

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Desarrollo de un mecanismo de giro para el izaje controlado en la operación de turbinas hidrocinéticas acopladas sobre estructuras flotantes

Juan Diego Trujillo Burgos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecatrónico

Asesor(es)

Miguel Ángel Rodríguez Cabal

Adrián Felipe Martínez Pérez

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2025

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo diseñar un mecanismo de control de orientación para turbinas hidrocínicas montadas sobre estructuras flotantes, con el propósito de optimizar su desempeño estructural y funcional en ambientes fluviales. La investigación se desarrolló mediante una metodología secuencial de cinco fases que integraron revisión sistemática de la literatura, evaluación multicriterio, validación computacional y diseño de detalle.

En la primera fase se realizó una revisión sistemática de fuentes técnicas y académicas con el fin de identificar y caracterizar los mecanismos de control existentes en variadas aplicaciones, estableciendo un marco referencial de diseños implementados en diferentes contextos operacionales. Posteriormente, se desarrolló una matriz de selección multicriterio que evaluó las alternativas identificadas mediante el examen de factores técnicos, operativos y económicos, permitiendo seleccionar el diseño más adecuado para las condiciones específicas del proyecto.

El diseño seleccionado fue sometido a un proceso de validación mediante simulaciones numéricas que permitieron evaluar su respuesta estructural ante cargas hidrodinámicas típicas y verificar su funcionalidad operativa. El análisis incluyó el estudio del equilibrio estático del sistema tipo balancín articulado, la determinación de reacciones en apoyos y tensiones en elementos estructurales, estableciendo los criterios fundamentales para la selección de los componentes mecánicos.

Finalmente, se elaboró el diseño de detalle del mecanismo, especificando geometrías, materiales, sistemas de transmisión de potencia y protocolos de fabricación, además de realizar estimaciones económicas para su implementación. Los resultados obtenidos demuestran su viabilidad técnica y económica del sistema propuesto, evidenciando su potencial para mejorar la eficiencia operativa de turbinas hidrocínicas en estructuras flotantes. Igualmente, se proponen futuras líneas de investigación orientadas hacia la experimentación con prototipos físicos y la adaptación del diseño a otras aplicaciones con condiciones variables.

Palabras clave: Turbinas hidrocínicas, Mecanismo de orientación, Matriz de selección multicriterio, Validación estructural.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Generalidades	4
1.2. Objetivos	6
1.2.1. General	6
1.2.2. Específicos	6
1.3. Organización de la tesis.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
3. METODOLOGÍA.....	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
4.1. Revisión sistemática sobre los mecanismos de control de orientación.....	14
4.2. Selección del diseño de mecanismo mediante evaluación multicriterio.....	26
4.3. Validación por simulación en el diseño del mecanismo de giro: desempeño estructural y funcional.....	29
4.4. Diseño al detalle del sistema propuesto	37
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	40
REFERENCIAS	43
ANEXOS.....	49

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Para el periodo entre 2024 a 2038, la proyección de la demanda de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), el cual se divide en el Sistema de Transmisión Nacional (STN) y el Sistema de Transmisión Regional (STR), podrían tener un crecimiento promedio año de entre 1,30% a 3,09% con respecto al escenario inicial del estudio (Unidad de Planeación Minero Energética, 2024). A pesar del potencial geográfico de Colombia en la generación de energía mediante Fuentes Renovables No Convencionales (FRNC), el suministro en muchas regiones, especialmente las rurales de difícil acceso, presentan un enorme desafío en la cobertura del suministro eléctrico por parte de la nación.

La dependencia de redes centralizadas (Figura 1), que aún son abastecidas mediante fuentes convencionales de energía (Figura 2) limitan tanto la sostenibilidad del sistema eléctrico nacional como su necesario crecimiento hacia regiones que permanecen desconectadas o con un suministro limitado. Esta desigual distribución de la infraestructura y de las fuentes de generación profundiza las brechas de cobertura energética y pone en evidencia la necesidad de soluciones flexibles y descentralizadas (Corficolombiana Investigaciones, 2025).



Figura 1. Sistema de Transmisión Nacional 2012-2025. Véase (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

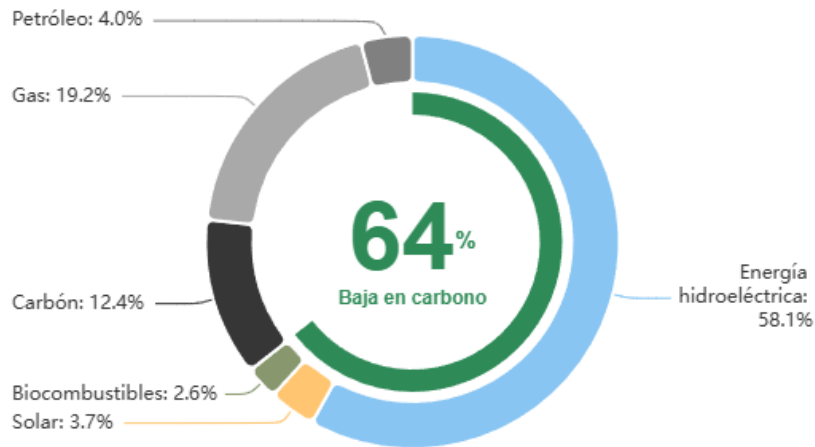


Figura 2. Generación de electricidad en Colombia 2023/2025. Véase (Low Carbon Power, 2025)

Además, en Colombia, los altos costos y complejidades topográficas dificultan la expansión de redes eléctricas convencionales en zona rurales (Martínez Cortés, 2021). Ante esto, la picogeneración eléctrica surge como una alternativa viable y sostenible para el suministro descentralizado, aprovechando la capacidad energética mediante el uso de FRNC sin la necesidad de grandes infraestructuras. Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (2025a), estos sistemas suelen generar menos de 100 Kilovatios (KW) de electricidad, siendo útiles para alimentar hogares y granjas que por lo general tienen potencias inferiores. Estos se componen a partir del uso de turbinas, bombas o ruedas hidráulicas que transforman la energía del agua en energía rotacional, que a partir de un alternador o generador producen electricidad. De esta manera, un generador de turbina de 1 KW puede producir anualmente entre 5.000 y 12.000 Kilovatios hora (KWh), suficientes para proporcionar energía para un casa grande o granja.

Además de que estos sistemas reducen la dependencia de redes eléctricas convencionales; alineándose con los compromisos de transición energética del país, la interconexión a las redes de distribución y transmisión de proyectos de picogeneración requieren el cumplimiento de algunas exigencias, tales como las de la Comisión Reguladora de Energía (FERC) (2022), que permite fuentes de electricidad de 20 MW o menos en estos sistemas, en cumplimiento con las normas IEEE 1547 e IEC 60034, que dictan tanto los criterios técnicos para la conexión segura con la red eléctrica como las especificaciones en los sistemas abarcando el rendimiento, el diseño, la seguridad y la

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

eficiencia; permitiendo así la adaptabilidad de las condiciones locales hacia soluciones escalables y de bajo impacto ambiental (U.S Department of Energy, 2025b).

De esta manera, la eficiencia de sistemas de picogeneración eléctrica por medio de la operación de turbinas hidrocínéticas acopladas sobre estructuras flotantes dependen en gran medida en el diseño de mecanismos de rotación controlado, ya que estos permiten adaptar la orientación de la turbina a condiciones hidráulicas variables, optimizando así el aprovechamiento energético en entornos geográficamente complejos, donde se consideran principalmente los riesgos asociados a inundaciones o variaciones en el caudal. Sin embargo, las limitaciones técnicas de estos mecanismos de orientación y control afectan directamente al desempeño de los sistemas, reduciendo la confianza en el desarrollo de proyectos relacionados. Por ello, la presente propuesta busca desarrollar un sistema de rotación controlado capaz de integrarse en la operación de turbinas hidrocínéticas instaladas sobre estructuras flotantes, analizando y evaluando diferentes enfoques de diseño con el fin de seleccionar la mejor alternativa, garantizado así un funcionamiento preciso y confiable en condiciones variables.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Diseñar e implementar un mecanismo de rotación controlado optimizado en términos de desempeño estructural y funcional, para su integración en la operación de turbinas hidrocínéticas acopladas sobre estructuras flotantes; mediante la identificación, evaluación y selección de diseños existentes, con el propósito de garantizar el funcionamiento del mecanismo.

