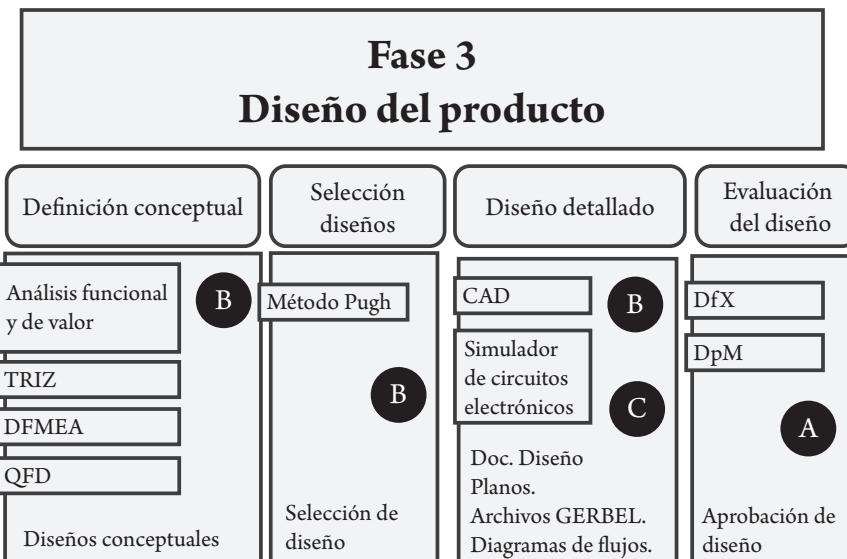
Fuente. Elaboración propia.

En esta fase cobra protagonismo el uso de modelos Agile que se han aplicado para el diseño y la optimización de múltiples configuraciones de aeronaves. Su uso en el sector aeronáutico se pensó para reducir tiempos de entrega en un 40 % con respecto a las técnicas convencionales del sector (Ciampa y Nagel, 2020).

3.3 Fase 3. Diseño del producto

La tercera fase, «Diseño», muestra el concepto de diseño planeado por el grupo de expertos y las subdivisiones del diseño. Esta fase, además, resalta el uso de las herramientas de diseño y el resultado permite definir la factibilidad del producto. Dentro de la fase se tiene el diseño conceptual de producto, la selección de diseños, el diseño detallado y la evaluación del diseño. En la figura 3 se puede apreciar la distribución de los bloques.

Figura 3. Fase 3. Diseño del producto



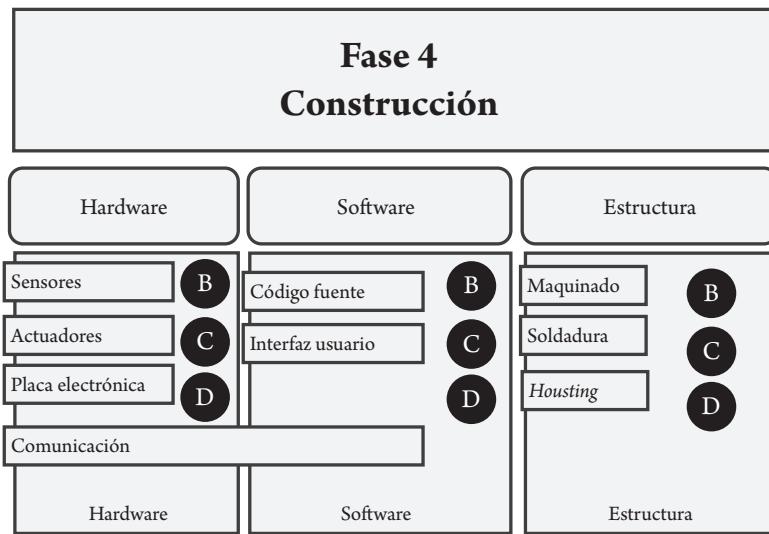
Nota. Fase 3. Diseño del producto, diseño conceptual, selección diseño, diseño detallado y evaluación del diseño.

Fuente. Elaboración propia.

3.4 Fase 4. Construcción

La cuarta fase «Construcción», se pensó teniendo en cuenta la característica de los proyectos que se presentan en la Escuela de Aviación del Ejército Nacional de Colombia e incluye la fabricación de la estructura, *hardware* y *software*, además de la integración de estos dos últimos para obtener el producto final. El detalle se encuentra en los bloques de la figura 4.

