Diseñar, construir e implementar el brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA, garantizando su operatividad, seguridad y capacidad de simulación de entornos reales de inserción.

Sánchez Ortiz, Washington Javier y Narváez López, Erick Fabricio

Departamento de Seguridad y Defensa

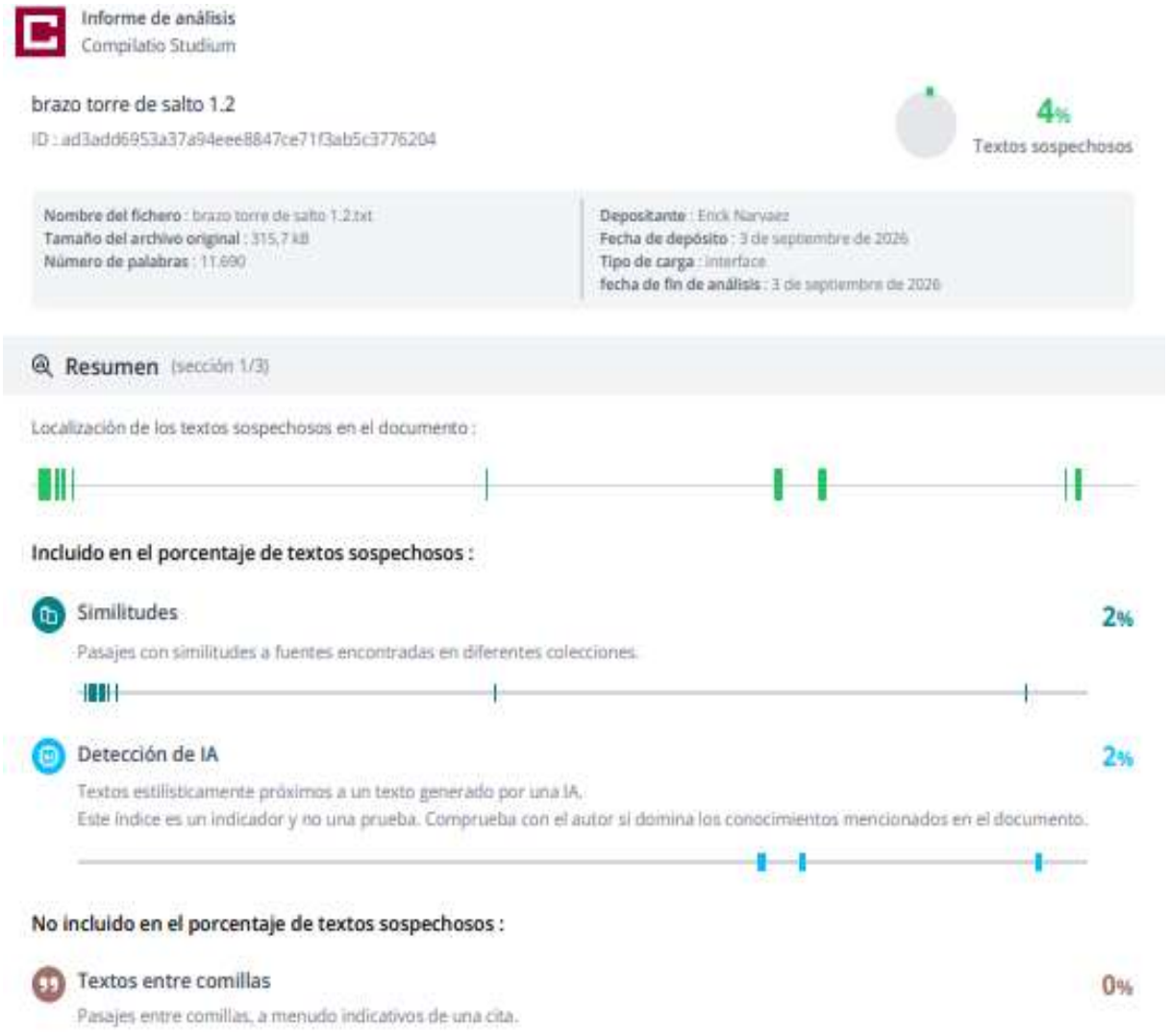
Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Infantería Aérea

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Infantería Aérea

Mayo.Plto.Avc. Gomez Quirola, Sergio Arturo

04 de septiembre de 2026

Latacunga



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
SERGIO ARTURO GOMEZ QUIROLA

Mayo Plto. Avc. Gómez Quirola, Sergio Arturo

Director

C.C 1310219132

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Infantería Aérea

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Diseñar, construir e implementar el brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA, garantizando su operatividad, seguridad y capacidad de simulación de entornos reales de inserción**" fue realizado por los señores **Sánchez Ortiz, Washington Javier y Narváez López, Erick Fabricio,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; demás, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 04 de septiembre de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
SERGIO ARTURO GOMEZ QUIROLA

Mayo Plto. Avc, Gómez Quirola, Sergio Arturo

Director

C.C 1310219132

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Infantería Aérea

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Sánchez Ortiz, Washington Javier y Narváez López, Erick Fabricio**, con cédulas de ciudadanía n° **C.C. 1850433234 y** n° **C.C. 1750141424** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: "**Diseñar, construir e implementar el brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA, garantizando su operatividad, seguridad y capacidad de simulación de entornos reales de inserción"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 04 de septiembre de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
WASHINGTON JAVIER SANCHEZ ORTIZ

Sánchez Ortiz, Washington Javier

C.C.:1850433234

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERICK FABRICIO NARVAEZ LOPEZ

Narváez López, Erick Fabricio

C.C.:1750141424

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Infantería Aérea

Autorización de Publicación

Nosotros **Sánchez Ortiz, Washington Javier y Narváez López, Erick Fabricio** con cédulas de ciudadanía n° **C.C. 1850433234 y** n° **C.C. 1750141424** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "**Diseñar, construir e implementar el brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA, garantizando su operatividad, seguridad y capacidad de simulación de entornos reales de inserción"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 04 de septiembre de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
WASHINGTON JAVIER
SANCHEZ ORTIZ

Sánchez Ortiz, Washington Javier

C.C.: 1850433234

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERICK FABRICIO
NARVAEZ LOPEZ

Narváez López, Erick Fabricio

C.C.: 1750141424

Dedicatoria

Quiero dedicar este proyecto, agradecer a Dios, a la virgencita del Quinche por haberme brindado la sabiduría, por haberme dado la fuerza para seguir adelante con cada meta que me propuse, agradecer a mis padres por haberme ayudarme incondicionalmente con su apoyo económico, sus conejos que siempre los tengo presentes, a mi familia por siempre estar cuando más los he necesitado, por confiar en mí y tener presente que lo lograría, este logro no solo es mío es de todas las personas que creyeron en mí, el esfuerzo puesto para poder alcanzar es ver como mis padres dan todo por verme alcanzar mis metas.

SANCHEZ W

Quiero dedicar este proyecto, en primer lugar, mi familia por haber apoyado en mis estudios y haber confiado en mi desde muy pequeño. Gracias por cada uno de sus consejos, por su paciencia, por estar presentes en los momentos difíciles y por brindarme el apoyo económico necesario para poder continuar con mi formación. Además, he aprendido el valor del esfuerzo, la responsabilidad, la humildad y la perseverancia. Cada sacrificio que realizaron y cada palabra de motivación fueron fundamentales para llegar hasta este momento.

NARVAEZ E

Agradecimiento

Queremos agradecer de manera muy sincera a nuestra Escuela Técnica de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, por brindarnos los conocimientos, la formación y las oportunidades necesarias para crecer tanto en nuestra profesión como militares y en lo personal. También agradecemos a todos los docentes e instructores que compartieron con nosotros sus conocimientos y experiencias a lo largo de nuestra formación. De manera especial, agradezco a mi Mayo Plto. Avc. Gómez Quirola Sergio Arturo, por su orientación, apoyo y confianza durante el desarrollo de este proyecto. Sus consejos y recomendaciones fueron de gran importancia para poder superar las dificultades que se presentaron y culminar satisfactoriamente este trabajo.

Sánchez W, Narváez E

Índice de contenido

Carátula 1

Reporte de verificación de contenidos 2

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Autorización de Publicación 5

Dedicatoria 6

Agradecimiento 7

Índice de contenido 8

Índice de tablas 12

Índice de figura 13

Resumen 14

Abstract 16

Capítulo I 18

Introducción 18

Planteamiento del problema 18

Formulación del problema o pregunta de investigación 20

Objetivos 21

Objetivo general 21

Objetivos específicos 21

Justificación 22

Capítulo II 24

Estado del arte 24

Marco teórico 25

Bases teóricas 26

Ingeniería mecánica 26

Diseño mecánico 27

Brazo mecánico 28

Grados de libertad 31

Fundamentos de resistencia de materiales 31

Esfuerzo 31

Deformación 32

Factor de seguridad 32

Selección de materiales 32

Sistemas de accionamiento 35

Actuadores 35

Motores eléctricos 35

Sistemas de transmisión 36

Sistemas de control 37

Control automático 37

Controlador lógico programable 37

Interfaz hombre-máquina 38

Sensores y sistemas de posicionamiento 38

Normativa INEN aplicable 39

Seguridad del sistema 41

Seguridad en máquinas 41

Parada de emergencia 42

Protección de partes móviles 42

Ergonomía y factores humanos 42

Interacción hombre-máquina 44

Consideraciones antropométricas 45

Factores humanos en la seguridad 46

Análisis de riesgos 47
Simulación de entornos reales de inserción 48
Operatividad del brazo mecánico 49
Construcción del brazo mecánico 49
Mantenimiento del sistema 50
Mantenimiento preventivo 50
Mantenimiento correctivo 51
Normativa y criterios técnicos aplicables 51
Validación del brazo mecánico 52
Pruebas estructurales 52
Pruebas mecánicas 52
Pruebas eléctricas 53
Pruebas de control 53
Pruebas de seguridad 53
Pruebas de simulación 53
Marco conceptual 53
Carga estática vs. carga dinámica 55
Fatiga de materiales 56
Soldadura 56
Factor de seguridad *57*
Inspección no destructiva 57
Capítulo III 59
Metodología 59
Enfoque de investigación 59
Tipo y diseño de investigación 59
Población y muestra 60