1.2.2. Específicos

- Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre los mecanismos de control de orientación, mediante la búsqueda y análisis de fuentes académicas y técnicas, con el propósito de identificar los diseños existentes.
- Desarrollar una matriz de selección de diseños para mecanismos de rotación controlada, aplicando criterios categóricos para evaluar y comparar las alternativas existentes.
- Validar el diseño del mecanismo de giro para su integración en un sistema de turbinas hidrocínéticas montadas sobre estructuras flotantes, mediante simulaciones que permitan comprobar su funcionalidad y desempeño estructural.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Elaborar el diseño de detalle del sistema propuesto, a partir de la selección técnica de los componentes necesarios, con el fin de establecer los requerimientos funcionales, materiales y económicos para su fabricación.

1.3. Organización de la tesis

El contenido de la presente tesis que tiene como objetivo diseñar e implementar un mecanismo de rotación controlado para turbinas hidrocínéticas en estructuras flotantes donde se pretende optimizar su desempeño estructural y funcional, estará distribuido de la siguiente manera. Inicialmente en el marco teórico se representan el grupo de conceptos y teorías claves en el desarrollo de los objetivos metodológicos nombrados anteriormente. A su vez, estos se abordan y profundizan en función de las aplicaciones en diferentes entornos industriales y energéticos, mediante el análisis de estudios disponibles en la literatura que evidencian su relevancia en ambientes donde se requiere precisión, eficiencia y resistencia ante condiciones variables.

Posteriormente, en la metodología se enuncia el proceso secuencial propuesto de cinco fases del proyecto. Primero, una revisión sistemática en bases de datos donde se identifican los diseños existentes, clasificándolos según parámetros técnicos y operativos, reduciendo los sesgos posibles hacia casos irrelevantes. Segundo, se desarrolla una matriz de selección multicriterio que pondera factores como lo son técnicos, operativos y económicos. Tercero, el diseño seleccionado se valida mediante simulaciones numéricas, evaluando de esta manera su respuesta estructural ante cargas hidrodinámicas típicas. Cuarto, se elabora el diseño detallado, especificando geometrías, materiales y protocolos de fabricación. Y, por último, se analizan los resultados en comparación con los estándares del sector, particularmente aquellos relacionados con el diseño, la operación y la eficiencia en la generación de energía mediante turbinas hidrocínéticas.

Luego, en el análisis y la discusión se correlaciona cada fase metodológica respecto a los objetivos específicos del trabajo, permitiendo valorar el diseño final a partir de las limitaciones de los sistemas actuales en aspectos útiles para los propósitos del proyecto. Por último, las conclusiones destacan la viabilidad técnica y económica del mecanismo propuesto para entornos operativos complejos; asimismo, como su potencial de optimización sobre los sistemas analizados. Además, se proponen futuras mejoras centradas en la experimentación con prototipos físicos y adaptación hacia otras aplicaciones hidrocínéticas con condiciones variables de caudal.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

Los mecanismos de rotación controlada han sido ampliamente estudiados debido a la necesidad en la transmisión del movimiento y potencia en una amplia gama de aplicaciones (Rodríguez-Cianca et al., 2020; Zhu & Hu, 2021), con el fin de garantizar precisión, eficiencia y fiabilidad desde maquinaria industrial hasta dispositivos de alta tecnología. Estos mecanismos incluyen cadenas, ejes, engranajes, poleas, entre otros (Budynas et al., 2011; Mott et al., 2018), Permitiendo regular la velocidad, el torque y la precisión del movimiento rotacional. La investigación en este campo ha procurado la optimización del rendimiento de los elementos de transmisión críticos existentes como a su vez en desarrollar nuevas tecnologías que busquen un control más preciso y adaptable al movimiento rotacional (Ao et al., 2024).

Además, la aparición de nuevos métodos de fabricación ha permitido la producción de piezas complejas utilizando materiales avanzados a partir de aleaciones de aluminio o polímeros reforzados en donde se incluyen termoestables, termoplásticos y poliuretanos (Gouker et al., 2006), estos son especialmente adecuados para el diseño de mecanismos que requieren ligereza, resistencia mecánica y durabilidad. Estos materiales ofrecen propiedades superiores en relación resistencia-peso, bajo coeficiente de fricción y buena estabilidad térmica, sumado a métodos modernos de fabricación como es la manufactura aditiva (impresión 3D), que se destaca por la construcción de geometrías optimizadas y personalizadas, reduciendo el desperdicio de material y control en los tiempos de producción (Rosen, 2014). Estas capacidades amplían las posibilidades de implementación en mecanismos eficientes y adaptables, siendo factores determinantes para la optimización de costos y adaptabilidad estructural en el desarrollo continuo de soluciones mecánicas de diseño.

En el ámbito industrial, los sistemas de giro controlado son fundamentales para sectores como la automatización industrial, la robótica, los sistemas de transmisión de potencia y el sector energético. En la robótica, los accionamientos armónicos y las transmisiones de engranajes planetarios son algunos de los sistemas de transmisión comúnmente empleados en la actualidad (Rodríguez-Cianca et al., 2020), como a su vez sistemas de transmisión accionados por cable que involucran la interacción hombre-máquina con bajos niveles de fricción, altas eficiencias y relaciones de torque lineales idóneas (Grosu et al., 2018).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En el sector energético, los sistemas de orientación de turbinas eólicas y paneles solares dependen de mecanismos de precisión para maximizar la captación de energía, abordando a su vez la reducción de costos generales de operación y mantenimiento (Georgescu et al., 2014; Wang, 2024). En este sentido, para garantizar el desempeño y durabilidad del mecanismo, es esencial analizar el comportamiento de estos bajo las distintas condiciones de operación. Para ello, las herramientas de simulación permiten anticipar y evaluar el rendimiento de los sistemas antes de su implementación, optimizando el diseño desde la perspectiva de la reducción de riesgos asociados a fallas estructurales. Dentro de este contexto, el desarrollo de generadores triboeléctricos de vibración inducida por viento (WV-TENG), diseñadas para aprovechar corrientes de aire a bajas velocidad (2-5 m/s), representan una alternativa viable para la microgeneración de energía (Qu et al., 2025), mediante la incorporación de estructuras apilables y expandibles permiten optimizar la captación energética mediante conexiones paralelas, aumentando la potencia de salida y eficiencia del sistema, pero también destacando su importancia e innovación del control del movimiento en la operación de estos en entornos urbanos, donde la variación de flujo de las bajas velocidades del viento requieren la estabilidad de sus componentes móviles para garantizar un desempeño constante. Por otro lado, la propuesta de Noman M. (2024) en torno a sistemas de Conversión de Energía a partir de las Olas Oceánicas (OWEC), mediante el control de orientación y rotación de una turbina Wells, permite garantizar el desempeño estable frente a la variabilidad del oleaje; igualmente el control adaptativo no lineal y el Control Tolerante a Fallas (FTC) permiten asegurar la operatividad del sistema bajo condiciones adversas. Asimismo, la integración de esquemas predictivos de gestión energética contribuye a reducir las fluctuaciones de potencia entregadas a la red.