Figura 4. Fase 4. Construcción



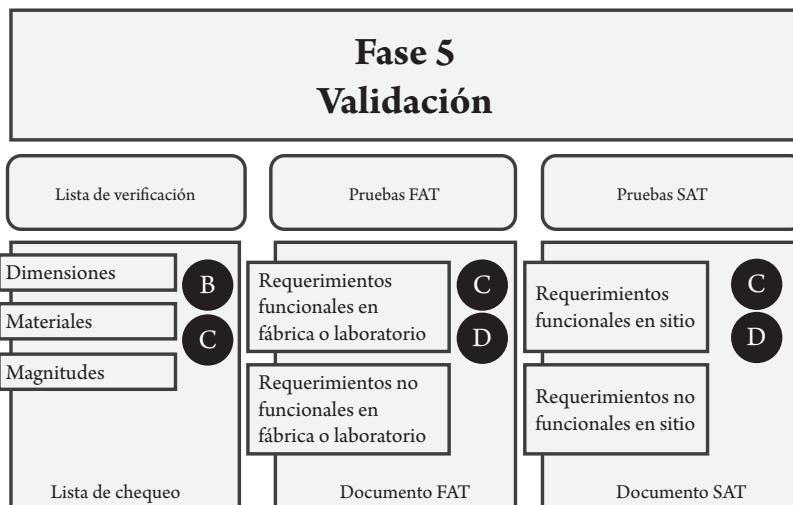
Nota. Fase 4 Construcción de hardware, software y estructura.

Fuente. Elaboración propia.

3.5 Fase 5. Validación

La quinta fase, «Validación», constituye las pruebas realizadas en campo y el análisis de los resultados. Esto permitirá reunir al grupo de expertos para plantear observaciones del producto; en caso de existir observaciones mayores se plantea una repotenciación y un reinicio del proceso. En la figura 5 se observan los bloques que componen esta fase. Para comprobar la eficiencia del modelo se realizó una analogía en el desempeño con relación a dos proyectos de la misma tipología. El desempeño se mide en tres características: gerencial —alcance, tiempo y costo—, técnica en el cumplimiento de los requerimientos y la innovación del producto.

Figura 5. Fase 5. Validación



Nota. Fase 5. Validación: lista de verificación, pruebas FAT y pruebas SAT.

Fuente. Elaboración propia.

4. Aplicación del modelo

4.1 Descripción

El caso práctico de aplicación consiste en desarrollar un banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU (Generator Control Unit) de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350. La unidad GCU de las aeronaves King Air se encuentra en una ubicación de difícil acceso, ya que se requiere levantar parte del piso de la aeronave para llegar a esta. El banco de prueba propuesto por el ATA 24 obliga al operador a realizar posiciones físicas, incómodas y de bajo nivel de ergonomía para la toma de medidas y el uso de multímetro; la selección de canal en el banco caza fallas de la GCU y el manejo del multímetro requieren que el operador se retire de donde se encuentra ubicada la GCU, lo que obliga al apoyo de un técnico adicional para realizar la prueba. El tiempo aproximado de la realización de la prueba depende en gran medida de la agilidad y maniobrabilidad del instrumento de medida por parte del operador.

En razón a lo anterior, el grupo de investigación de la Escuela de Aviación del Ejército desarrolló el banco portátil, el cual realiza de manera automática la selección de canal, la toma de medidas en el proceso caza fallas de la GCU, la interpretación de la información adquirida y la generación de informes técnicos de las pruebas. El concepto principal de los bancos de pruebas aeronáuticos desarrollados es la formulación de una triada *hardware, software* y estructura. Si bien el *hardware* y la estructura pueden ser una sola, por motivos que se refieren al diseño se toman por separados, de manera que el *hardware* se entenderá como la parte que representa la electrónica —circuitos electrónicos— y la estructura como la parte mecánica que soporta el *hardware* —base del banco—.

4.2 Resultados

Los resultados de la investigación se derivan del modelo para el desarrollo tecnológico de proyectos de innovación dirigidos a la aviación y, en el caso de estudio, en que se valida el modelo y se mide el desempeño respecto a otros proyectos.