Técnica e instrumento 61
Validación y confiabilidad del instrumento 63
Consideraciones éticas 64
Capítulo IV 65
Análisis y discusión de los resultados 65
Presentación de los resultados 65
Análisis de la necesidad de mejorar la simulación 65
Análisis de la importancia de la seguridad 66
Análisis de la automatización 66
Análisis de la funcionalidad del brazo mecánico 67
Discusión de los resultados 67
Requerimientos derivados de los resultados 68
Capítulo V 69
Conclusiones y recomendaciones 69
Conclusiones 69
Recomendaciones 70
Referencias 72
Apéndices 74

Índice de tabla

Tabla 1 Componentes del sistema 32

Tabla 2 Peligros 45

Tabla 3 Dimensiones 60

Índice de figura

Figura 1 Vista lateral de la estructura 26

Figura 2 Vista frontal del eje móvil 27

Figura 3 Eje 27

Figura 4 Rodamientos 28

Figura 5 Unión articulada 28

Resumen

El presente trabajo de integración curricular tiene como finalidad diseñar, construir e implementar un brazo mecánico en la Torre de Salto de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (ETFA), con el propósito de fortalecer las capacidades de entrenamiento del personal militar mediante la simulación controlada de condiciones dinámicas de inserción. Esta propuesta de investigación surge debido a las limitaciones que tiene la infraestructura en la actualidad para desarrollar movimientos análogos a los experimentados en un ejercicio de inserción aérea, escenario que minimiza el nivel de veracidad y la posibilidad de desplegar entrenamientos progresivos y normados. El trabajo abarca principios de ingeniería mecánica, estrategias de accionamiento, resistencia de los materiales, vigilancia, automatización, ergonomía y seguridad de los artefactos. La investigación se realiza respondiendo a un enfoque mixto, descriptivo y aplicado, complementado por un diseño no experimental de corte transversal para la recopilación de la información. En lo que respecta a la población de estudio, se ha considerado un total de 100 personas vinculadas con las actividades de preparación de la ETFA, tomando finalmente una muestra de 80 participantes a quienes se aplica un cuestionario de base estructurada. La recopilación de datos abarca tanto la observación directa como la encuesta, instrumentos cuya finalidad es la de identificar el contexto actual, los requerimientos de simulación, las necesidades en seguridad, la funcionalidad, la automatización y la aprobación de la propuesta. Los resultados demuestran una apreciación favorable en relación a la incorporación de mecanismos de simulación y sistematización en la Torre de Salto. De la misma forma, se identifica la necesidad de agregar elementos de seguridad como parada de emergencia, finales de carrera, sensores de posición, protección de partes movibles y límites de deslizamiento.

Palabras clave: brazo mecánico, Torre de Salto, ETFA, simulación, automatización, seguridad, entrenamiento militar.

Abstract

The present curricular integration work aims to design, construct, and implement a mechanical arm in the Jump Tower of the Technical School of the Air Force (ETFA), with the purpose of strengthening the training capabilities of military personnel through controlled simulation of dynamic insertion conditions. This research proposal arises due to the limitations that the current infrastructure has for developing movements analogous to those experienced in an airborne insertion exercise, a scenario that minimizes the level of veracity and the possibility of deploying progressive and regulated training. The work encompasses principles of mechanical engineering, drive strategies, material resistance, surveillance, automation, ergonomics, and safety of the devices.The research is conducted in response to a mixed, descriptive, and applied approach, complemented by a non-experimental cross-sectional design for data collection. Regarding the study population, a total of 100 individuals linked to the preparation activities of the ETFA have been considered, ultimately taking a sample of 80 participants to whom a structured base questionnaire is applied. The data collection includes both direct observation and surveys, tools aimed at identifying the current context, simulation requirements, safety needs, functionality, automation, and the approval of the proposal.The results demonstrate a favorable appreciation regarding the incorporation of simulation and systematization mechanisms in the Jump Tower. Similarly, the need to add safety elements such as emergency stops, limit switches, position sensors, movable part protection, and sliding limits is identified

Keywords: mechanical arm, Jump Tower, ETFA, simulation, automation, safety, military training.

Capítulo I

Introducción

Planteamiento del problema

El adiestramiento militar requiere el empleo de medios e instalaciones que faciliten el desarrollo de destrezas necesarias para enfrentar los requerimientos de las operaciones aerotransportadas. En este sentido, la torre de salto de la ETFA constituye una instalación esencial para la formación del personal, ya que permite robustecer las maniobras de inserción, el control corporal y la aplicación de rutinas previas a un salto. Sin embargo, la seguridad del entrenamiento obedece en gran medida a que los componentes utilizados sean idóneos para usar, de forma segura y controlada, similares a las circunstancias que el militar encontrará durante una maniobra real.

Actualmente, la torre de salto presenta varios limitantes relacionados con la falta de un mecanismo que permita realizar movimientos y escenarios dinámicos lo más parecidos a aquellos que se experimentan durante una inserción aérea. Esta realidad minimiza el nivel de realismo del ejercicio, ya que los ejercicios se desarrollan en un ambiente estático que no se ajusta de manera apropiada a los cambios en la orientación, el movimiento, y la estabilidad que intervienen al momento de que el personal realice un ejercicio. Dando como resultado, que las oportunidades que tienen los alumnos para adaptarse a espacios que exigen respuestas rápidas y precisas disminuyan.

La ausencia de un brazo mecánico diseñado específicamente para la torre de salto restringe la posibilidad de ejecutar ejercicios progresivos y estandarizados. Al no contar con un dispositivo que controle y represente variados entornos de simulación, el proceso de enseñanza – aprendizaje se engloba básicamente en estrategias convencionales que pueden ser incompatibles al momento de ejecutar las prácticas. Poniendo en riesgo el proceso de instrucción y limitando la evaluación objetiva del desempeño de los participantes.

Otro aspecto que demanda atención es la seguridad táctica durante el ejercicio. La incorporación de equipos diseñados bajo criterios técnicos y estructurales adecuados permite restar riesgos relacionados con fallas mecánicas, movimientos incontrolados o condiciones de operación inseguras. En ausencia de un método especialmente pensado para este propósito, resulta más complicado garantizar que las habilidades se desarrollen bajo medidas uniformes de seguridad, confiabilidad y resistencia estructural.

De esta manera, la ausencia de un brazo mecánico restringe la capacidad institucional para actualizar sus métodos de entrenamiento y aprovechar soluciones técnicas que aumenten la calidad de la educación militar. Actualmente, las fuerzas armadas requieren procesos de formación cada vez más realistas, seguros y eficientes, donde la simulación realice un papel importante en el fortalecimiento de las aptitudes operacionales del personal previamente de enfrentar escenarios reales.

Frente a esta incertidumbre, nace la necesidad de diseñar, construir e implementar un brazo mecánico para la torre de salto de la ETFA que responda a las exigencias técnicas, estructurales y funcionales de la Institución. El desarrollo de este mecanismo deberá garantizar una labor confiable, facilitar las operaciones, tener una resistencia mecánica y cumplir con la normativa de seguridad, además de admitir la simulación de movimientos representativos de una inserción aérea sin implicar la integridad física de los usuarios.

En consecuencia, el presente estudio busca enmendar una falencia al no contar con un sistema mecánico que mejore las capacidades de preparación en la torre de salto de la ETFA. A través del diseño, construcción e implementación del brazo mecánico se intenta mejorar la operatividad del equipo, aumentar la seguridad durante los ejercicios y proporcionar una simulación más cercana a las situaciones reales de inserción, apoyando así a mejorar la calidad de la gestión del personal militar y perfeccionar los procesos de instrucción institucional.

Formulación del problema o pregunta de investigación

La instrucción del personal militar en lo que respecta a maniobras de aerotransportación, requiere de sistemas de formación que reproduzcan escenarios reales de forma segura y bajo condiciones que se asemejen a una inserción real. Sin embargo, la falta de un brazo mecánico en la torre de la ETFA limita gravemente el desarrollo de simulaciones de estos escenarios, lo que pone en riesgo la calidad de la enseñanza y el desarrollo de habilidades que son requeridas al momento de realizar misiones.

Esta condición plantea la necesidad de estudiar qué características técnicas, estructurales y funcionales debe contener un brazo mecánico para integrarse adecuadamente a la torre de salto, garantizando una tarea eficiente, segura y conforme con los requerimientos operacionales de la Institución. Además, es preciso determinar cómo su ejecución contribuirá a optimizar las condiciones de conocimiento del personal militar.

En este contexto, el estudio pretende instaurar una solución técnica que permita perfeccionar la infraestructura de entrenamiento mediante el diseño, construcción e implementación de un sistema mecánico capaz de reproducir movimientos representativos de una inserción aérea, sin que se implique la seguridad de los beneficiarios ni la operatividad del dispositivo.

Pregunta de investigación

¿Cómo diseñar, construir e implementar un brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA que garantice su operatividad, seguridad y capacidad de simular entornos reales de inserción, con el fin de fortalecer el entrenamiento del personal militar?

Objetivos

Objetivo general

Elaborar, construir y poner en marcha un brazo mecánico en la torre de salto de la ETFA, certificando su operatividad, capacidad y seguridad al momento de simular condiciones reales de inserción, con el fin de fortalecer el proceso de aprendizaje y mejorar la capacidad de maniobrar del personal militar.