La simulación de cargas se ha convertido en una herramienta indispensable para evaluar y predecir el comportamiento de estructuras, componentes y sistemas bajo condiciones de deformaciones y esfuerzos. Donde por medio de modelos computacionales, se pueden evaluar y optimizar los proyectos antes de su implementación en entornos reales, asegurando su seguridad, eficiencia y durabilidad (Shi, 2021). Métodos de simulación como el análisis de elementos finitos (FEM), la dinámica de cuerpos rígidos, el método de análisis de elementos discretos (DEM); permiten evaluar el comportamiento de los mecanismos bajo distintas condiciones, identificando puntos críticos de tensión, deformación o fallo potencial en los materiales (Cui et al., 2023; Harmon et al., 2020; WEN et al., 2018). Esto no solamente reduce la necesidad de prototipos físicos, sino que además permite explorar múltiples escenarios y configuraciones de diseño precisos y confiables, ahorrando tiempos y costos en las circunstancias de desarrollo en un proyecto.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El análisis estructural de los mecanismos en las turbinas eólicas, aseguran mediante un enfoque analítico que las variaciones en parámetros como cargas o condiciones ambientales extremas, conducen a cambios en el estado de estabilidad dinámica en una pala giratoria de un aerogenerador que experimenta una deflexión significativa (Rezaei et al., 2025). Para el caso de los sistemas de transmisión de potencia, el modelado computacional facilita la predicción de esfuerzos y deformaciones en engranajes y poleas los cuales son susceptibles a fracturas por fatiga debido a las condiciones de operación. Estas herramientas permiten no solo anticipar fallas de los componentes, sino que también a través de la simulación en escenarios de cargas variables, se logra reducir el desgaste de los elementos del sistema, incrementando la eficiencia mecánica y en consecuencia de ello garantizando un desempeño confiable en aplicaciones donde el control de la rotación y la transmisión precisa resultan fundamentales (Zhang et al., 2024). Del mismo modo, en la automatización industrial, la simulación de las cargas es fundamental para optimizar el desempeño de los sistemas rotacionales que están enmarcados en un profundo control de los grados de libertad (DOF) de estos, con el fin minimizar los errores de precisión y estabilización del sistema en conjunto (Y. Li et al., 2025; Pan et al., 2024). La implementación de estas simulaciones no solamente permite predecir un comportamiento estructural confiable de los mecanismos de rotación controlado, sino que además aporta criterios claves para la selección de diseños, debido a que es posible establecer a partir de los análisis computacionales una valoración que posibilite identificar soluciones hacia la elección de materiales, geometrías, configuraciones mecánicas, entre otras; garantizando el rendimiento y fiabilidad de tales sistemas en función de las condiciones de operación.

Mediante el desarrollo y aplicación de herramientas de criterio para la selección de diseños, se accede a evaluar y comparar mecanismos en función de una consideración simultánea de factores, los cuales a menudo llegan a ser ilimitados y conflictivos, pero que a través de formulaciones multiobjetivo proporcionan un nivel de conocimiento y flexibilidad en la toma de decisiones que no puede replicarse con formulaciones tradicionales (Jerez et al., 2024). Tradicionalmente, los criterios de diseño se encuentran apoyados en análisis tanto cuantitativos como cualitativos, en donde factores o propiedades ya no hacen parte de un proceso unilateral que simplemente implica elegir entre dos de ellos. Actualmente se ha convertido, en satisfacer las preferencias y restricciones del problema, integrando de manera equilibrada variables funcionales para la toma de decisiones (Uzun et al., 2021). Con los avances en la simulación computacional enfocada al análisis de estructuras, el espectro de evaluación en el diseño de sistemas mecánicos aumenta con base a los resultados deseados, permitiendo abordar aplicaciones de diseño realistas dentro de un marco de criterios en base a la confiabilidad del sistema con respecto a relaciones lógicas,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

como puede ser la tasa de fallos constantes y fallos de componentes independientes (Xie & Zhao, 2024). En este contexto, metodologías como el análisis de elementos finitos (FEA) y la dinámica multicuerpo (MBD) permiten predecir el comportamiento estructural y dinámico del diseño bajo distintas condiciones de operación, reduciendo la necesidad de prototipos físicos tempranos (Luo et al., 2023; Promaue et al., 2024). A su vez, técnicas de decisión estructuradas como el proceso analítico estructurado (AHP) y el análisis multicriterio de decisión (MCDM) facilitan la jerarquización y selección de alternativas de diseño, al integrar múltiples criterios tanto cuantitativos como cualitativos, que priorizan la selección del diseño considerando entornos complejos de decisión (Ahadi et al., 2023; Lohakare et al., 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos planteados en el proyecto de diseño e implementación de un mecanismo de rotación controlado en un sistema de picogeneración eléctrica, se propone la siguiente metodología estructurada en fases. En primer lugar, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica para identificar sistemas de giro controlado. Esta fase incluye la recopilación de información en bases de datos como IEEE Xplore, Scopus, Science Direct y Web of Science, así como el análisis comparativo de los diseños encontrados, clasificándolos según criterios técnicos y operativos los cuales son utilizados en la evaluación de los diseños, tales como funcionamiento, eficiencia, capacidad de carga, costo, durabilidad y fabricación. De esta manera se redujeron los sesgos hacia estudios irrelevantes o de baja calidad los cuales no cumplen características completas, objetivas y reproducibles (Linares-Espinós et al., 2018).

En la segunda fase, se elaboró una matriz de selección multicriterio para evaluar y comparar los diseños identificados en el anterior objetivo. Predeterminando una metodología de evaluación, la cual proporcione la asignación de pesos a cada criterio en función de su relevancia para el proyecto, lo que significa calificar y comparar los mecanismos de giro controlado; identificándose las opciones viables y adecuadas en la implementación propuesta. Los criterios evaluados incluyeron aspectos cualitativos, como la facilidad de implementación y adaptabilidad al entorno, y aspectos cuantitativos como costos, eficiencia y vida útil del mecanismo; permitiendo relacionar de manera integral y objetiva las alternativas disponibles (Bianchi et al., 2024; Mohamed et al., 2020). Una vez seleccionado el mejor diseño, se adelantó la tercera fase, la cual consistió en el modelado y simulación, utilizándose herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y software de simulación tales como ANSYS, Autodesk Inventor o Matlab, que validaron el funcionamiento del mecanismo bajo condiciones reales de operación; y de esta manera se realizaron los correspondientes ajustes para la integración prevista con los componentes. En estos análisis se tomaron en consideración aspectos como la resistencia a cargas dinámicas, cinemáticas y compatibilidad de los materiales propuestos en la literatura.

La cuarta fase constituyó el desarrollo del diseño al detalle del sistema propuesto, a partir de la selección técnica de los componentes que cumplieron con los requerimientos funcionales del mecanismo. En esta etapa se definieron las especificaciones dimensionales, materiales y condiciones de operación de cada elemento, así como las cotizaciones necesarias que establecen la viabilidad económica del sistema, a partir de los resultados del

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

modelado y simulación estructural realizadas en la anterior fase. Esta información permitió consolidar un conjunto de planos, lista de materiales y criterios técnicos que sirven como base para una futura fabricación e implementación del prototipo.

Finalmente, en la quinta fase, se exhiben los resultados y conclusiones del proceso al detalle; desde la revisión de la literatura, pasando por la implementación de la matriz de selección, hasta la simulación del mecanismo de giro adecuado, considerando la aplicabilidad en sistemas de turbinas hidrocínicas montadas sobre estructuras flotantes en zonas rurales y la viabilidad para optimizar el desempeño del sistema. Estas incluyen respectivamente los análisis de resultados, consideraciones generales del proyecto y recomendaciones para futuras mejoras o líneas de investigación. Por ello, la presente metodología permitió asegurar un enfoque sistemático y riguroso, que garantice en cada una de sus etapas la contribución en el desarrollo de un mecanismo de rotación controlado funcional en la operación de turbinas hidrocínicas acopladas a estructuras flotantes.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los hallazgos y análisis detallados, derivados del cumplimiento de los objetivos específicos que guiaron la investigación sobre el mecanismo de control de orientación para turbinas hidrocinéticas montadas sobre estructuras flotantes. Inicialmente, se exponen los resultados de la revisión sistemática de la literatura, que permitió identificar y caracterizar los principales mecanismos de control de orientación existentes en distintas aplicaciones, estableciendo una base conceptual sólida para este proyecto. Posteriormente, se presenta la matriz de selección desarrollada, donde se aplican criterios categóricos para evaluar y justificar la elección del diseño más adecuado para el problema en cuestión. Los resultados de las simulaciones de validación del mecanismo seleccionado se detallan a continuación, demostrando de esta manera la funcionalidad, el desempeño estructural y la idoneidad bajo condiciones de cargas previstas, en la integración esperada. Finalmente, se muestra el diseño de detalle del sistema propuesto, especificando los componentes seleccionados, los requerimientos funcionales, los materiales seleccionados y las estimaciones de costos asociados para su potencial fabricación. Los resultados obtenidos en cada una de estas etapas se presentan y discuten a continuación, con el propósito de contribuir al objetivo general en el desarrollo de una solución viable para un mecanismo de giro controlado en la operación de turbinas hidrocinéticas en ambientes fluviales.