4.2.1 Fase 1. Identificación de ideas.

El Bamav N.o 1 —Batallón de Mantenimiento de Aviones N.o 1 del Ejército Nacional de Colombia— implementa prácticas innovadoras, establecidas en el eje articulador del Plan de Transformación Institucional del Ejército Nacional de Colombia (Rojas, 2017). Este batallón se ha empeñado en mejorar los procesos de mantenimiento basado en la condición, identificando las partes de los motores de las aeronaves consideradas de alta rotación en el almacén.

Puntualmente, en este ejercicio se individualiza las GCU de aeronaves, las bujías y los elementos del subsistema de ignición según la ATA 74 o *Airline Transport Association* (Wyatt y Tooley, 2009). Ahora bien, para suplir la necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento se decide desarrollar un producto que automatice las pruebas de caza fallas del GCU bajo los parámetros del manual de mantenimiento, documentación TPE 331-5, Report No. 72-01-27 (Garrett, 1987).

En esta etapa se encontró como área de oportunidad la automatización de la selección de canal para la toma de medidas en el proceso caza fallas de la GCU y la adquisición de datos para la generación de informes, lo que aumenta la optimización en tiempos y el gasto de combustible de la aeronave. De igual manera, se encontró la necesidad de aumentar

el confort de los operadores de mantenimiento mejorando los procesos y protocolos de medición. Al hacer la revisión de las soluciones existentes a través de una búsqueda tecnológica, arroja como resultado la no existencia del producto o proyecto ideado dentro de las siguientes bases de datos:

- Colombia, Superintendencia de Industria y Comercio;
- Estados Unidos, USPTO;
- Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, OMPI/WIPO
- C. Europea, Epoline y Espacenet;
- China, SIPO GOV.

Cabe resaltar en este punto que los métodos aplicados para la recolección de los requerimientos los definen el grupo de expertos. En este caso se usan algunas herramientas como *mind maps*, *brainstorming* e identificación de eventos y casos de uso.

4.2.2 Fase 2. Definición del producto.

La segunda fase, «Definición de las especificaciones del producto», presenta tres subsistemas que abarcan la necesidad del producto, un acercamiento conceptual del funcionamiento de la GCU y sus protocolos de pruebas de caza falla expuestos en los manuales de mantenimiento, los requerimientos de las pruebas y la designación del desarrollador.

- Definición conceptual

En esta fase se realizó un acercamiento conceptual del funcionamiento de la GCU y sus protocolos de pruebas de caza falla expuestos en los manuales de mantenimiento, los requerimientos de las pruebas y la designación del desarrollador. De la misma forma, se revisó la documentación del fabricante y la experticia del personal de mantenimiento del Bamav N.o 1, quienes suministraron información de las pruebas que, por lo general, se realizan sobre la aeronave. En esta fase se desarrolló una definición conceptual del producto, la determinación de requerimientos funcionales (RF) y requerimientos no funcionales (RFN), así como su formalización.

La documentación del fabricante, las fichas de los mantenimientos realizados en el último periodo y la experticia del personal de mantenimiento proveen información de las pruebas e inspección de las GCU. Se hace referencia en especial al manual de mantenimiento de las aeronaves Beechcraft King Air C-90,200, B200, 300 y 350 ATA 24, con lo que se determinó la cantidad de canales a medir y el tipo de contacto que se debe utilizar para la selección de canal y la conexión del dispositivo de medida.

- Requerimientos del producto

Para la elaboración de los requerimientos es fundamental reunir un grupo de expertos en una junta denominada *kick off* o de arranque (Alvarado, 2012), la cual incluye técnicos de mantenimiento, líder de mantenimiento, desarrolladores de *software*, ingenieros mecánicos, electrónicos y aeronáuticos, líder del proyecto y personal del grupo de investigación.

Los requerimientos están divididos en dos grandes grupos: requerimientos funcionales (RF), que expresan las acciones a cumplir —el qué hacer—; mientras los requerimientos no funcionales (RFN) determinan las variables orientadas propias del producto —el qué tener—. El propósito final de este ejercicio es obtener un documento de requerimientos que permita la guía para concertar las actividades y los aspectos técnicos en la fase de diseño. En este caso, el trabajo se centraliza sus esfuerzos en las siguientes diez secciones:

- automatización —RF—
- disponibilidad —RF—
- seguridad —RFN—
- conectividad —RFN—
- resistencia —RFN—
- estética —RFN—
- portabilidad —RFN—
- ergonomía —RFN—
- adaptabilidad —RFN—.