Objetivos específicos

1. Establecer las condiciones operativas, técnicas y estructurales de la torre de salto de la ETFA con el fin de cubrir los requerimientos básicos en el diseño e implementación del brazo mecánico.
2. Realiza un diseño del brazo mecánico bajo criterios técnicos que respondan a la normativa vigente de seguridad, que represente completa funcionalidad y resistencia en su estructura, de forma que sea óptima para el desarrollo de maniobras simuladas de inserción
3. Implementar y construir un brazo mecánico en la torre de salto de la ETFA, empleando elementos y materiales que permitan garantizar un funcionamiento en condiciones óptimas de estabilidad y durabilidad.
4. Evaluar la seguridad, capacidad y operatividad del brazo mecánico al momento de la simulación, con la aplicación de ensayos de funcionamiento, cotejando su aporte en el proceso de instrucción y perfeccionamiento del personal militar

Justificación

El presente estudio se justifica debido a la necesidad de fortalecer el proceso de instrucción del personal militar a través de la implementación un brazo sistema mecánico que fomente el perfeccionamiento de las capacidades de simulación en la torre de salto de la ETFA. La preparación para maniobras de inserción requiere que el personal alcance habilidades técnicas y tácticas en escenarios que reproduzcan, con el mayor grado de realismo posible, las situaciones a las que se enfrentará durante el cumplimiento de las tareas. En este sentido, el diseño, construcción e implementación de un brazo mecánico constituye una alternativa para perfeccionar la calidad de la educación y favorecer a una formación más eficaz.

Desde el punto de vista técnico, el desarrollo del brazo mecánico permitirá integrar principios de diseño mecánico, resistencia de materiales, análisis estructural y seguridad operacional en una solución adecuada a las necesidades de la ETFA. Su implementación abarcara todos los detalles necesarios para garantizar la confiabilidad, funcionamiento y estabilidad continua, que facilite que este sistema soporte movimientos y cargas inherentes a las maniobras de entrenamiento. De igual forma, contribuirá con el aprovechamiento de la infraestructura que ya existe a través de la anexión de un mecanismo diseñado y elaborado con el fin de complementar las capacidades de la torre de salto.

En el ámbito operacional, el implementar un brazo mecánico aumentará de forma significativa el grado de similitud de los entrenamientos simulando escenarios reales y facilitando realizar movimientos y condiciones que se asemejan a aquellas que se experimentan durante una maniobra de inserción aérea. Esto favorecerá al desarrollo de destrezas relacionadas con el control corporal, la coordinación, la orientación espacial y la adecuada ejecución de instrucciones, permitiendo que el personal militar enfrente las prácticas con mayor probidad y confianza antes de participar en operaciones reales.

Desde el punto de vista de la seguridad, el proyecto permitirá instaurar parámetros técnicos para el diseño, disposición y operación del sistema mecánico, reduciendo la

probabilidad de eventualidades durante las prácticas. La implementación de un dispositivo de control, contribuirá en la implementación de un proceso de instrucción e inspección que garantice la integridad física de los usuarios y la confianza del equipo, promoviendo un entorno de instrucción acorde a los modelos institucionales que sea seguro y permita prevenir cualquier tipo de riesgo.

Este estudio es importante y relevante para la Institución ya que proporciona una propuesta técnica que podrá ser operada como referente para la modernización de los procesos de entrenamiento y adiestramiento de la ETFA. Los resultados alcanzados servirán para perfeccionar la infraestructura destinada a la enseñanza del personal militar, mejorar los recursos aprovechables y fortalecer las capacidades tácticas de la Institución mediante un método de instrucción más seguro, eficiente y capaz de simular situaciones reales de inserción.

Capítulo II

Estado del arte

Actualmente, los sistemas de entrenamiento han incorporado tecnologías de simulación, automatización y control con el propósito de reproducir condiciones específicas de operación de manera controlada. La utilización de mecanismos automatizados permite generar movimientos repetibles y modificar determinadas variables del entrenamiento sin necesidad de realizar las actividades exclusivamente en escenarios reales.

Los brazos mecánicos manejados en aplicaciones industriales y de adiestramiento se caracterizan por su capacidad para realizar movimientos programados con disímiles grados de precisión y repetibilidad. Estas particularidades pueden aprovecharse para desarrollar sistemas especializados predestinados a la instrucción del personal.

El avance de los sistemas de control igualmente ha facilitado integrar sensores, controladores programables, interfaces digitales y procedimientos de seguridad. Esta unificación propicia la supervisión del dispositivo y permite instituir condiciones de operación anteriormente definidas.

En lo que concierne a la preparación, la simulación permite reducir la exposición inicial a ciertos riesgos y facilita la reproducción de ejercicios. Sin embargo, la simulación debe delinearse de manera que conserve una relación apropiada entre realismo, control y seguridad.

En este sentido, el plan de implementación de un brazo mecánico en la torre de salto de la ETFA pretende aprovechar principios de sistematización y diseño mecánico para desplegar una solución adecuada a las necesidades concretas de la infraestructura de entrenamiento.

Marco teórico

Antecedentes de la investigación

El desarrollo de sistemas mecánicos destinados al entrenamiento de personal constituye una alternativa para mejorar la preparación técnica y física de los usuarios, debido a que permite reproducir determinadas condiciones de operación en un ambiente controlado. En el ámbito de la formación militar, los sistemas de simulación tienen especial importancia, ya que permiten desarrollar capacidades mediante ejercicios repetitivos sin necesidad de exponer permanentemente al personal a los riesgos propios de escenarios reales.

Las torres de salto son estructuras empleadas para el entrenamiento de personal que requiere desarrollar habilidades relacionadas con el desplazamiento, posicionamiento, descenso y procedimientos de inserción desde diferentes alturas. Sin embargo, una Torre de Salto convencional puede presentar limitaciones cuando su estructura no dispone de mecanismos capaces de generar condiciones dinámicas similares a las encontradas durante una operación real.

En este contexto, la incorporación de un brazo mecánico se traduce en una alternativa de ingeniería encaminada a acrecentar las capacidades de simulación de la torre de salto de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (ETFA). El sistema puede consentir la reproducción de movimientos controlados que integren los ejercicios tradicionales y provean al personal en formación un ambiente más representativo de determinadas circunstancias de inserción.

Considerando el punto de vista de la ingeniería, el proyecto del brazo mecánico requiere de la implementación de variables mecánicas, estructurales, electrónicas y de control, en donde su sistema sea capaz de soportar las cargas y pesos previstos durante su funcionamiento, manteniendo una estabilidad estructural adecuada y realizando los movimientos establecidos sin

poner en riesgo la integridad de los usuarios ni de la propia infraestructura.

Con el fin de que la ejecución de este sistema se ajuste a las características requeridas, se deben considerar e instaurar varios criterios de seguridad en todas las etapas de diseño. La selección de materiales, dimensiones, mecanismos de transmisión, sistemas de accionamiento, elementos de sujeción, dispositivos de emergencia y procedimientos de operación deben responder a una metodología que permita reducir los riesgos asociados con el funcionamiento del equipo.

Por lo tanto, el desarrollo del brazo mecánico para la Torre de Salto de la ETFA representa una propuesta de innovación tecnológica aplicada al entrenamiento, debido a que integra conocimientos de diseño mecánico, resistencia de materiales, automatización, sistemas de control y seguridad industrial con el propósito de mejorar las condiciones de simulación y entrenamiento.

Bases teóricas

Ingeniería mecánica

La ingeniería mecánica es una disciplina encargada del análisis, diseño, construcción y mantenimiento de sistemas que involucran movimiento, fuerzas y energía. Su aplicación permite desarrollar mecanismos capaces de realizar movimientos controlados y soportar diferentes condiciones de carga.

En el presente proyecto, los principios de ingeniería mecánica constituyen la base para determinar las dimensiones y características de los elementos que conformarán el brazo mecánico. Para ello, se deben considerar aspectos como la geometría del mecanismo,

distribución de cargas, esfuerzos, deformaciones, momentos, velocidad de movimiento y condiciones de operación.

El diseño debe buscar un equilibrio entre resistencia, peso, funcionalidad, facilidad de mantenimiento y seguridad. Un sistema sobredimensionado puede incrementar innecesariamente los costos y el peso de la estructura, mientras que un sistema subdimensionado puede presentar deformaciones excesivas o fallas durante su funcionamiento.

Diseño mecánico

El diseño mecánico comprende el proceso mediante el cual se establecen las características físicas y funcionales de una máquina o mecanismo para cumplir una determinada finalidad.

Para el diseño del brazo mecánico se deben establecer inicialmente los requerimientos funcionales del sistema. Entre estos pueden considerarse:

- Capacidad de carga.
- Alcance del brazo.
- Ángulo de movimiento.
- Velocidad de desplazamiento.
- Tipo de accionamiento.
- Frecuencia de utilización.
- Condiciones ambientales.
- Sistemas de seguridad.
- Facilidad de mantenimiento.
- Compatibilidad con la Torre de Salto.

- Capacidad de simulación requerida.

El proceso de diseño debe partir de las necesidades de entrenamiento y posteriormente transformarlas en parámetros técnicos que permitan construir un mecanismo funcional y seguro.

Brazo mecánico

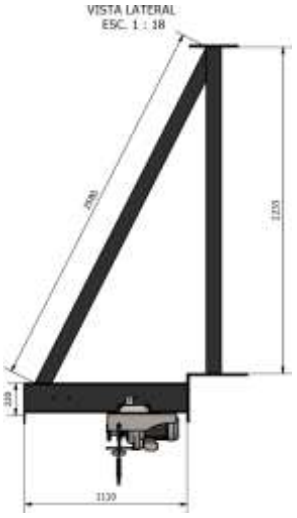
Un brazo mecánico es un mecanismo diseñado para generar movimientos controlados mediante la interacción de diferentes elementos estructurales y sistemas de accionamiento. Dependiendo de su configuración, puede estar compuesto por uno o varios grados de libertad.

Entre sus componentes principales pueden encontrarse:

- Estructura principal.

Figura 1

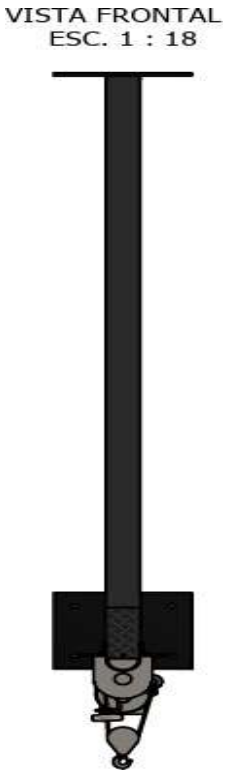
Vista lateral de la estructura



- Brazos o segmentos móviles.