4.1. Revisión sistemática sobre los mecanismos de control de orientación

En la presente revisión sistemática de la literatura, se exploraron los mecanismos de control de orientación mediante un protocolo basado en criterios de inclusión y exclusión previamente definidos (Véase Tabla 1), priorizando de esta manera las publicaciones académicas indexadas en bases de datos especializadas como son: IEEE Xplore, Scopus, ScienceDirect y Web of Science. El objetivo principal fue identificar y catalogar los diseños existentes, comprendiendo sus principios de funcionamiento, tecnologías asociadas y campos de aplicación, mediante una estrategia de búsqueda la cual se estructuró a través de palabras claves (Véase Tabla 2) tanto en español como en inglés para maximizar la cobertura, y al mismo tiempo utilizando operadores booleanos para refinar los resultados.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos de revistas académicas revisadas por pares (peer-reviewed)	Artículos de blogs, prensa o revistas de divulgación general
Tesis doctorales y de maestría	Estudios obsoletos o sin aplicación tecnológica vigente
Actas de conferencias técnicas y simposios	Documentos sin datos técnicos, sin metodología clara o de carácter meramente descriptivo.
Documentos que describen o analizan mecanismos de control de orientación, principios de diseño, tecnologías o algoritmos	Estudios sin relación con aplicaciones de orientación o que no incluyan evaluación.
Publicaciones entre los últimos 5–10 años	Contenido duplicado o con información irrelevante para el tema

Tabla 2. Palabras claves.

En español	En inglés
Control de orientación	Orientation control
Mecanismos de orientación	Guidance mechanisms
Sistemas de control	Control systems
Sistemas de estabilización	Stabilization systems
Plataformas de control de giro	Rotation control platforms
Sistema de control de actitud	Attitude control systems
Mecanismo de apuntamiento	Pointing mechanisms

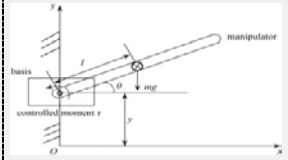

Nota: Las palabras se encuentran planteadas en términos generales con el propósito de abarcar distintas aplicaciones. Luego se combinan con conectores booleanos para ajustar la ecuación de búsqueda.

Tras una fase inicial en donde se realizó un cribado de títulos y resúmenes irrelevantes, se seleccionaron los documentos más relevantes por medio de una lectura completa para confirmar la pertinencia y calidad de cada estudio a la investigación. Con ello, se extraen datos claves, se recopila información y se organizan de manera sistemática para facilitar la comparación de los diferentes mecanismos de control, y categorización en función a los aspectos críticos de cada diseño, como son: principio de funcionamiento, aplicación, ventajas y limitaciones reportadas; lo que permite identificar tendencias, contrastar enfoques y reconocer vacíos en la literatura.

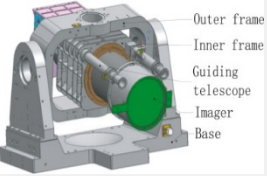
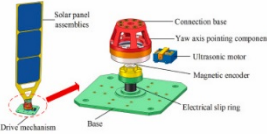
 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Completada la aplicación de los criterios de inclusión y la evaluación crítica, se llevó a cabo un proceso de extracción estructurada de los datos críticos anteriormente nombrados en cada fuente identificada; de esta manera, la Tabla 3 presenta la síntesis de los hallazgos correspondientes a doce publicaciones académicas seleccionadas tras la revisión descrita a lo largo del presente apartado. La información que a continuación se observa, parte de la organización en categorías temáticas que facilitan la comparación transversal de los distintos diseños y principios de control, permitiendo identificar tendencias, enfoques predominantes y particularidades de los mecanismos documentados en la literatura reciente.

Tabla 3. Matriz de extracción y síntesis de diseños de mecanismos de control de orientación

ID del Artículo	Título	Tipo de Mecanismo de Control	Principio de Funcionamiento	Aplicación (En qué estado se encuentra)	Ventajas	Limitaciones	Imágenes
AR1- doi.org/10.1016/j. .aej.2025.05.048	"Controllability analysis of mechanical multibody dynamics control systems based on lie symmetry", (Mingliang, 2025)	Manipulador mecánico simple de libertad única bajo vibración básica.	El mecanismo se modela como dos bielas en serie para analizar, mediante la dinámica y la simetría de Lie y ecuaciones de Euler-Poincaré, la controlabilidad del manipulador bajo el momento de entrada.	El estudio se enfoca en el análisis teórico para el diseño de estrategias de control colaborativo.	Simplificación del análisis, aplicación novedosa, base para diseño de control, manejo de sistemas no lineales, validación práctica.	Alcance restringido, controlabilidad local predominante.	
AR3- doi.org/10.1016/j. .mechatronics.20 23.103107	"Compensating torque ripples in a coarse pointing mechanism for free-space optical communication: A Gaussian process repetitive control approach", (Mooren et al., 2024)	Mecanismo de apuntamiento grueso (CPA)	El CPA utiliza movimientos en el eje de elevación (vertical) y azimut (horizontal) para dirigir el sistema hacia el objetivo.	El enfoque se ha aplicado mediante método de control repetitivo basado en un proceso gaussiano para compensar la ondulación de par con éxito, a un prototipo de mecanismo de apuntamiento grueso (CPA).	Compensación efectiva a velocidad arbitraria, baja complejidad computacional y rentabilidad, robustez a errores de modelado y variaciones de periodo, rutina automatizada de compensación.	Enfoque en perturbaciones periódicas, recopilación de datos para aprendizaje, desempeño menor en velocidades específicas, errores inducidos por referencia a velocidades variables.	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

AR5- doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167998	<p>"Modeling and correction of pointing error of space-borne optical imager", (Huang et al., 2021)</p>	<p>Imager optico espacial.</p>	<p>Estructura rígida y aislada que sostiene y alinea con gran precisión los espejos, lentes y detectores, mediante el ajuste de actuadores piezoeléctricos para la corrección y alineación.</p>	<p>Se propone para corregir el error de apuntado de un generador de imágenes óptico basado en el espacio, estableciendo un modelo matemático y de simulación (basado en el método de Monte-Carlo) de la relación entre el error de apuntado y los errores de ensamblaje de los componentes mecánicos.</p>	<p>Modelado matemático integral, calibración de matriz de transformación, mejora significativa en la precisión de señalamiento.</p>	<p>Error residual después de la corrección, errores de montaje no compensados, influencia del error de posicionamiento del codificador.</p>	
AR7- doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.12.061	<p>"Development of a compact solar array drive assembly based on ultrasonic motor for deep space micro-nano satellites", (X. Li et al., 2025)</p>	<p>Unidad de accionamiento de paneles solares (SADA).</p>	<p>Utiliza un motor ultrasónico para el accionamiento, centrándose en un diseño ligero y un método de conducción de baja potencia.</p>	<p>Prototipo fabricado y probado para micro-nano satélites en órbitas del espacio profundo.</p>	<p>Compactación en la construcción, suministro de energía mejorado, beneficios del motor ultrasónico, método de conducción de baja energía.</p>	<p>Limitaciones de fuentes de energía tradicionales, inconvenientes en los SADAs con motor stepper.</p>	

AR8- doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104942	"Kinematic analysis of a new 2-DOF parallel wrist with a large singularity-free rotational workspace", (Ghaedrahmati & Gosselin, 2022)	Muñeca paralela de 2-DOF.	Produce un movimiento de rodadura pura de esfera sobre esfera. Se centra en el análisis cinemático.	Análisis cinemático y verificación CAD para un nuevo diseño, candidato para muñecas de brazo robótico y mecanismos de apuntado (gimbals).	Características de rendimiento mejoradas, gran espacio de trabajo libre de singularidad, rigidez mejorada y peso reducido, reducción de la interferencia de contacto, doble ángulo de inclinación.	Naturaleza sobrerestringida y holguras de juntas, complejidad cinemática.
AR11- doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2015	"Nonlinear adaptive robust motion control for hydraulic winch in oil and gas wireline operation", (Bu, 2020)	Cabrestantes hidráulicos.	Aborda incertidumbres paramétricas y no linealidades inherentes a la dinámica del sistema mediante un modelo físico detallado y la arquitectura de Controlador Robusto Adaptativo No Lineal (ARC).	Diseño e implementación para el control de movimiento de herramientas en operaciones de línea de cable en la industria de petróleo y gas.	Aborda eficazmente las no linealidades e incertidumbres, adaptación de los parámetros para el rendimiento, robustez y rendimiento garantizado.	Dinámica del cable ignorada, límites en las trayectorias, ruido del sensor, fusión en datos.