- Formalización

Según los parámetros establecidos en la metodología de desarrollo, se determina la ejecución bajo la premisa de un desarrollo propio —*supply process*— o la adquisición del producto —*acquisition process*—; «el desarrollo propio» depende de las capacidades técnicas y la disponibilidad del personal de la empresa, mientras que la opción «adquisición del producto» depende de la capacidad de los proveedores seleccionados. Para este caso puntual, se opta por un desarrollo propio, considerando el impulso al desarrollo y a la innovación bajo un trabajo conjunto entre el grupo de investigación Esave y el Bamav N.o 1.

4.2.3 Fase 3. Diseño del producto.

El proceso de diseño puede contener el uso de herramientas de diseño tales como el análisis modal de fallos y efectos, el análisis funcional y de valor QFD —del inglés *quality function deployment*— y DfX —del inglés *desing for X*— (Arzola de la Peña, 2011); en esta fase se aplica un diseño conceptual e, inicialmente, se establece un acercamiento con el producto requerido, de modo que este resalta las funciones limitándose únicamente a modelar las

entradas, las funciones y las salidas. A continuación, se realiza la descomposición del sistema para relacionar cada requerimiento, bien sea al *hardware*, al *software* o a la estructura.

- Diseño conceptual

En esta fase se establece el diseño conceptual bajo la secuencia del funcionamiento: arranque, prueba y parada. Esto logra plantear la función de cada operación y las acciones que desempeñarán los elementos dentro del banco.

En este diseño se propone utilizar la herramienta de la función de despliegue de la calidad, usando los requisitos de la fase anterior. La herramienta, además de determinar porcentualmente la importancia de los requisitos, también visualiza las propiedades en las que se logra darle una propuesta innovadora al producto final.

- Selección de diseño

Se realiza una comparación con los diseños planteados, esto bajo el análisis del detallado por el grupo de expertos y por medio del método *Pugh*, tal como se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Método Pugh

| Concepto | Criterios | | | | Grado de relevancia |
|----------------|-----------|----------|----------|----------|---------------------|
| | Diseño 1 | Diseño 2 | Diseño 3 | Diseño 4 | |
| Automatización | 1 | 1 | 1 | -1 | 50 |
| Disponibilidad | 2 | 0 | 1 | -1 | 30 |
| Seguridad | 1 | -1 | 0 | -1 | 30 |
| Conectividad | 2 | 1 | 1 | 1 | 20 |
| Resistencia | 1 | 1 | -1 | 0 | 20 |
| Estética | 1 | 1 | 0 | 1 | 20 |
| Portabilidad | 1 | 1 | 0 | -1 | 20 |
| Ergonomía | 2 | 1 | 1 | -1 | 10 |
| Adaptabilidad | 3 | 1 | 0 | -1 | 20 |
| Mantenibilidad | 1 | 1 | 0 | 0 | 30 |
| Total | 15 | 7 | 3 | -4 | 250 |
| Ponderado | 37,5 | 17,5 | 7,5 | -10 | |

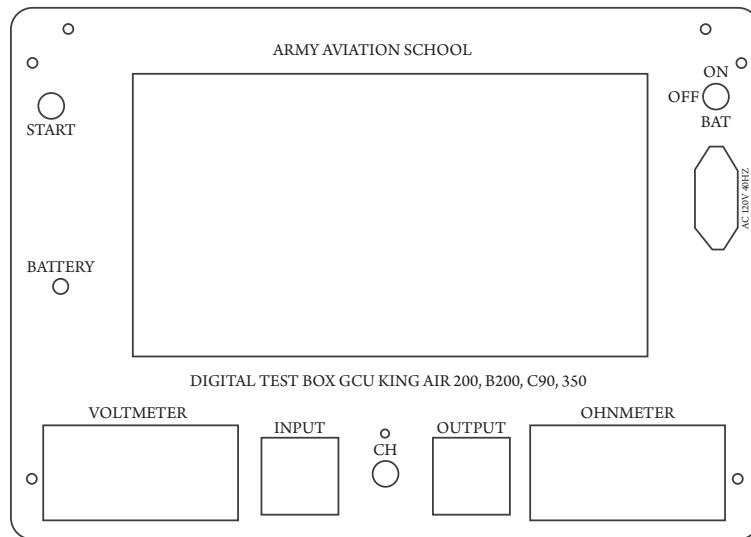
Nota. Diseños planteados por método Pugh.