Figura 2

Vista frontal del eje móvil



- Ejes.

Figura 3

Eje



- Rodamientos.

Figura 3

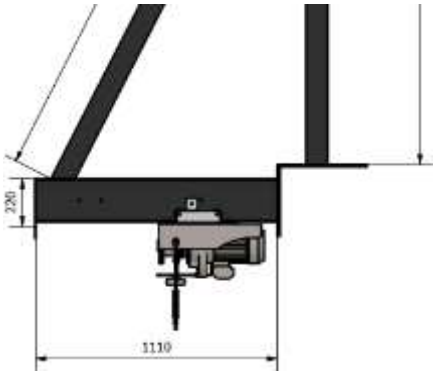
Rodamientos



- Uniones articuladas.

Figura 4

Unión articulada



- Elementos de transmisión.
- Actuadores.
- Sensores.
- Sistema de control.
- Elementos de sujeción.
- Sistemas de seguridad.

Para el presente proyecto, el brazo mecánico deberá diseñarse específicamente de acuerdo con las características de la Torre de Salto de la ETFA, evitando considerar el mecanismo como un elemento independiente de la infraestructura.

Grados de libertad

Los grados de libertad representan la cantidad de movimientos independientes que puede realizar un mecanismo.

En un brazo mecánico, los grados de libertad obedecen a la disposición de sus articulaciones y de los movimientos que se pretendan generar. Por ejemplo, un método puede permitir movimiento angular, desplazamiento lineal o una combinación de ambos.

La determinación de los grados de libertad es primordial porque permite precisar la complejidad del mecanismo, los actuadores necesarios y el sistema de control oportuno.

Para este trabajo, los grados de libertad deberán establecerse conforme a los movimientos que se pretendan reproducir durante los entrenamientos de simulación, intentando que el sistema sea técnicamente viable y seguro.

Fundamentos de resistencia de materiales

Esfuerzo

El esfuerzo representa la intensidad de las fuerzas internas que se producen dentro de un elemento estructural como consecuencia de la aplicación de una carga.

En el diseño del brazo mecánico será necesario determinar los esfuerzos generados en sus principales componentes, especialmente en aquellos elementos que soporten directamente las cargas durante el funcionamiento.

El análisis permitirá verificar que los materiales seleccionados tengan una resistencia

adecuada para las condiciones previstas de operación.

Deformación

La deformación corresponde al cambio de forma o dimensiones que experimenta un elemento cuando se encuentra sometido a una carga.

Aunque un elemento estructural no presente una falla inmediata, una deformación excesiva puede afectar la precisión del movimiento, producir vibraciones o comprometer la estabilidad del sistema.

Por esta razón, el diseño del brazo mecánico deberá considerar límites de deformación compatibles con su función.

Factor de seguridad

El factor de seguridad constituye un parámetro empleado para establecer un margen entre la resistencia disponible de un componente y las condiciones de carga previstas.

Su utilización permite considerar incertidumbres relacionadas con las cargas, propiedades de los materiales, condiciones de fabricación, desgaste y posibles variaciones durante la operación.

La selección del factor de seguridad deberá realizarse considerando la naturaleza del equipo, las consecuencias de una posible falla y las condiciones de utilización del brazo mecánico.

Selección de materiales

La selección de materiales constituye una etapa fundamental en el diseño y construcción del brazo mecánico, debido a que las propiedades del material influyen directamente en la resistencia, peso, durabilidad, estabilidad y seguridad del sistema. La

elección deberá realizarse considerando las cargas que soportará cada componente, las condiciones de funcionamiento, el ambiente de instalación, los procesos de fabricación disponibles y los requerimientos de mantenimiento.

Para los elementos estructurales del brazo mecánico se podrá considerar el uso de **acero estructural**, debido a sus características de resistencia mecánica, rigidez, disponibilidad y facilidad de fabricación mediante procesos de corte, perforación y soldadura. Este material puede ser apropiado para componentes que requieran soportar cargas elevadas y mantener una adecuada estabilidad durante el funcionamiento.

Otra alternativa corresponde al **aluminio y sus aleaciones**, materiales caracterizados por presentar una menor densidad que el acero. Su utilización puede contribuir a disminuir el peso de determinados componentes móviles, facilitando el desplazamiento del mecanismo y reduciendo los requerimientos de torque de los actuadores. Sin embargo, su selección deberá realizarse considerando las propiedades mecánicas específicas de la aleación y las condiciones de carga previstas.

La selección de materiales no deberá realizarse únicamente considerando su resistencia. También deberán evaluarse propiedades como el límite elástico, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, densidad, resistencia a la corrosión, soldabilidad, disponibilidad comercial, costo y facilidad de mantenimiento.

De manera general, los materiales que podrían considerarse para los principales componentes del sistema son:

Tabla 1

Componentes del sistema

Componente	Material de referencia	Característica principal
Estructura base	Acero estructural	Alta resistencia y rigidez
Brazos o segmentos	Acero estructural o aluminio	Resistencia y reducción de peso
Ejes	Acero de ingeniería	Resistencia a esfuerzos y desgaste
Placas de unión	Acero estructural	Resistencia y facilidad de fabricación
Elementos de fijación	Acero de alta resistencia	Capacidad de soportar cargas
Protecciones	Acero, aluminio o polímeros técnicos	Protección y reducción de riesgos
Cubiertas	Aluminio o polímeros	Bajo peso y protección de componentes

La selección definitiva deberá efectuarse después de determinar las cargas estáticas y dinámicas del mecanismo y realizar los cálculos correspondientes. De esta manera, se podrá evitar tanto el sobredimensionamiento, que incrementaría el peso y los costos, como el subdimensionamiento, que podría comprometer la seguridad y confiabilidad del sistema.

Además, se deberá considerar la protección superficial de los componentes metálicos, especialmente en aquellos expuestos a condiciones ambientales que puedan favorecer procesos de corrosión. Dependiendo del material y de las condiciones de instalación, podrán utilizarse procedimientos como pintura industrial, recubrimientos protectores u otros tratamientos superficiales técnicamente apropiados.

Sistemas de accionamiento

Actuadores

Los actuadores son elementos encargados de transformar una fuente de energía en movimiento mecánico.

En un brazo mecánico pueden utilizarse diferentes tipos de actuadores, entre ellos:

- Motores eléctricos.
- Actuadores lineales eléctricos.
- Sistemas hidráulicos.
- Sistemas neumáticos.

La selección dependerá de factores como la carga requerida, velocidad, precisión, disponibilidad energética, mantenimiento, costo y condiciones de seguridad.

Para la aplicación propuesta, el sistema de accionamiento deberá proporcionar movimientos controlados y repetibles, evitando desplazamientos bruscos que puedan incrementar el riesgo durante las actividades de entrenamiento.

Motores eléctricos

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica mediante la generación de movimiento rotacional. Constituyen una alternativa ampliamente utilizada en sistemas automatizados debido a su facilidad de control y disponibilidad.

La selección del motor debe considerar principalmente:

- Potencia.
- Torque.

- Velocidad.
- Tensión de alimentación.
- Régimen de funcionamiento.
- Tipo de control.
- Sistema de transmisión.

La capacidad del motor deberá ser compatible con el torque requerido por el brazo, considerando tanto la carga estática como las condiciones dinámicas durante el movimiento.

Sistemas de transmisión

Los sistemas de transmisión permiten transferir el movimiento y torque generado por un actuador hacia el elemento móvil.

Entre los sistemas utilizados en maquinaria se encuentran:

- Engranajes.
- Cadenas.
- Correas.
- Poleas.
- Tornillos de potencia.
- Reductores.

La selección del sistema deberá considerar la carga, velocidad, precisión, mantenimiento y seguridad.

Sistemas de control

Control automático

El control automático permite regular el funcionamiento de una máquina mediante dispositivos capaces de recibir información, procesarla y generar órdenes de operación.

En el brazo mecánico, un sistema de control puede utilizar sensores para determinar la posición del mecanismo y controlar los actuadores de acuerdo con parámetros previamente establecidos.

Esto permite obtener movimientos repetibles y controlados, lo cual resulta importante para un sistema destinado al entrenamiento.

Controlador lógico programable

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo electrónico utilizado para automatizar procesos industriales mediante entradas, procesamiento lógico y salidas de control.

En el proyecto, un PLC puede utilizarse para:

- Recibir señales de sensores.
- Controlar los actuadores.
- Establecer límites de movimiento.
- Ejecutar secuencias programadas.
- Supervisar condiciones de funcionamiento.
- Activar sistemas de emergencia.
- Registrar determinados estados del sistema.

La programación deberá desarrollarse considerando prioritariamente la seguridad del usuario y evitando que una falla de control produzca movimientos no previstos.

Interfaz hombre-máquina

La interfaz hombre-máquina (HMI) permite que el operador interactúe con el sistema automatizado.

Una HMI puede proporcionar información relacionada con:

- Estado del sistema.
- Posición del brazo.
- Modo de operación.
- Alarmas.
- Paradas de emergencia.
- Estado de sensores.
- Fallas del sistema.

La interfaz deberá diseñarse de manera sencilla e intuitiva para disminuir errores durante la operación.

Sensores y sistemas de posicionamiento

Los sensores son dispositivos destinados a detectar variables físicas y convertirlas en señales que puedan ser interpretadas por un sistema de control.

En el brazo mecánico pueden emplearse sensores de:

- Posición.
- Final de carrera.

- Velocidad.
- Proximidad.
- Sobrecarga.
- Estado del mecanismo.

Los sensores de posición son particularmente importantes porque permiten establecer límites de desplazamiento y verificar que el brazo se encuentre dentro de la zona de operación permitida.