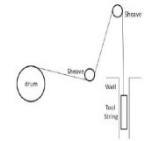
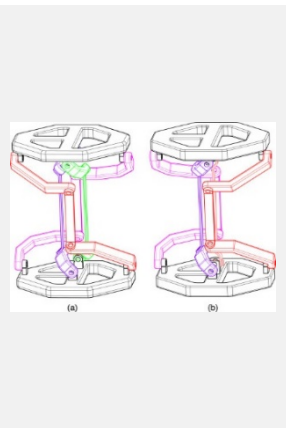


Figure 1 Wireline logging operation for oil and gas industry

AR12- doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.657	"A new experimental approach to test open gears for winch drums", (Octrue et al., 2015)	Engranajes abiertos para tambores de cabrestante.	Engranajes abiertos para la transmisión del par de torsión, por ello enfoque experimental prueba el rendimiento de estos bajo condiciones de baja velocidad y lubricación con grasa.	Desarrollo de un nuevo banco de pruebas para evaluar y actualizar los valores de tensión de presión de contacto en engranajes de acero templado.	Mejor comprensión de los engranajes abiertos a bajas velocidades, evaluación de superficies endurecidas combinadas, evaluación de métodos de lubricación, sistema de carga robusto, aumento de la capacidad de carga.	Velocidad tangencial baja, lubricación con grasa, emparejamiento de materiales, baja velocidad de rotación, área de contacto limitada.
AR15- dx.doi.org/10.1016/j.ast.2016.04.019	"Design of predictive control and evaluate the effects of flight dynamics on performance of one axis gimbal system, considering disturbance torques", (Toloei et al., 2016)	Sistema de cardán de un eje.	Transmisión de potencia y movimiento rotacional usando una junta universal, que permite movimiento angular sin interrumpir la transmisión. Se utiliza un Control Predictivo de Modelo (MPC) para analizar el sistema.	Diseño y modelado del sistema, con pruebas de escenarios mediante simulación para evaluar el rendimiento de estabilización de la línea de visión en vuelo.	Rendimiento mejorado, rechazo completo de las perturbaciones, integración de la dinámica y validación basada en simulaciones.	Enfoque único hacia el sistema de cardán en un eje, supuesto de cuerpo rígido, parámetros específicos del modelo.

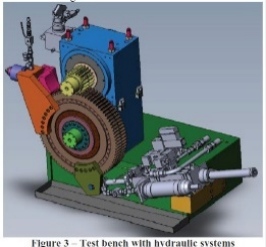
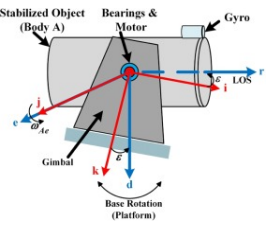
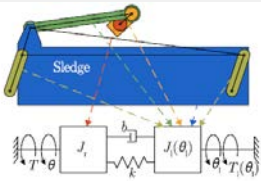
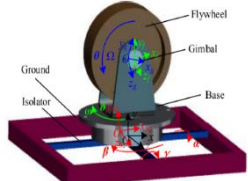
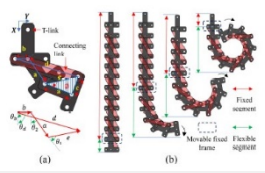
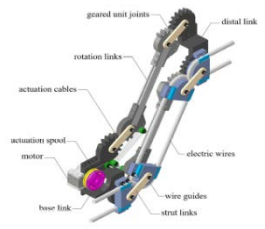


Figure 3 - Test bench with hydraulic systems



<p>AR16- doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104833</p>	<p>"On-line motion profile optimization for reciprocating mechanisms", (Vanbecelaere et al., 2022)</p>	<p>Perfil de movimiento en línea tipo pick-and-place.</p>	<p>Genera un movimiento rotatorio por un motor, el cual se transmite mediante un sistema de bielas y acoplamientos transformándose en un movimiento lineal alternativo que desplaza una carga entre dos posiciones fijas (A y B).</p>	<p>Solución para lograr grandes ahorros de energía en mecanismos industriales alternativos.</p>	<p>Ahorro de energía y prevención de sobrecalentamiento, adaptabilidad a condiciones cambiantes, estimación de parámetros en tiempo real, eficiencia computacional. optimización integral en el perfil del movimiento.</p>	<p>Desaceleración para la estimación, sensibilidad al ruido a altas frecuencias, error de promediación.</p>	
<p>AR17- doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108611</p>	<p>"Dynamic modeling and open-loop analysis of a control moment gyroscope considering the influence of a flexible vibration isolator", (Xu et al., 2022)</p>	<p>Giroscopio de momento de control (CMG) con aislador de vibración flexible.</p>	<p>Consiste en un rotor giratorio y cardanes motorizados que basculan el momento angular del rotor</p>	<p>Análisis teórico y de modelado para el diseño de sistemas de control de actitud de naves espaciales, con el propósito de analizar cómo la deformación del aislador afecta la dirección del momento angular.</p>	<p>Desarrollo integral de un modelo, enfoque en la influencia del aislador, orientación para diseño y control, verificación experimental.</p>	<p>Dificultad en la consistencia de la amortiguación, desequilibrio estático negligente.</p>	

<p>AR18- doi.org/10.1109/LRA.2024.3521682</p>	<p>"Novel articulated lead screw linear actuator enabled by transforming linkage mechanism", (Unde et al., 2025)</p>	<p>Actuador lineal de tornillo de plomo articulado.</p>	<p>Emplea un Mecanismo de Articulación Transformadora (TLM) que forma una viga rígida cuando se extiende y se enrolla de forma compacta.</p>	<p>Diseño y prototipo fabricado para aplicaciones con espacio restringido como dispositivos médicos, robótica y automatización de fábricas.</p>	<p>Alta relación de extensión y compactación ante el espacio, durabilidad mejorada, mantenimiento reducido, operación sin guía externa, resistencia a la carga transversal, precisión y repetibilidad.</p>	<p>Eficiencia baja debido a pérdidas adicionales del sistema, complejidad y costo de manufactura.</p>	
<p>AR19- doi.org/10.1109/LRA.2023.3264716</p>	<p>"Design and verification of parallelogram mechanism with geared unit rolling joints for reliable wiring", (Suh & Choi, 2023)</p>	<p>Mecanismo de paralelogramo con juntas rodantes de unidad engranada.</p>	<p>Utiliza unidades rodantes con engranajes en un paralelogramo para permitir un cableado confiable a través de las articulaciones del robot.</p>	<p>Diseño y prototipo accionado por cable para su aplicación en diversas configuraciones de robots, especialmente en robótica quirúrgica y humanoide.</p>	<p>Cableado estable y predecible, beneficios de las juntas rodantes.</p>	<p>Diseño y restricciones operacionales del mecanismo: Requisitos del torque del motor, posiciones singulares, posible colisión de componentes, posibles imperfecciones en la fabricación.</p>	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

A partir de la información resumida en la Tabla 3, se pueden identificar patrones comunes y diferencias relevantes entre los mecanismos de control de orientación descritos en la literatura. Estos hallazgos son la base para el análisis y la discusión en torno a la selección de posibles alternativas de diseño, y en esta se examinan las tendencias en los diseños, los principios de funcionamiento predominantes, las tecnologías empleadas y las aplicaciones específicas, lo que permitió contrastar las propuestas, evaluar las fortalezas y limitaciones, y establecer las oportunidades en el diseño.