Fuente. Elaboración propia.

- Diseño detallado

El diseño detallado es tarea básica de los ingenieros de diseño que proponen medidas similares a los bosquejos planteados previamente; para el caso de estudio el diseño se presenta en la figura 6.

Figura 6. CAD diseño detallado estructural frontal del banco



Nota. Diseño detallado del banco de pruebas de la GCU.

Fuente. Elaboración propia.

- Evaluación de diseño.

El uso de Dfx Diseño para la excelencia como herramienta es indispensable para la comprobación de la calidad del diseño aprobado, en caso de la descomposición del producto se hace necesario utilizar DpM, diseño para la manufactura.

4.2.3 Fase 4. Construcción.

- Construcción de *hardware*.

La construcción del *hardware* tiene facilidades de integración de elementos desarrollados, como, por ejemplo, la caja de ignición, la fuente de alimentación y el micrófono. Por el contrario, en la tarjeta electrónica es preciso fabricar una placa electrónica en la que se implementan los componentes electrónicos bajo un circuito simulado.

- Construcción de *software*.

La construcción del *software* se divide en dos aplicativos unidos mediante comunicación UART. El primer aplicativo permite la programación del

microcontrolador que determina mediante un código de recepción la selección de los canales; este código se transmite por el dispositivo electrónico portátil. Una vez determinado el protocolo de comunicación y seleccionado el microcontrolador encargado de interpretar y ejecutar la activación de los relevos de los dieciséis canales —uno a la vez— y la toma de medida —tensiones o impedancias—, se desarrolló en lenguaje C++ el *software* encargado de recibir la trama de comunicación.

- Integración HW/SW.

Esta integración de *hardware* y *software* se debe a la especialidad del producto, en este caso con el código instalado en el dispositivo móvil para la interfaz con el usuario que permite controlar la secuencia de las pruebas, adquirir y procesar los datos obtenidos y guardar los reportes.

Esta interfaz incluye la selección manual de los canales y el tipo de medida a realizar, en caso de que el operador del banco necesite conocer

específicamente la tensión o la impedancia de un canal determinado, y a su vez una opción automática que desarrolla el test completo para los diecisésis canales conforme al procedimiento establecido en el manual de mantenimiento de la aeronave en la sección 24-00-31; en el *software* debe ir integrada una base de datos que incluye los parámetros de medida estándar de cada canal tanto para tensión como para impedancia, donde se realiza la comparación de la medida obtenida con la medida estándar de cada canal y así se determina el uso o remplazo de la unidad GCU.

- Construcción estructural.

El proceso de adquisición de materiales es una corresponsabilidad del grupo de técnicos que realizan la búsqueda comercial de los materiales y elementos de acuerdo con el resultado entregado en la fase de diseño y las secciones de contratación encargadas de realizar compras y entregar los elementos. Los servicios técnicos contratados como soldadura de la estructura son priorizados con proveedores especialistas y locales.

4.2.3 Fase 5. Validación.

- Pruebas en campo.

El banco de pruebas se prueba a través de un plan de pruebas junto con operadores técnicos en las aeronaves de la serie Beechcraft King C-90, 200,

B200, 300 y 350 disponibles, con la que realizó una comparación de recursos utilizados y tiempo de desarrollo de las pruebas entre el banco construido y el método de detección de fallas convencional. Por otra parte, la realización de las pruebas sirve de instrumento para verificar el cumplimiento de los requisitos planteados en la fase inicial.

- Análisis de los resultados de pruebas.

Los resultados entregan un comportamiento satisfactorio. El concepto técnico del Bamav N.o 1 respecto a la validación del prototipo y de acuerdo con los resultados obtenidos, determinó que el banco portátil digital para las pruebas caza fallas de la GCU (*Generator Control Unit*) de las aeronaves Beechcraft King Air es un prototipo funcional y completamente operativo para el procedimiento caza fallas ordenado por el manual de mantenimiento de las series de Aeronaves (Cabrera-Arias, Garay-Rairan, Arango-Calderon y Gómez, 2020).

- Análisis de la efectividad e innovación.