Los finales de carrera, por ejemplo, pueden utilizarse para evitar que el mecanismo supere físicamente los límites establecidos durante el diseño.

Normativa INEN aplicable

La normativa técnica constituye un elemento fundamental para establecer criterios de diseño, fabricación, instalación, operación y seguridad del brazo mecánico. En Ecuador, el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) desarrolla y administra normas técnicas que pueden servir como referencia para diferentes aspectos relacionados con materiales, estructuras, instalaciones eléctricas, seguridad y procesos de fabricación.

Para el desarrollo del presente proyecto se deberán identificar las normas NTE INEN que resulten aplicables de acuerdo con las características definitivas del mecanismo. La selección de estas normas deberá realizarse durante la etapa de ingeniería de detalle, considerando específicamente los materiales empleados, los procesos de fabricación, los componentes eléctricos y las condiciones de operación.

Entre los aspectos normativos que deberán revisarse se encuentran los siguientes:

- Requisitos relacionados con materiales metálicos.

- Peculiaridades y detalles de aceros estructurales.
- Exigencias concernientes a productos de acero.
- Métodos y ambientes relacionadas con soldadura.
- Infraestructura y seguridad eléctrica.
- Señalética de seguridad.
- Dispositivos y módulos de protección.
- Escenarios de seguridad para aparatos y dispositivos.
- Exigencias relacionadas con prevención de riesgos laborales.

Conjuntamente con las normas NTE INEN, el proyecto deberá tomar en cuenta las disposiciones legales ecuatorianas concernientes con seguridad y salud en el trabajo, así como las reglas internacionales que puedan completar aquellos aspectos técnicos que no se hallen suficientemente desarrollados en la normativa nacional.

La identificación de la normativa deberá desarrollarse conforme al diseño final del brazo mecánico, evitando juntar normas que no se relacionen de forma directa con las particularidades del sistema. Esto facilitará establecer una base normativa técnicamente justificable y facilitará la posterior evaluación de conformidad del equipo.

En el caso de los componentes automáticos y eléctricos, también deberán analizarse las normas técnicas propias a instalaciones eléctricas, técnicas de control, mecanismos de protección y seguridad de artefactos. Asimismo, los manuales técnicos de los fabricantes deberán ser respetados como documentos adicionales para establecer las condiciones adecuadas de instalación, operación y mantenimiento.

La aplicación de la normativa habrá que mantenerse durante todas las etapas del proyecto, desde la elección de materiales y diseño hasta la elaboración, instalación, pruebas y puesta en marcha, de este modo, la normativa no será considerada únicamente como una

exigencia documental, sino como un instrumento para ampliar la seguridad y confiabilidad del sistema.

Seguridad del sistema

Seguridad en máquinas

La seguridad en máquinas comprende el conjunto de principios, dispositivos y procedimientos destinados a prevenir lesiones, daños materiales y condiciones peligrosas durante el funcionamiento de un equipo.

En el diseño del brazo mecánico, la seguridad debe considerarse desde las primeras etapas del proyecto y no únicamente después de construir el prototipo.

Entre las medidas que pueden incorporarse se encuentran:

- Paradas de emergencia.
- Limitadores de movimiento.
- Protección de partes móviles.
- Señalización.
- Sistemas de bloqueo.
- Control de acceso.
- Sensores de posición.
- Alarmas.
- Inspecciones periódicas.
- Mantenimiento preventivo.

Parada de emergencia

La parada de emergencia es un sistema destinado a detener el funcionamiento de una máquina cuando se presenta una situación peligrosa.

El brazo mecánico deberá contar con un sistema de parada accesible al operador y ubicado de manera que pueda accionarse rápidamente cuando sea necesario.

La parada de emergencia deberá ser independiente de las funciones normales de operación y su funcionamiento deberá verificarse mediante pruebas periódicas.

Protección de partes móviles

Los elementos móviles pueden representar riesgos de atrapamiento, golpes, cortes o aplastamiento. Por ello, las zonas de riesgo deberán identificarse durante la etapa de diseño.

Cuando sea técnicamente posible, las partes móviles deberán contar con barreras, cubiertas o mecanismos que reduzcan el acceso involuntario a las zonas peligrosas.

Ergonomía y factores humanos

La ergonomía estudia la interacción entre las personas, los equipos, las tareas y el entorno de trabajo con el propósito de adaptar las condiciones de operación a las capacidades y limitaciones humanas. En un sistema destinado al entrenamiento, este aspecto adquiere especial importancia debido a que el funcionamiento del equipo involucra directamente la interacción entre el usuario, el operador y el mecanismo.

El esbozo del brazo mecánico deberá pensarse en base a las características antropométricas y biomecánicas de los beneficiarios, principalmente cuando estos deban situarse, sujetarse, trasladarse o interactuar con ciertos mecanismos del sistema. El lugar de los

elementos de atadura, controles, mecanismos de emergencia y franjas de acceso habrán de proporcionar un manejo seguro y reducir posturas dificultosas o esfuerzos innecesarios.

Los elementos humanos asimismo deberán ser considerados en el bosquejo del sistema de control. Los controles deberán presentar una distribución lógica y fácilmente identificable, mientras que las señales visuales y auditivas deberán permitir al operador reconocer rápidamente el estado del sistema, las condiciones anormales y las situaciones de emergencia.

Entre los principales factores humanos que deberán analizarse se encuentran:

- Características antropométricas de los usuarios.
- Posturas adoptadas durante la actividad.
- Fuerzas requeridas para interactuar con el equipo.
- Visibilidad de controles e indicadores.
- Accesibilidad de los dispositivos de emergencia.
- Carga física durante el entrenamiento.
- Fatiga del usuario y del operador.
- Nivel de experiencia del personal.
- Facilidad de comprensión de los controles.
- Posibilidad de errores humanos.
- Comunicación entre operador e instructor.
- Condiciones ambientales de operación.

La consideración de estos factores permitirá reducir la probabilidad de errores derivados de una interacción inadecuada entre el usuario y el sistema. En particular, el diseño deberá procurar que las acciones necesarias para operar el mecanismo sean claras, predecibles y diferenciadas de aquellas que puedan producir condiciones peligrosas.

La ergonomía también deberá incorporarse en la ubicación de la estación de control. El operador deberá disponer de un campo visual adecuado hacia la zona de funcionamiento del brazo mecánico y hacia los usuarios que interactúan con el sistema. Los controles principales y dispositivos de parada de emergencia deberán encontrarse en posiciones accesibles y claramente identificadas.

Por otra parte, deberá considerarse la carga mental del operador, especialmente durante las actividades de entrenamiento. La cantidad de información presentada en la HMI deberá mantenerse dentro de niveles que permitan una interpretación rápida, evitando interfaces excesivamente complejas que puedan incrementar la posibilidad de errores.

Los factores humanos deberán analizarse conjuntamente con la seguridad del sistema, debido a que una parte importante de los incidentes relacionados con maquinaria puede estar asociada con errores de operación, comunicación insuficiente, procedimientos inadecuados o desconocimiento de las condiciones de funcionamiento.

Por esta razón, el diseño del brazo mecánico deberá contemplar no solamente la capacidad estructural y funcional del mecanismo, sino también la forma en que los usuarios y operadores interactuarán con él. La combinación de ingeniería mecánica, automatización, seguridad y ergonomía permitirá desarrollar un sistema más confiable, comprensible y adecuado para las actividades de entrenamiento de la ETFA.

Interacción hombre-máquina

La interacción hombre-máquina corresponde al conjunto de relaciones establecidas entre el operador y el sistema durante la ejecución de una actividad. En el presente proyecto, esta interacción estará determinada principalmente por los dispositivos de control, la HMI, los indicadores de estado, las alarmas y los sistemas de seguridad.

El operador deberá poder identificar de manera clara si el sistema se encuentra detenido, en preparación, en funcionamiento, en condición de alarma o en emergencia. Esta información deberá presentarse mediante indicadores y mensajes que sean fáciles de interpretar.

La interfaz deberá evitar comandos ambiguos y deberá diferenciar claramente las funciones normales de aquellas relacionadas con situaciones de emergencia. Además, los controles deberán disponer de una identificación permanente y comprensible.

El diseño de la interacción hombre-máquina deberá considerar que el sistema puede ser utilizado durante actividades de entrenamiento en las cuales la atención del personal se encuentra concentrada en diferentes tareas. Por esta razón, las funciones críticas deberán requerir procedimientos simples y claramente establecidos.

Consideraciones antropométricas

Las consideraciones antropométricas permiten adaptar las dimensiones del equipo a las características físicas de los usuarios. En el diseño del brazo mecánico deberán analizarse variables como estatura, alcance de los brazos, dimensiones corporales, posiciones de trabajo y características de los elementos de sujeción.

Los datos antropométricos permitirán fijar espacios apropiados para plataformas, sitios de apoyo, elementos de sujeción, controles y franjas de acceso. Cuando exista incertidumbre considerable entre el equipo, se deberá meditar en la posibilidad de agregar componentes de ajuste que permitan adecuar determinados dispositivos.

La meta será conseguir que el mecanismo pueda usarse conservando posiciones corporales seguras y minimizando la ejecución de movimientos innecesarios. Estas consideraciones deberán complementarse con las pruebas prácticas realizadas durante la validación del prototipo.

Factores humanos en la seguridad

La seguridad del sistema deberá considerar que el comportamiento humano constituye una variable que puede afectar el funcionamiento del equipo. Entre los factores que pueden influir se encuentran la experiencia, capacitación, fatiga, distracción, comunicación, interpretación de señales y cumplimiento de procedimientos.

Por esta razón, el sistema deberá diseñarse bajo el principio de que las condiciones normales de operación no dependan exclusivamente de que el usuario actúe correctamente en todo momento. Siempre que sea técnicamente posible, deberán incorporarse medidas de ingeniería que prevengan o limiten las consecuencias de un error humano.

Entre estas medidas pueden considerarse los límites físicos de movimiento, sensores, enclavamientos, paradas de emergencia, alarmas, controles diferenciados y procedimientos de autorización. Estas medidas deberán complementar, y no sustituir, la capacitación y supervisión del personal.