Ahora bien, la síntesis obtenida en la matriz de extracción permitió realizar una categorización justificada por los principios cinemáticos y funcionales de cada sistema, revelando cinco arquitecturas fundamentales con aplicaciones específicas. Este criterio de agrupación busca establecer relaciones entre los diseños, constituyendo la siguiente clasificación con el fin de identificar los diseños relevantes y su aplicabilidad según los requerimientos de control, distinguiéndose: **(I) sistemas de orientación angular multi-eje** basados en configuraciones cardánicas o *gymbal systems*, representados por mecanismos de apuntamiento grueso (CPA) con ejes de elevación y azimut independientes (AR3) y sistemas de cardán de un eje de juntas universales para la transmisión de potencia sin interrupciones (AR15); **(II) mecanismos paralelos de orientación limitada**, ejemplificados por la muñeca paralela de 2-DOF con movimiento de rodadura (AR8) y el diseño en paralelogramo con juntas rodantes a partir de una unidad engranada (AR19); **(III) actuadores lineales de conversión rotacional-traslacional** los cuales incluyen sistemas de biela-manivela para movimientos alternativos *pick and place* (AR16) y mecanismos de transformación cinemática mediante la articulación de actuadores de tornillo de avance (AR18); **(IV) sistemas giroscópicos de control de momento** caracterizados por configuraciones que cubren módulos como son el rotor-cardán (AR17); y **(V) mecanismos de transmisión de potencia** que comprenden especialmente desde cabrestantes hidráulicos con transmisión directa (AR11) hasta engranajes abiertos para tambores (AR12) y unidades de accionamiento con motor en paneles solares (AR7). Tal diversidad en los diseños son respuesta a la multiplicidad de requisitos funcionales, donde la selección óptima depende críticamente de las variables delimitadas.

El análisis comparativo de los principios de funcionamiento revela diferencias fundamentales en la generación y transmisión del movimiento de orientación. Por un lado, los sistemas cardánicos (AR3, AR5, AR15) basan su operación en la descomposición del movimiento angular hacia rotaciones elementales alrededor de ejes ortogonales,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

facultando la orientación arbitraria dentro del espacio de trabajo establecido a través de la composición secuencial de rotaciones, con el limitante inherente de singularidades en torno a las configuraciones específicas. En contraste, los mecanismos paralelos (AR8, AR19) emplean cadenas cinemáticas cerradas en donde múltiples actuadores operan sobre una plataforma móvil, generando movimientos acoplados que pueden descomponerse mediante análisis jacobianos, y de esta manera visualizar los grados de libertad deseados, ofreciendo ventajas arquitectónicas significativas en términos de rigidez estructural y capacidad, impactando directamente en el incremento del espacio de trabajo. Asimismo, actuadores de conversión cinemática (AR16, AR18) se implementan en mecanismos donde el movimiento rotario del motor se transforma en desplazamiento lineal controlado, siendo particularmente apropiados para aplicaciones en espacios confinados que requieran altas relaciones fuerza-desplazamiento; dentro de este contexto, el diseño de tornillo articulado alcanza relaciones de extensión-compactación superiores hacia mecanismos equivalentes, puesto que la articulación transformadora en forma de viga rígida permite el aumento en el rango de operación máxima y a su vez enrolla compactamente en retracción.

Desde la perspectiva cinemática, los diseños identificados abarcan un espectro que va desde sistemas de un grado de libertad (AR1, AR11, AR12, AR16, AR18) hasta configuraciones multi-DOF complejas (AR3, AR8, AR15, AR17, AR19). Los sistemas de libertad única se caracterizan por cadenas cinemáticas simples donde existe una relación funcional directa entre la variable de entrada y la salida (Nenchev et al., 2019), facilitando la implementación de estrategias de control por su linealidad. Por otra parte, los sistemas multi-DOF presentan acoplamientos cinemáticos significativos que demandan resolución en el mapeo tanto en el espacio de tareas como el espacio de junta. El CPA (AR3) requiere la coordinación sincronizada de los ejes de elevación y acimut para el seguimiento de trayectorias suaves en el espacio de orientación; asimismo, el CMG (AR17) representa un caso especial en donde la orientación del momento angular se controla mediante el basculamiento de cardanes, generando de esta manera pares giroscópicos proporcionales al producto de la velocidad angular, estableciendo una relación cinemática de segundo orden entre actuación y efecto.

Por otra parte, la categorización de los diseños en función de su aplicación permite identificar arquitecturas específicas que responden a requerimientos mecánicos y funcionales particulares, definiendo los parámetros óptimos de desempeño para cada contexto operativo. Para aplicaciones aeroespaciales (AR3, AR5, AR7, AR15, AR17), donde las restricciones de masa son críticas y el ambiente operacional carece de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

mantenimiento, predominan diseños que priorizan la densidad de potencia y fiabilidad a largo plazo. El mecanismo CPA (AR3) emplea actuadores de par directo sin reductores mecánicos para minimizar la holgura entre partes y la fricción; entretanto, el imager óptico espacial (AR5) utiliza una estructura rígida aislada con actuadores piezoeléctricos de posicionamiento para la corrección de errores en el apuntamiento; a su vez, la unidad SADA (AR7) implementa un motor ultrasónico ofrece ventajas de alto par a baja velocidad sin la necesidad de reductores, reduciendo tanto el consumo energético como el mantenimiento. En aplicaciones robóticas terrestres (AR8, AR18, AR19), los diseños favorecen configuraciones que maximizan el espacio de trabajo y permiten la integración con sistemas de actuación existentes. La muñeca paralela 2-DOF (AR8) permite ángulos de inclinación apropiados para manipuladores colaborativos compactos; mientras que el mecanismo de paralelogramo con juntas rodantes (AR19) resuelve el problema crítico del cruce de cables en las articulaciones mediante unidades engranadas que orientan constantemente los conductos durante el movimiento. De igual forma, en aplicaciones industriales de alta potencia (AR11, AR12, AR16), donde la capacidad de carga y resistencia mecánica son prioritarias, los diseños utilizan transmisiones convencionales de engranajes o sistemas hidráulicos; el primero (AR12) permite transmisión de pares elevados en diámetros grandes sin las restricciones de espacio de reductores; entretanto el segundo (AR11) utiliza motores de desplazamiento variable acoplados directamente al tambor de control con el propósito de mantener precisión en las velocidades bajo cargas considerables.

En resumen, la revisión sistemática de la literatura ha permitido identificar y categorizar rigurosamente los diversos diseños contemporáneos de mecanismos de control de orientación, los cuales responden a diversas demandas funcionales y operacionales. La especialización arquitectónica según el dominio de aplicación proporciona una clara división entre diseños ultraligeros; *a priori* en la rama aeroespacial y robótica, enfocados en la optimización entre las relaciones específicas del problema a tratar; y diseños industriales robustos donde la alta capacidad es fundamental ante relaciones desplazamiento-fuerza. También, la creciente integración de actuadores no convencionales (motores ultrasónicos, piezoeléctricos, accionamientos hidráulicos directos) que eliminan elementos de transmisión tradicionales, reduciendo directamente la holgura entre componentes y mejorando la respuesta dinámica del sistema. Al mismo tiempo, la hibridación de las configuraciones cinemáticas que ajustan ventajas de arquitecturas en función a soluciones innovadoras como son paralelogramos motorizados, cardanes multi etapa y mecanismos transformadores del movimiento. La caracterización de estos doce diseños establece un marco sistemático

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

para la selección contextualizada de arquitecturas mecánicas en función de especificaciones de diseño. Los resultados demuestran la ausencia de soluciones universales, dejando abierto el camino para abordar cada caso desde una perspectiva de compromiso ingenieril. De este modo, corresponde una evaluación al detalle en la elección del mecanismo más adecuado, considerando variables críticas tales como el espacio de diseño definido, el espacio de trabajo, la capacidad de carga, las restricciones de masa, el ambiente operacional, los requisitos de fiabilidad, entre otros factores.

4.2. Selección del diseño de mecanismo mediante evaluación multicriterio

A partir de la revisión sistema de la literatura sobre mecanismos de rotación controlada se permitió identificar un amplio conjunto de diseños utilizados para la orientación angular en sistemas mecánicos, especialmente en aplicaciones donde se requieren precisión, robustez y adaptabilidad frente a condiciones variables de carga, como es el caso en estudio. A partir del proceso de extracción, categorización y síntesis, se consolidaron diversos proyectos que representan principios cinemáticos predominantes en base a la premisa de rotación controlada; que, abarcan desde sistemas basados en transmisiones flexibles y mecanismos de conversión cinemática, hasta soluciones de accionamiento directo y esquemas híbridos que ponen en conjunto elementos lineales y rotacionales.