Para analizar la efectividad del modelo se realizó un análisis comparativo entre componentes de gestión del proyecto de estudio de caso y otro proyecto de la misma naturaleza desarrollado por el grupo de investigación de la Escuela de Aviación, al que se le denominará proyecto B. El resultado se puede ver en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis de la efectividad del modelo

| Componentes | | Proyecto GCU | Proyecto B |
|------------------------|--|--------------|---|
| Indicadores de gestión | Cumplimiento del tiempo Tiempo ejecutado/tiempo planeado | 100 % | 116 % El proyecto finalizó cuatro meses después del tiempo planeado. |
| | Cumplimiento del costo Presupuesto ejecutado/presupuesto planeado | 100 % | 100 % |
| | Cumplimiento del alcance Actividades ejecutadas/actividades planeadas | 100 % | 100 % |

| | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--|--|
| Cumplimiento del producto | Resultados de investigación | Los objetivos específicos del proyecto de investigación se cumplieron al 100 %. | Los objetivos específicos del proyecto de investigación se cumplieron al 100 %. |
| | Productos | Los productos entregados y comprometidos fueron: prototipo, manuales, <i>software</i> , informe técnico y artículo. El registro del <i>software</i> fue demorado por parte de la organización. | Los productos entregados y comprometidos fueron: prototipo, manuales, <i>software</i> , informe técnico y ponencia. El registro del <i>software</i> fue demorado por parte de la organización. |
| | Informe final de investigación | El informe final fue aceptado a satisfacción. | En informe final fue aceptado a satisfacción en una segunda entrega. |

Nota. Como resultado es visible como el proyecto B se excedió un 16 % en el tiempo estimado, de la misma forma hubo retrasos en el desarrollo del informe final de investigación por errores en la información técnica suministrada.

Fuente. Elaboración propia con base en los datos de gestión de los proyectos del grupo de investigación en aviación militar.

Para el análisis de la innovación, debido a la naturaleza del modelo, este corresponde al tipo innovación de producto o de proceso; de igual manera, la evaluación del modelo permitió verificar la innovación del producto que, para este caso, fue de enfoque estructural, por lo que el modelo se puede considerar como modelo integrado IIP —*integrate, innovation, process*—, de manera que va más allá del desarrollo del producto y permite la generación de nuevo conocimiento y la optimización de procesos de la organización (Savioz y Sannemann, 1999).

5. Discusión

En los resultados se puede evidenciar la complejidad del desarrollo tecnológico e innovación del banco de pruebas digital al fraccionar el proyecto en diferentes etapas, con alto grado de incertidumbre; tal y como lo plantean Ahn *et al.* (2018), quienes clasifica esta tipología de proyectos del sector aeronáutico.

Es así como se logra cumplir la parte gerencial y técnica del proyecto, reduciendo y mitigando los riesgos mediante la implementación de una serie de estándares en gerencia de proyectos y metodologías de ingeniería en innovación, sintetizado en un modelo para el desarrollo de proyectos de innovación en tecnología para la aviación, de acuerdo con las recomendaciones de Zhu *et al.* (2016) y Bonzel, (2017), así como de utilizar sistemas de gerencia y gestión a fin de lograr la eficiencia en los proyectos.

Sin embargo, a diferencia de lo planteado por Fernandes *et al.* (2018), el modelo desarrollado no se encuentra planteado por prácticas, sino por fases, y cada fase está integrada por actividades, de modo que son estas más específicas en tecnología y están alineadas a lo estipulado por Nandana *et al.* (2020) en no enfocarse en la gerencia del desarrollo de proyecto, sino en las condiciones que debía cumplir el banco.

Finalmente, aunque el desarrollo tecnológico se originó desde una entidad estatal, se requiere potencializarlo con el sector empresarial para lograr una fase más compleja de innovación (Landoni y Ogilvie, 2019); a su vez, esto permitiría evaluar la ventaja del modelo IIP en fases de maduración y futura comercialización, en cuanto a la generación de nuevos modelos de negocio.

6. Conclusiones

El modelo construido contribuyó a la correcta gestión en cada fase del proyecto, asegurando un cumplimiento adecuado del tiempo y los procedimientos técnicos y de calidad, en gran medida gracias a la base teórica de modelos técnicos y de innovación en tecnología. La evaluación del modelo permitió verificar también la innovación del producto, que en el caso del banco de pruebas de la GCU fue de enfoque estructural, lo que permitió, además, caracterizar el modelo como modelo integrado IIP —*integrate, innovation, process*—.