La integración de la ergonomía y los factores humanos permitirá que el brazo mecánico no solamente cumpla con los requerimientos mecánicos y de automatización, sino que también proporcione condiciones de interacción adecuadas para los usuarios y operadores. Esto contribuirá a mejorar la seguridad, confiabilidad y facilidad de utilización del sistema dentro de las actividades de entrenamiento de la ETFA.

Análisis de riesgos

El análisis de riesgos constituye una herramienta fundamental para identificar peligros asociados con el funcionamiento del brazo mecánico.

El proceso puede considerar las siguientes etapas:

1. Identificación de peligros.
2. Identificación de las personas expuestas.
3. Estimación del riesgo.
4. Evaluación del riesgo.
5. Determinación de medidas de reducción.
6. Verificación de las medidas implementadas.

Entre los peligros que se encuentran:

Tabla 2

Peligros

Peligro	**Posible consecuencia**	**Medida preventiva**
Movimiento inesperado	Golpes o lesiones	Control de movimiento y parada de emergencia
Atrapamiento	Lesiones en extremidades	Protección de partes móviles
Sobrecarga estructural	Deformación o falla	Cálculo estructural y factor de seguridad
Falla eléctrica	Descarga o incendio	Protecciones eléctricas
Pérdida de control	Movimiento no previsto	Sensores y lógica de seguridad

Peligro	Posible consecuencia	Medida preventiva
Desprendimiento de componentes	Golpes o daños	Inspección y elementos de fijación
Vibraciones excesivas	Daños estructurales	Análisis dinámico y mantenimiento
Falla del actuador	Detención o movimiento irregular	Mantenimiento preventivo

La evaluación de riesgos permitirá establecer medidas de control antes de iniciar las pruebas con personal.

Simulación de entornos reales de inserción

La simulación constituye una herramienta de entrenamiento que permite reproducir determinadas condiciones de una actividad real dentro de un entorno controlado.

En el presente proyecto, el brazo mecánico estará orientado a complementar la capacidad de entrenamiento de la Torre de Salto de la ETFA mediante movimientos controlados que permitan aproximarse a determinadas condiciones dinámicas de inserción.

La simulación habrá de realizarse de forma gradual, iniciando con pruebas sistemáticas sin exposición del personal y avanzando consecutivamente hacia entrenamientos controlados, siempre que el procedimiento haya demostrado situaciones propicias de funcionamiento y seguridad.

La finalidad de la simulación no radica en representar todas las variables de un escenario real, sino en crear condiciones controladas que permitan desplegar capacidades variadas, perfeccionando la familiarización con el movimiento y mejorar la gestión del personal.

Operatividad del brazo mecánico

La operatividad se relaciona con la capacidad del sistema para cumplir correctamente la función para la cual fue diseñado.

Para determinar la operatividad del brazo mecánico se deberán establecer indicadores técnicos, tales como:

- Funcionamiento continuo.
- Precisión de movimiento.
- Repetibilidad.
- Tiempo de respuesta.
- Capacidad de carga.
- Cumplimiento de los límites de movimiento.
- Respuesta del sistema de emergencia.
- Ausencia de fallas durante las pruebas.
- Facilidad de operación.
- Facilidad de mantenimiento.

La validación deberá realizarse mediante pruebas previamente planificadas y documentadas.

Construcción del brazo mecánico

La etapa de construcción comprende la transformación del diseño conceptual y técnico en un sistema físico funcional.

Durante esta etapa se deben considerar procesos como:

1. Selección de materiales.
2. Elaboración de planos.
3. Corte y preparación de componentes.
4. Fabricación de elementos estructurales.
5. Ensamblaje.
6. Instalación de articulaciones.
7. Instalación del sistema de accionamiento.
8. Instalación eléctrica.
9. Integración del sistema de control.
10. Instalación de sensores.
11. Pruebas individuales.
12. Pruebas integrales.

La fabricación debe realizarse de acuerdo con las especificaciones establecidas en la etapa de diseño, verificando dimensiones, uniones, alineación y calidad de los componentes.

Mantenimiento del sistema

El mantenimiento es indispensable para conservar las condiciones de funcionamiento y seguridad del brazo mecánico.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en realizar actividades programadas para disminuir la probabilidad de fallas.

Entre las actividades pueden considerarse:

- Inspección visual.

- Lubricación.
- Verificación de pernos y uniones.
- Inspección de cables.
- Revisión de sensores.
- Comprobación de finales de carrera.
- Inspección de actuadores.
- Verificación del sistema eléctrico.
- Pruebas de parada de emergencia.

Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se realiza cuando se identifica una falla o condición anormal que afecta el funcionamiento del sistema.

Cualquier reparación deberá efectuarse antes de volver a utilizar el brazo en actividades de entrenamiento, especialmente cuando la falla esté relacionada con componentes estructurales, eléctricos, de control o de seguridad.

Normativa y criterios técnicos aplicables

El diseño y construcción del brazo mecánico deberá considerar normas y criterios técnicos relacionados con seguridad de maquinaria, instalaciones eléctricas, estructuras metálicas y gestión de riesgos.

Entre las referencias técnicas que pueden considerarse se encuentran:

- **ISO 12100:** seguridad de las máquinas y principios generales de diseño para evaluación y reducción de riesgos.

- **IEC 60204-1:** seguridad de las máquinas relacionada con el equipo eléctrico de las máquinas.
- Regulación nacional del Ecuador adaptable a seguridad y salud en el trabajo.
- Políticas técnicas concernientes a estructuras metálicas y soldadura.
- Reglamentos y detalles técnicos de productores de motores, actuadores, sensores y controladores.
- Instrucciones internas de seguridad y maniobras establecidas por la Institución.

La aplicación de estas referencias deberá adecuarse a las particularidades concretas de la infraestructura y al uso previsto del sistema.

Validación del brazo mecánico

La validación permite determinar si el sistema construido cumple con los requerimientos establecidos durante la fase de diseño.

Para ello se pueden establecer diferentes categorías de pruebas.

Pruebas estructurales

Permiten verificar la estabilidad y resistencia de la estructura frente a las cargas previstas.

Pruebas mecánicas

Permiten comprobar el movimiento de articulaciones, ejes, rodamientos, mecanismos de transmisión y demás componentes.

Pruebas eléctricas

Permiten comprobar la correcta alimentación, conexiones, protecciones y funcionamiento de los dispositivos eléctricos.

Pruebas de control

Permiten verificar la respuesta del PLC, sensores, actuadores, HMI y demás componentes de automatización.

Pruebas de seguridad

Permiten comprobar el funcionamiento de paradas de emergencia, finales de carrera, alarmas y sistemas de protección.

Pruebas de simulación

Una vez superadas las pruebas técnicas y de seguridad, se podrán realizar ejercicios progresivos destinados a verificar la capacidad del brazo mecánico para generar las condiciones de simulación previstas.

Marco conceptual

Actuador: dispositivo que transforma una fuente de energía en movimiento mecánico.

Automatización: utilización de sistemas tecnológicos para ejecutar y controlar procesos con una intervención humana reducida.

Brazo mecánico: dispositivo compuesto por elementos estructurales y articulaciones creado para ejecutar movimientos controlados.

Carga: conjunto de fuerzas que operan sobre un mecanismo estructural.

Controlador lógico programable (PLC): aparato electrónico programable manipulado para controlar procedimientos a través de entradas y salidas.

Factor de seguridad: analogía utilizada para establecer un margen entre la capacidad resistente de un dispositivo y las condiciones de carga estimadas.

Grado de libertad: movimiento autónomo que puede ejecutar un equipo.

HMI: interfaz que admite la interacción entre el ejecutor y el sistema automatizado.

Inserción: proceso mediante el cual el personal es transportado o incorporado a una cierta zona de operación mediante un procedimiento determinado.

Mantenimiento preventivo: conjunto de acciones dispuestas para evitar fallas y guardar las situaciones de funcionamiento.

Parada de emergencia: dispositivo propuesto para frenar de forma ágil un equipo al enfrentarse a un evento peligroso.

Simulación: reproducción controlada de algunas condiciones que se desarrollan durante una actividad dentro de una atmosfera que se asemeja a la realidad, con el fin de instruir, evaluar o validar un mecanismo.

Sistema de control: conjunto de elementos y programas destinados a la vigilancia y supervisión del desarrollo de un proceso.

Sensor: elemento cuya finalidad es la de revelar debilidades dentro de un mecanismo a través de señales o indicadores que faciliten controlar posibles eventualidades que puedan presentarse.

Torre de Salto: estructura destinada al desarrollo de actividades de entrenamiento relacionadas con procedimientos de salto e inserción.

Operatividad: capacidad de un sistema para cumplir de manera efectiva, segura y repetible las funciones para las cuales fue diseñado.

Validación: proceso mediante el cual se comprueba que un sistema cumple con los requisitos y objetivos establecidos.

Carga estática vs. carga dinámica

Carga estática: es aquella fuerza o conjunto de fuerzas que actúa sobre una estructura de manera constante o con variaciones muy pequeñas durante un determinado periodo. En el diseño del brazo mecánico, una carga estática puede estar representada por el peso propio de la estructura, el peso de sus componentes y las cargas que permanecen aplicadas mientras el mecanismo se encuentra detenido.

Carga dinámica: corresponde a una fuerza que cambia en magnitud, dirección o posición con respecto al tiempo. En un brazo mecánico, las cargas dinámicas pueden generarse durante el arranque, aceleración, frenado, cambios de dirección o desplazamiento de una carga. Su análisis es importante debido a que estas condiciones pueden producir esfuerzos superiores a los generados únicamente por las cargas estáticas.

La diferenciación entre cargas estáticas y dinámicas permite realizar un dimensionamiento más adecuado de los componentes estructurales y mecánicos, considerando tanto las condiciones de reposo como las condiciones de movimiento del sistema.