En particular, la clasificación obtenida permitió identificar y organizar alternativas relevantes para el presente proyecto, considerando su funcionalidad, la complejidad de implementación y su potencial de integración para los requerimientos necesarios. Así, se seleccionaron seis alternativas de diseño viables para el control angular de estructuras. Cada una de las soluciones derivadas de la literatura, que a continuación se expondrán, representan soluciones tecnológicas variadas que se han implementado en distintos contextos industriales. Tal selección preliminar se fundamentó a partir de tres criterios de elección: (1) capacidad demostrada para generar rotación controlada en al menos un eje, (2) aplicabilidad documentada en sistemas de orientación de cargas o estructuras, (3) viabilidad técnica de implementación con componentes comerciales. De esta manera, se presentan las alternativas identificadas:

- **Alternativa 1:** Plataforma rotativa accionada por correa dentada.
- **Alternativa 2:** Sistema actuado por motorreductor acoplado directamente al eje.
- **Alternativa 3:** Actuador lineal–husillo con brazo desplazado.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- **Alternativa 4:** Conjunto biela–manivela para rotación limitada de orientación.
- **Alternativa 5:** Sistema de leva–seguidor para orientación angular predefinida.
- **Alternativa 6:** Sistema controlada mediante polea–cable y cabrestante.

Con estos diseños definidos, se presenta en la Tabla 4 la matriz de selección que integra seis criterios categóricos que permiten comparar objetivamente cada solución. Esta herramienta permite identificar el mecanismo más adecuado para los requerimientos del diseño final esperado, garantizando una selección fundamentada desde la perspectiva funcional. A partir de la ponderación de los criterios, como son la durabilidad y vida útil (30%), costo total (25%), capacidad de carga (15%), facilidad de fabricación y mantenimiento (15%), eficiencia y precisión (10%), adaptabilidad al entorno (5%); se desglosan subcriterios específicos con pesos relativos, ajustados con respecto a su conjunto, permitiendo una valoración integral de las alternativas. Las calificaciones se asignaron en una escala ordinal de 0-5, donde 0 representa el desempeño más bajo, insuficiente o poco adecuado frente a los requerimientos funcionales del mecanismo de orientación, mientras que 5 corresponde al desempeño más alto, reflejando una solución óptima, eficiente y plenamente compatible con las necesidades del sistema. El resultado final se obtuvo mediante la suma ponderada de cada subcriterio, generando un puntaje integral para cada alternativa que establece su nivel relativo al cumplimiento en las categorías del estudio.

Tabla 4. Matriz de selección multicriterio para mecanismos de rotación controlada.

	1. Durabilidad y Vida Útil (30%)		2. Costo Total (Fabricación + Materiales) (25%)		3. Capacidad de Carga (15%)		4. Facilidad de Fabricación/Mantenimiento (15%)		5. Eficiencia y Precisión (10%)		6. Adaptabilidad al Entorno (5%)		TOTAL
	1.1. Resistencia a la Corrosión: Adecuación del material. (10%)	1.2. Vida a la Fatiga: Número de ciclos operativos esperados. (20%)	2.1. Costo de Materiales: Precio de los componentes seleccionados. (15%)	2.2. Costo de Procesos: Complejidad y tiempo de manufactura. (10%)	3.1. Resistencia Estructural: Margen de seguridad ante cargas dinámicas e hidrodinámicas. (10%)	3.2. Rigidez: Deformación bajo la máxima carga de operación. (5%)	4.1. Complejidad de Ensamblaje: Número de piezas y dificultad de integración. (10%)	4.2. Facilidad de Mantenimiento: Acceso y disponibilidad de piezas de recambio en la zona rural. (5%)	5.1. Eficiencia Energética: Pérdidas por fricción y transmisión. (4%)	5.2. Precisión de Orientación: Error angular en la adaptación a condiciones variables. (6%)	6.1. Integración Flotante: Facilidad de acoplamiento a la estructura flotante de la turbina. (2%)	6.2. Tolerancia Ambiental: Capacidad de operar ante variaciones de caudal y riesgos de inundación. (3%)	
Alternativa 1	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3,40
Alternativa 2	4	4	3	3	5	5	3	3	5	5	4	4	3,85
Alternativa 3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4	3,60
Alternativa 4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3,75
Alternativa 5	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3,25
Alternativa 6	4	5	5	3	4	4	3	3	3	4	5	5	4,11

Nota: Rango de calificación establecido (0-5), donde 0 es el desempeño mas bajo y 5 al desempeño más alto.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Los resultados de la matriz de selección multicriterio revelan diferencias sustanciales entre las alternativas evaluadas en función de los criterios ponderados establecidos. La **Alternativa 6** (sistema de rotación controlada mediante polea–cable y cabrestante), registro la puntuación más elevada con un de 4,11, posicionándose significativamente por encima de las configuraciones restantes. En orden descendente, la **Alternativa 2** obtuvo 3,5 puntos, la **Alternativa 4** alcanzo 3,75, la **Alternativa 3** registro 3,60, mientras que la **Alternativa 1** y la **Alternativa 5** presentaron las calificaciones más bajas con 3,40 y 3,25 puntos respectivamente.

Este resultado evidencia la superioridad cuantitativa del diseño mediante polea-cable y cabrestante para el control de la rotación, ofreciendo la mejor relación entre la durabilidad, capacidad de carga y adaptabilidad al entorno, factores considerados críticos para la operación sostenida de las turbinas hidrocínicas, las cuales se encuentran expuestas a entornos acuáticos, donde los agentes corrosivos y cargas hidrodinámicas son puntos a tener en cuenta en el diseño al detalle. Si bien, alternativas como el motorreductor acoplado directamente al eje (**Alternativa 2**) presenta ventajas inherentes en términos de precisión de posicionamiento angular y simplicidad en la cadena cinemática, y el sistema de leva–seguidor (**Alternativa 4**) ofrece eliminación efectiva de holguras mecánicas; estos beneficios terminan siendo insuficientes para compensar ciertas limitantes identificados en base a la implementación del problema.

En consecuencia, los atributos técnicos observados en la **Alternativa 6**, particularmente en la resistencia a la degradación por exposición continua al ambiente, su capacidad para absorber cargas dinámicas mediante la flexibilidad inherente del cable tensor y su compatibilidad geométrica; configuran la justificación para su selección como solución tecnológica más adecuada para garantizar confiabilidad y desempeño en el contexto del proyecto.

4.3. Validación por simulación en el diseño del mecanismo de giro: desempeño estructural y funcional

Una vez seleccionado el mecanismo de giro controlado que se ajusta a las necesidades identificadas mediante la matriz de decisión, se procedió a desarrollar la validación estructural del sistema de rotación controlada mediante polea–cable y cabrestante para comprobar su funcionalidad y desempeño bajo las condiciones operacionales previstas. El diseño propuesto corresponde a una estructura tipo palanca articulado en el punto de apoyo $P(0,0)$, sobre la cual se distribuyen las cargas de la turbina hidrocínic

siendo W_1 la correspondiente a la turbina y W_2 relacionada al generador y sistema de transmisión. ubicadas en los extremos de los brazos de longitudes L_1 y L_2 respectivamente. Este sistema se encuentra anclado a una polea fija en el punto $G(s, -h)$, mediante un tirante de longitud L_x que finalmente genera tensión por medio de un cabrestante para realizar la acción controlada de giro del sistema de turbinas. La configuración geométrica del mecanismo se aprecia en la Figura 3, donde se caracteriza principalmente por el ángulo de inclinación φ y los parámetros geométricos a y s , definiendo las condiciones de equilibrio estático del sistema.