El caso de aplicación fue el diseño de un banco de pruebas digital para las pruebas caza fallas de la GCU (*Generator Control Unit*), de las aeronaves Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 y 350. Sin embargo, el modelo desarrollado es transversal y aplicable a la construcción de futuros bancos fabricados por la Escuela de Aviación del Ejército Nacional de Colombia en conjunto con el Bamav N.o 1.

Adicionalmente, el modelo IIP permitió la generación de nuevo conocimiento asociado al proyecto y facilita nuevos modelos de negocio en fases posteriores de maduración y futura comercialización del producto. El uso del modelo también facilitó el cumplimiento del tiempo planificado, aseguró un correcto desarrollo del alcance y contribuyó al ajuste del presupuesto asignado; adicionalmente, debido a su componente técnico estructurado, la documentación final del proyecto la aprobó correctamente la dirección de proyectos.

El punto de mayor importancia y en el que se presentaron los mayores esfuerzos fue el diseño conceptual. Es aquí que se debe pensar de qué manera cumplir con los parámetros de la innovación. A fin de lograr esto se fortaleció la primera fase del modelo con el uso de técnicas tales como *brainstorming* y juntas de equipo para obtener las ideas de la especialidad de cada miembro del equipo de trabajo. Esta labor se optimizó con el uso de TRIZ. Una vez acordado el diseño conceptual cada integrante trabajó en su especialidad con juntas semanales para mostrar avance y resolver problemas y dudas que surgían conforme se avanzaba en el desarrollo del producto.

El banco de pruebas se presenta para su uso en los procesos de mantenimiento, de modo que disminuye tiempos de parada de las aeronaves, lo que optimiza tiempos y gasto de combustible. El uso del modelo asegura los procedimientos de calidad mediante el uso de las diferentes herramientas, y la evaluación del método permite verificar la innovación del producto basándose en valores cuantitativos. Sin embargo, es necesario que se continúe validando su efectividad al integrarlo como parte del modelo de desarrollo para los futuros proyectos de la dependencia y como parte de líneas de investigación en gerencia de proyectos.