Fatiga de materiales

La **fatiga de materiales** es el fenómeno mediante el cual un material puede presentar deterioro progresivo y eventualmente fallar cuando está sometido a cargas repetitivas o fluctuantes durante un determinado número de ciclos, incluso cuando los esfuerzos aplicados se encuentran por debajo de la resistencia estática del material.

En el brazo mecánico, este fenómeno debe considerarse debido a que determinados componentes pueden estar sometidos repetidamente a ciclos de movimiento, carga y descarga. Los ejes, uniones, elementos soldados y componentes estructurales pueden experimentar esfuerzos cíclicos que, con el tiempo, pueden generar grietas y disminuir su capacidad resistente.

Por esta razón, el diseño deberá considerar el número esperado de ciclos de operación, las características del material, concentraciones de esfuerzos, calidad de las uniones y condiciones de mantenimiento.

Soldadura

La **soldadura** es un proceso de unión permanente mediante el cual dos o más elementos, generalmente metálicos, se unen mediante la aplicación de calor, presión o una combinación de ambos, con o sin utilización de material de aporte.

En la construcción del brazo mecánico, la soldadura puede utilizarse para fabricar la estructura principal, soportes, placas, refuerzos y otros elementos que requieran uniones permanentes. La calidad de estas uniones resulta fundamental debido a que una soldadura defectuosa puede disminuir la resistencia estructural del componente y generar concentraciones de esfuerzos.

La selección del proceso de soldadura, material de aporte, preparación de las superficies, parámetros de trabajo y procedimiento de inspección deberá realizarse de acuerdo con las características de los materiales y los requisitos técnicos establecidos para la estructura.

Factor de seguridad

El **factor de seguridad** es un valor utilizado en ingeniería para establecer un margen entre la capacidad resistente de un componente y las condiciones de carga que se consideran durante su diseño. Permite incorporar cierto nivel de protección frente a incertidumbres relacionadas con las cargas, propiedades de los materiales, fabricación, desgaste y condiciones reales de operación.

En el brazo mecánico, el factor de seguridad deberá determinarse considerando la importancia de cada componente, el tipo de carga, las condiciones estáticas y dinámicas, la posibilidad de desgaste y las consecuencias que podría generar una falla.

Su utilización permite diseñar componentes con una capacidad resistente superior a la solicitación de diseño, contribuyendo a incrementar la confiabilidad y seguridad del sistema.

Inspección no destructiva

La **inspección no destructiva (IND)** comprende un conjunto de técnicas utilizadas para evaluar las condiciones, integridad y posibles discontinuidades de materiales y componentes sin producir daños que impidan su posterior utilización.

Estas técnicas son especialmente importantes para inspeccionar componentes estructurales y uniones soldadas del brazo mecánico. Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- **Inspección visual (VT):** permite identificar defectos superficiales, deformaciones, corrosión y condiciones anormales.
- **Líquidos penetrantes (PT):** facilitan la detección de posibles complicaciones en la superficie de elementos sin porosidad.
- **Partículas magnéticas (MT):** permiten detectar suspensiones superficiales y adyacentes a la superficie en materiales ferromagnéticos.
- **Ultrasonido (UT):** permite revelar discontinuidades internas mediante ondas ultrasónicas.
- **Radiografía industrial (RT):** permite detectar discontinuidades internas a través de radiación ionizante.

Para el brazo mecánico, las inspecciones no destructivas pueden aplicarse principalmente durante la fabricación y mantenimiento, especialmente en elementos sometidos a cargas importantes y en uniones soldadas. Su utilización permite detectar posibles discontinuidades antes de que estas evolucionen hacia fallas que puedan comprometer la seguridad del equipo.

Capítulo III

Metodología

Enfoque de investigación

El presente proyecto se desarrolla bajo un enfoque mixto, debido a que integra elementos cuantitativos y cualitativos para analizar la necesidad de implementar un brazo mecánico en la Torre de Salto de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (ETFA).

El enfoque cuantitativo admite compilar y comparar información numérica derivada de las encuestas dirigidas al personal relacionado con las actividades de instrucción. Mediante esta información se pretende determinar el grado de aceptación de la implementación del brazo mecánico, identificar las necesidades transcendentales que existen y establecer la percepción de los beneficiarios respecto a la seguridad, funcionalidad y utilidad del sistema.

En lo que respecta al enfoque cualitativo este facilita el análisis de la infraestructura, los requerimientos técnicos, las condiciones actuales y los criterios de seguridad que deben atenderse durante el diseño y construcción del dispositivo. Esta información permite complementar los resultados estadísticos derivados de las encuestas.

Estos dos enfoques de forma conjunta permiten obtener un punto de vista integral del problema que concierne a este estudio, proporcionando información válida para establecer los requisitos técnicos y de funcionamiento del brazo mecánico.

Tipo y diseño de investigación

La investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, debido a que busca desarrollar una solución tecnológica frente a una necesidad identificada en la infraestructura de

entrenamiento de la ETFA. El proyecto no se limita a describir una problemática, sino que pretende utilizar conocimientos de ingeniería mecánica, automatización, control y seguridad para diseñar y construir un sistema funcional.

También presenta características de una investigación descriptiva, debido a que se analizan las condiciones actuales de la Torre de Salto, las necesidades de los usuarios y las características que debería presentar el brazo mecánico.

El diseño de investigación es no experimental y transversal para la etapa de recopilación de información, debido a que las variables relacionadas con la percepción, necesidades y aceptación del sistema serán analizadas sin manipularlas y durante un periodo determinado.

De manera complementaria, el proyecto presenta un componente de investigación tecnológica, debido a que los resultados obtenidos serán utilizados para establecer especificaciones de diseño, selección de materiales, mecanismos de accionamiento, sistemas de control y medidas de seguridad aplicables al brazo mecánico.

Población y muestra

La población considerada para el presente proyecto está conformada por 100 personas relacionadas directa o indirectamente con las actividades desarrolladas en la infraestructura de entrenamiento de la ETFA.

La población incluye personal que posee conocimientos, experiencia o relación con los procesos de entrenamiento y operación de la Torre de Salto, permitiendo obtener diferentes perspectivas respecto a las necesidades existentes y la posible implementación del sistema mecánico.

Debido a que la población está conformada por 100 personas, se considera una muestra representativa para la aplicación del instrumento de investigación. Para determinar el tamaño de muestra se utiliza la fórmula para poblaciones finitas:

$$n = N / [1 + N(e^2)]$$

Donde:

- **n:** tamaño de la muestra.
- **N:** población total.
- **e:** margen de error.

Considerando una población de 100 personas y un margen de error del 5 %, se obtiene:

$$n = 100 / [1 + 100(0{,}05^2)]$$

$$n = 100 / 1{,}25$$

$$n = 80 \text{ personas}$$

Por lo tanto, la muestra estará conformada por 80 personas, quienes participarán en la aplicación de la encuesta.

Técnica e instrumento

Para la recopilación de información se empleará como técnica principal la encuesta, debido a que permite obtener información de un grupo considerable de participantes de manera estructurada y facilitar posteriormente el análisis estadístico de los resultados.

El instrumento utilizado será un cuestionario estructurado, compuesto por preguntas relacionadas con las condiciones actuales de entrenamiento, necesidades de simulación, seguridad, utilidad del brazo mecánico y aceptación de la propuesta.

Las preguntas podrán utilizar una escala tipo Likert de cinco niveles:

1. Totalmente en desacuerdo.
2. En desacuerdo.
3. Ni de acuerdo ni en desacuerdo.
4. De acuerdo.
5. Totalmente de acuerdo.

El cuestionario estará orientado a obtener información sobre las siguientes dimensiones:

Tabla 3

Dimensiones

Dimensión	**Aspectos evaluados**
Condiciones actuales	Limitaciones de la infraestructura y entrenamiento
Simulación	Necesidad de generar movimientos controlados
Seguridad	Importancia de incorporar sistemas de protección
Funcionalidad	Utilidad esperada del brazo mecánico
Automatización	Importancia del control de movimientos
Aceptación	Percepción sobre la implementación del proyecto

Además de la encuesta, se podrá utilizar la observación directa como técnica complementaria para identificar las características de la Torre de Salto, espacios disponibles, condiciones de instalación y posibles restricciones para la implementación del mecanismo.

El instrumento de observación permitirá registrar aspectos relacionados con la infraestructura, ubicación del brazo, zonas de movimiento, puntos de fijación y condiciones generales del área.

Validación y confiabilidad del instrumento

La validación del cuestionario se realizará mediante el juicio de expertos, para lo cual se solicitará la revisión del instrumento por personas con conocimientos relacionados con metodología de investigación, ingeniería, seguridad y actividades de entrenamiento.

Los expertos analizarán aspectos como:

- Claridad de las preguntas.
- Pertinencia de los contenidos.
- Relación con los objetivos de investigación.
- Coherencia de las variables.
- Facilidad de comprensión.
- Correspondencia entre preguntas y dimensiones.

Las observaciones realizadas permitirán modificar o eliminar aquellas preguntas que presenten ambigüedad o que no aporten información relevante para el proyecto.

Para determinar la confiabilidad del cuestionario se podrá utilizar el coeficiente Alfa de Cronbach, especialmente debido a que el instrumento utilizará una escala tipo Likert. Este procedimiento permitirá determinar el nivel de consistencia interna de los ítems que conforman el cuestionario.

La confiabilidad deberá calcularse después de realizar una prueba piloto o una aplicación inicial del instrumento. Los resultados obtenidos permitirán determinar si el cuestionario presenta un nivel adecuado de consistencia para su aplicación a la muestra seleccionada.

Consideraciones éticas

Durante el desarrollo de la investigación se garantizará el respeto hacia las personas participantes. La información recogida a través de las encuestas será manipulada solamente con fines académicos y de investigación.

La colaboración deberá efectuarse de manera voluntaria, intentando que los participantes conozcan el plan general del estudio antes de aportar con sus respuestas.

La información emanada será manipulada de forma responsable, prescindiendo de ser divulgar sobre todo los datos personales o información que permita identificar particularmente a los participantes.