Referencias

- Ahn, H.; Kim, H.; Choi, H. L. (2018). Integrated risk management method development for multiple aerospace projects using a single index expression. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 19(4), 1052-1062. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42405-018-0092-5>
- Alvarado, V. V. (2012). *Técnicas efectivas para la toma de requerimientos*. México: Northware Software Development.
- Arzola de la Peña, N. (2011). *Metodología de diseño para ingeniería*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Barrio, D.; García, S.; Solís, J. P. (2011). Modelo para la gestión de la innovación tecnológica en el sector inmobiliario. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(3), 353-368. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732011000300006>
- Bonzel, P. (2017). *Identification of risk factors and influences on aeronautical product development performance*. En 38th International Annual Conference of the American Society for Engineering Management (ASEM 2017). Huntsville, EEUU., 18-21 de octubre.
- Cabrera-Arias, C. A.; Garay-Rairan, F. S.; Arango-Calderon, I.; Gómez-Vargas, O. E. (2020). Design of a troubleshooting Digital test bench for the Beechcraft King C-90, 200, B 200, 300 and 350 aircraft GCU. *Inginería*, 25(3), 1-15.
- Chamónica, D. D.; Gómez, M. (2017). Desarrollo tecnológico del sector aeronáutico en México, Canadá y EE. UU. a partir de la I+D e IED, 2005-2015. *Revista Cimexus*, XII(1), 13-33.
- Ciampa, P.D.; Nagel, B. (2020). Agile Paradigm: the next generation collaborative MDO for the development of aeronautical systems. *Progress in Aerospace Sciences*, 119, 100643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100643>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Documento CONPES 3582 – Desarrollo productivo del sector aeronáutico*.
- Electronic Industries Alliance. (7 de enero de 1999). EIA-632 Processes for Engineering a System. Recuperado de <https://bit.ly/3bQ1KIn>
- Fernandes, G.; Moreira, S.; Araújo, M.; Pinto, E. B.; Machado, R. J. (2018). Project management practices for collaborative university-industry R&D: a hybrid approach. *Procedia Computer Science*, 138, 805-814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.105>
- Forozandeh, M.; Teimoury, E.; Makui, A. (2019). A mathematical formulation of time-cost and reliability optimization for supply chain management in research-development projects. *Rairo-Operations Research*, 53(4), 138-1406. DOI: <https://doi.org/10.1051/ro/2018068>
- Garrett. (1987). *Maintenance Manual*, Pub. L. No. TPE331-5. Arizona: Allied-Signal Aerospace Company.
- Goldstein, A. P.; Kearney, M. (2020). Know when to fold 'em: an empirical description of risk management in public research funding. *Research Policy*, 49(1), 103873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103873>
- IEEE. (2005). *IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2005.96469>
- Incose (International Council on Systems Engineering the Systems Engineering Research Center (SERC), and the IEEE Computer Society. (2018). Sebok. (*Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge*). Recuperado de <https://bit.ly/30SOB4o>
- ISO/IEC/IEEE. (2015). *Systems and software engineering-System life cycle processes*. ISO/IEC/IEEE.
- Landoni, M.; Ogilvie, D. T. (2019). Convergence of innovation policies in the European aerospace industry (1960-2000). *Technological Forecasting and Social Change*, 147, 174-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.07.007>
- Livotov, P.; Chandra-Sekaran, A. P.; Law, R.; Reay, D. (2019). Systematic innovation in process engineering: linking TRIZ and process intensification. En L. Chechurin; M. Collan (Eds.) *Advances in Systematic Creativity: Creating and Managing Innovations*. (38-39). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-78075-7_3
- McCurdy, H. E. (2013). Learning from history: low-cost project innovation in the U.S. National Aeronautics and Space Administration. *International Journal of Project Management*, 31(5), 705-711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.02.001>
- Mickels, C.; Wright, C. H.; Soderquist, N.; Prokofieva, A.; Panahandehgar, S.; Uddanti, N. S.; Rajan, A. (2019). Project atlas: a mobile universal rocket engine test stand. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-1938>
- Moallemi, M.; Shannon, C.; Jafer, S.; Raja, A. V.; Thigpen, N. C. (2019). Building atc simulator through scenario-driven requirements engineering. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-1482>
- Monroy, M. F.; Ramírez, L. J. (2018). Nueva metodología para la gestión de proyectos estratégicos. *Revista Científica General José María Córdova*, 16(24), 157-173. DOI: <https://doi.org/10.21830/19006586.362>
- Nandana, M. S.; Udaya, B. K.; Manjunatha, C. M. (2020). *ICAF 2019-Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing*. En Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Krakow, Polonia, 2-7 de junio. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21503-3>

Ribechini, G.-L. (2014). *Gestión estratégica de la innovación*. Universitat Oberta de Catalunya. Recuperado de <https://bit.ly/3vtExDA>

Rojas, P. J. (2017). Doctrina Damasco: eje articulador de la segunda gran reforma del Ejército Nacional de Colombia. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(19), 95-119. DOI: <https://doi.org/10.21830/19006586.78>

Salerno, M. S.; Gomes, L. A. D. V.; Silva, D. O. da; Bagno, R. B.; Freitas, S. L. T. U. (2015). Innovation processes: Which process for which project? *Technovation*, 35, 59-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2014.07.012>

Savioz, P.; Sannemann, E. (1999). The concept of the integrated innovation process. En IEEE (Ed.) Picmet '99: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. *Proceedings Vol-1: Book of Summaries*. (Vol. 2, 137-143). Portland: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICMET.1999.787797>

Torrubiano, J. (2013). *Metodología TRIZ para la creatividad e innovación*. Madrid: Ernest & Young.

Wyatt, D.; Tooley, M. (2009). *Aircraft Electrical and Electronic Systems*. Londres: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080942971>

Xue, R.; Baron, C.; Esteban, P.; Zhang, Q. (2014). Establishing Profiles for Systems Engineering Standards: A Great Help for Companies to Manage Their Processes. *Frontiers of Engineering Management*, 1(3), 297-303.

Zhu, W.; Bricogne, M.; Durupt, A.; Remy, S.; Li, B.; Eynard, B. (2016). Implementations of model based definition and product lifecycle management technologies: a case study in chinese aeronautical industry. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 485-490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.664>