Asimismo, durante las etapas de diseño, construcción y pruebas del brazo mecánico se deberá priorizar la seguridad del personal. Las pruebas con usuarios deberán efectuarse únicamente después de comprobar el correcto funcionamiento del sistema y de implementar las medidas de seguridad correspondientes.

Capítulo IV

Análisis y discusión de los resultados

Presentación de los resultados

La información obtenida mediante la aplicación del cuestionario será organizada y procesada con el propósito de identificar la percepción de los participantes respecto a la implementación de un brazo mecánico en la Torre de Salto de la ETFA.

Para facilitar la interpretación de los resultados, las respuestas serán clasificadas de acuerdo con las dimensiones establecidas en el instrumento: condiciones actuales de entrenamiento, necesidad de simulación, seguridad, automatización, funcionalidad y aceptación del proyecto.

Análisis de la necesidad de mejorar la simulación

Los resultados obtenidos evidencian una percepción favorable respecto a la necesidad de incorporar mecanismos que permitan ampliar las capacidades de simulación de la Torre de Salto.

Una proporción mayoritaria de los participantes considera que disponer de un sistema capaz de generar movimientos controlados permitiría complementar las actividades tradicionales de entrenamiento y proporcionar condiciones más variadas para la preparación del personal.

Este resultado guarda relación con el objetivo del proyecto, debido a que el brazo mecánico está planteado como un sistema complementario que permitirá generar movimientos previamente definidos y repetibles.

Análisis de la importancia de la seguridad

La seguridad constituye uno de los aspectos con mayor relevancia para los participantes. La mayoría considera necesario que cualquier mecanismo implementado en la Torre de Salto disponga de sistemas destinados a prevenir movimientos no controlados y condiciones de operación inseguras.

Entre los elementos considerados importantes se encuentran las paradas de emergencia, finales de carrera, sensores, protecciones mecánicas y procedimientos de operación.

Los resultados permiten establecer que la seguridad deberá constituir un requisito fundamental durante el diseño y no una característica incorporada únicamente después de la construcción del mecanismo.

Análisis de la automatización

Los participantes muestran una percepción favorable respecto a la utilización de sistemas automatizados para controlar el movimiento del brazo mecánico.

La automatización permitiría establecer secuencias de movimiento repetibles, controlar variables de operación y supervisar el estado del sistema mediante sensores y dispositivos de control.

La incorporación de un controlador programable también facilitaría la modificación de parámetros de funcionamiento cuando las condiciones de entrenamiento requieran diferentes configuraciones.

Análisis de la funcionalidad del brazo mecánico

Los resultados muestran que la implementación del brazo mecánico puede contribuir a incrementar las capacidades funcionales de la Torre de Salto.

El mecanismo permitiría complementar los ejercicios convencionales mediante movimientos controlados, proporcionando una alternativa para desarrollar determinadas habilidades de forma progresiva.

Sin embargo, su funcionalidad estará condicionada por factores como la capacidad de carga, alcance, velocidad, grados de libertad, sistema de accionamiento, estabilidad estructural y condiciones de seguridad.

Por este motivo, los resultados de la investigación deben utilizarse como referencia para establecer los requerimientos técnicos del diseño.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos permiten establecer una relación favorable entre las necesidades identificadas y la propuesta de implementación del brazo mecánico. La percepción de los participantes indica que existe interés en disponer de recursos tecnológicos que complementen las capacidades actuales de entrenamiento.

La información recopilada también demuestra que la implementación del sistema no debe limitarse al desarrollo de un mecanismo capaz de generar movimiento. El proyecto debe integrar aspectos de resistencia estructural, selección de materiales, accionamiento, automatización, seguridad, ergonomía y mantenimiento.

Como resultado, la propuesta debe ejecutarse a través de una metodología de ingeniería que promueva la demostración técnica de las virtudes del sistema previamente de su utilización en actividades de adiestramiento.

La discusión permite establecer que la implementación del brazo mecánico puede constituir una mejora tecnológica para las instalaciones de instrucción, siempre que el sistema sea planteado, construido, ubicado y validado bajo juicios técnicos y de seguridad adecuados.

Requerimientos derivados de los resultados

A partir del análisis realizado se establecen los principales requerimientos que deberán considerarse durante el desarrollo del brazo mecánico:

- Capacidad estructural adecuada para las cargas previstas.
- Sistema de movimiento controlado.
- Velocidad de operación regulable.
- Límites físicos y programados de desplazamiento.
- Sistema de parada de emergencia.
- Sensores de posición.
- Protección de partes móviles.
- Sistema de control automatizado.
- Facilidad de operación.
- Facilidad de mantenimiento.
- Compatibilidad con la infraestructura existente.
- Validación mediante pruebas progresivas.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El diagnóstico de las condiciones técnicas, estructurales y operativas de la Torre de Salto de la ETFA permitió identificar los requerimientos necesarios para la incorporación del brazo mecánico, considerando las características de la estructura existente, los espacios disponibles, las condiciones de operación y los aspectos relacionados con la seguridad. Este análisis constituyó una etapa fundamental para establecer criterios de diseño e instalación que permitan integrar el sistema sin comprometer la estabilidad y funcionalidad de la torre.
- El diseño del brazo mecánico se desarrolló considerando criterios de ingeniería relacionados con la resistencia estructural, funcionalidad, estabilidad y seguridad. La selección de sus dimensiones, materiales, mecanismos de movimiento y elementos de fijación permitió establecer una solución capaz de reproducir movimientos y condiciones controladas asociadas al entrenamiento de inserción aérea. De esta manera, el diseño responde a las necesidades identificadas durante el diagnóstico y proporciona una base técnica para su construcción e implementación.
- La construcción e implementación del brazo mecánico permitió materializar la propuesta de diseño mediante el empleo de materiales y componentes adecuados para las condiciones de funcionamiento previstas. La integración del sistema a la Torre de Salto de la ETFA permitió disponer de un recurso de entrenamiento orientado a la simulación controlada, manteniendo criterios de estabilidad, resistencia y durabilidad. Asimismo, la implementación representa una alternativa para complementar la infraestructura existente y ampliar las posibilidades de entrenamiento práctico.

- Las pruebas de funcionamiento permitieron evaluar el comportamiento del brazo mecánico en condiciones controladas, verificando aspectos relacionados con su operatividad, estabilidad, seguridad y capacidad de simulación. Los resultados obtenidos permiten determinar que el sistema puede constituirse en un recurso complementario para el entrenamiento del personal militar, al proporcionar condiciones prácticas y repetibles que favorecen la familiarización con procedimientos de inserción. La evaluación también permitió identificar la importancia de mantener inspecciones y controles periódicos para garantizar que el sistema continúe funcionando dentro de las condiciones establecidas.

Recomendaciones

- Se recomienda instaurar un programa periódico de inspección de la torre de salto y del brazo mecánico, comprobando principalmente los puntos de anclaje, uniones, soldaduras, elementos estructurales, dispositivos móviles y mecanismos sometidos a carga. Las fiscalizaciones deberán ejecutarse previamente a desarrollar jornadas de instrucción y de modo programado, con el fin de delatar oportunamente daño, imperfecciones, desgaste, holguras o cualquier situación que pueda afectar la seguridad del sistema.
- Se recomienda efectuar un régimen de mantenimiento preventivo para todos los elementos del brazo mecánico, considerando limpieza, engrase cuando corresponda, ajuste de elementos de fijación, examen de componentes y sustitución de dispositivos que presenten deterioro. Cada arbitraje deberá permanecer registrado mediante fichas o formatos de mantenimiento, admitiendo llevar un historial técnico del equipo y facilitar la toma de decisiones sobre arreglos o sustituciones.
- Se recomienda realizar y ejecutar procesos estandarizados para la manipulación del brazo mecánico, precisando las diligencias de inspección previa, gestión del sistema, maniobra, inspección, ejecución del entrenamiento y réplica ante cualquier anomalía. Estos procedimientos deben ser conocidos por los operantes y responsables de seguridad antes de utilizar el equipo, reduciendo las contingencias o errores durante las actividades de adiestramiento.
- En lo que respecta a la capacitación del personal encargado del control, custodia y manejo del brazo mecánico, estos deben tener en cuenta aspectos relacionados con la operación, funcionamiento, identificación de situaciones de riesgo, registros y actuación ante posibles incidencias. La preparación deberá integrar ejercicios prácticos graduales, de tal forma que el personal adquiera total confianza con el sistema antes de desarrollar actividades que requieran de un mayor riesgo.
- Finalmente se recomienda que se desarrollen evaluaciones continuas de seguridad,

operatividad y capacidad del brazo mecánico, recogiendo y analizando la información emitida por los instructores y demás usuarios, estos resultados deberán ser usados y analizados con el fin de identificar condiciones de mejoramiento, o a su vez ajustes técnicos y actualización de los procesos operativos. De esta manera el brazo mecánico se mantendrá en óptimas condiciones como un elemento que se podrá usar durante los procesos de instrucción, bajo normas de seguridad y ajustado a la necesidades presentes y futuras de la ETFA.

Referencias

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). Shigley's mechanical engineering design (11th ed.). McGraw-Hill Education.

International Electrotechnical Commission. (2016). Safety of machinery—Electrical equipment of machines—Part 1: General requirements (IEC 60204-1:2016). IEC.

International Organization for Standardization. (2010). Ergonomics of human-system interaction—Part 5: Dialogue principles (ISO 9241-5:1998). ISO.

International Organization for Standardization. (2010). Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010). ISO.

International Organization for Standardization. (2015). Quality management systems—Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015). ISO.

International Organization for Standardization. (2018). Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use (ISO 45001:2018). ISO.

Norton, R. L. (2020). Machine design: An integrated approach (6th ed.). Pearson.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). Shigley's mechanical engineering design (11th ed.). McGraw-Hill Education.

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (s. f.). Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN. INEN.

United States Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. (s. f.). Machine guarding. Occupational Safety and Health Administration.

Groover, M. P. (2020). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing (5th ed.). Pearson.

Apéndices