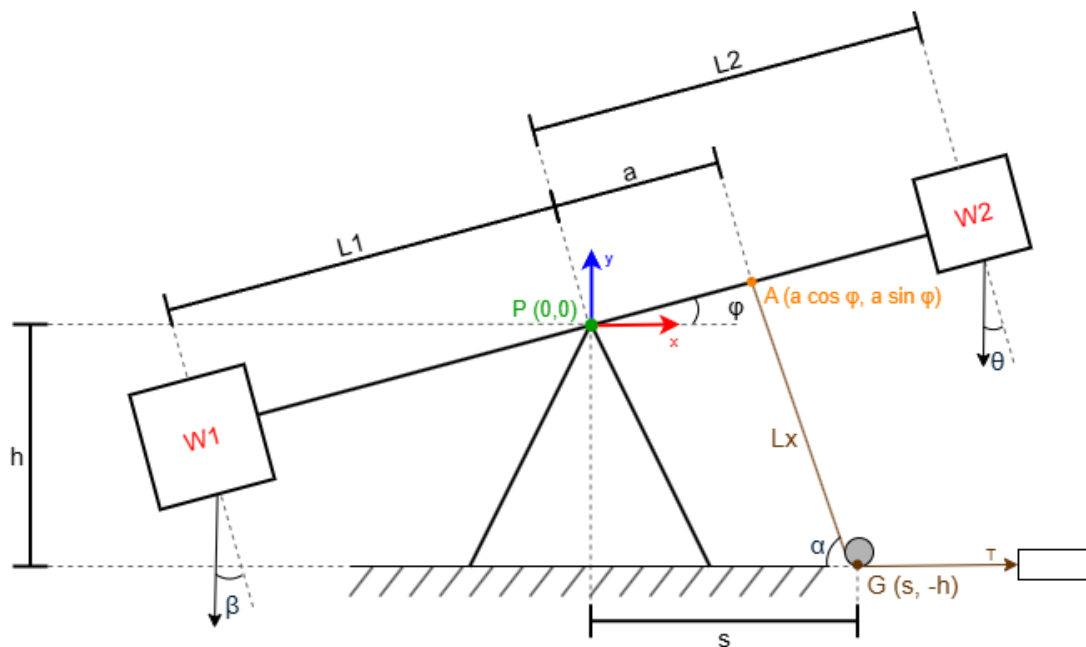


Figura 3. Esquema del sistema de giro con barra inclinada ($\varphi \neq 0^\circ$). Fuente propia.

La validación de la viabilidad estructural del diseño se abordó inicialmente mediante un análisis de fuerzas y momentos a través del método analítico. Este enfoque teórico permitió desarrollar un sistema de ecuaciones, necesario para explicar el equilibrio mecánico el cual gobierna la estructura. Específicamente, este proceso tuvo como objetivo relacionar la geometría del sistema definida por las longitudes L_1 , L_2 , a , s , h y el ángulo de inclinación φ , con las cargas asociadas a las turbinas, para deducir finalmente la tensión T requerida en el tirante. Dicha tensión, aplicada por un cabrestante (*winch*), es crucial para garantizar el equilibrio de momentos respecto al pivote P , permitiendo así determinar las reacciones en los apoyos y las tensiones en el tirante.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Inicialmente se considera el punto de aplicación del tensor sobre la barra (A) con respecto a P por

$$A = (a \cos \varphi, a \sin \varphi) \quad (1)$$

Asimismo, el anclaje (G) fijo en la estructura flotante con respecto a P , de esta manera $h > 0$, estableciendo así

$$G = (s, -h) \quad (2)$$

Donde se construye el vector de la fuerza en la Ecuación 3

$$\vec{AG} = G - A = (s - a \cos \varphi, -h - a \sin \varphi) \quad (3)$$

Adicional a ello, se compone la longitud del cable (L_x) respecto al análisis geométrico pertinente

$$L_x = \|\vec{AG}\| = \sqrt{(s - a \cos \varphi)^2 + (h + a \sin \varphi)^2} \quad (4)$$

Además, el ángulo del cable (α) respecto a la horizontal mediante el mismo estudio

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{h + a \sin \varphi}{L_x} \right); \cos^{-1} \left(\frac{s - a \cos \varphi}{L_x} \right); \tan^{-1} \left(\frac{h + a \sin \varphi}{s - a \cos \varphi} \right) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta la posición de las cargas (W_1, W_2) hacia los extremos de la barra, con respecto al pivote P , se toman en cuentas las distancia L_1 y L_2 para conocer los vectores de posición de las mismas, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación, de esta manera

$$r_1 = (-L_1 \cos \varphi, -L_1 \sin \varphi), \quad r_2 = (L_2 \cos \varphi, L_2 \sin \varphi) \quad (6)$$

Igualmente, se definen los ángulos de las fuerzas medidos desde la vertical global, evitando ambigüedades, donde β es el ángulo de W_1 y θ es el ángulo de W_2 respecto a esta, así los componentes en el marco global de las fuerzas F_1 y F_2 es

$$F_1 = (W_1 \sin \beta, -W_1 \cos \beta), \quad F_2 = (-W_2 \sin \theta, -W_2 \cos \theta) \quad (7)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Seguidamente, se utiliza el producto cruz en los momentos individuales ($M_i = r_{ix}F_{iy} - r_{iy}F_{ix}$) para cada una de las cargas, obteniendo así el momento sobre W_1 y W_2 respectivamente con P

$$\begin{aligned}
M_1 &= (-L_1 \cos \varphi)(-W_1 \cos \beta) - (-L_1 \sin \varphi)(W_1 \sin \beta) \\
M_1 &= W_1 L_1 (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta) \\
M_1 &= W_1 L_1 \cos(\varphi - \beta)
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
M_2 &= (L_2 \cos \varphi)(-W_2 \cos \theta) - (L_2 \sin \varphi)(-W_2 \sin \theta) \\
M_2 &= -W_2 L_2 (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \theta) \\
M_2 &= -W_2 L_2 \cos(\varphi + \theta)
\end{aligned} \tag{9}$$

De esta manera se evitan ambigüedades en las referencias angulares, debido a que la inclinación φ reduce el brazo efectivo cuando las fuerzas son verticales, es decir $\beta = \theta = 0^\circ$ desde la vertical global respecto a P .

En el momento del cable en tensión, se toma en cuenta el vector posición de A ($r_A = (a \cos \varphi - a \sin \varphi)$), con respecto a la tensión ($T = T(\cos \alpha, -\sin \alpha)$), para realizar el momento respectivo en donde

$$\begin{aligned}
M_T &= r_A \times T = a \cos \varphi (-T \sin \alpha) - a \sin \varphi (T \cos \alpha) \\
M_T &= -aT \sin(\alpha + \varphi)
\end{aligned} \tag{10}$$

Para eliminar la dependencia en α y expresar el denominador en función geométrica directa, se usan las identidades de $\sin \alpha$ y $\cos \alpha$. Por tanto

$$a \sin(\alpha + \varphi) = a \frac{h \cos \varphi + s \sin \varphi}{L_x} \tag{11}$$

Así, se realiza la sumatoria de momentos con respecto a P , la cual resulta de la siguiente manera

$$\sum_+ M_P = M_1 - M_2 - M_T = 0 \tag{12}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Reemplazando y despejando a T se obtiene la Ecuación 13, donde L_x se encuentra representada en la Ecuación 4

$$T = \frac{M_1 - M_2}{a \sin(\alpha + \varphi)} = \frac{(W_1 L_1 \cos(\varphi - \beta) - W_2 L_2 \cos(\varphi + \theta)) L_x}{a(h \cos \varphi + s \sin \varphi)} \quad (13)$$

Para el caso especial en donde la barra se encuentre de forma horizontal, sí y solo si $\varphi = \beta = \theta = 0^\circ$, en teoría la formula se simplifica

$$T = \frac{(W_1 L_1 - W_2 L_2) L_x}{ah}, \quad L_x = \sqrt{(s - a)^2 + h^2} \quad (14)$$

En las condiciones analizadas, se considera que $W_1 > W_2$, por lo tanto, el sistema tiende a generar un giro en sentido horario respecto al punto de apoyo P . De modo que el momento producido por W_1 actúa a favor del giro y el generado por W_2 en sentido contrario, estableciendo así los signos respectivos. En equilibrio, la tensión T debe compensar el momento resultante de las cargas para evitar la rotación del sistema.

Debido a ello, la tensión calculada mediante la fórmula anterior depende de dos grupos de parámetros: en primera medida, el momento neto generado por las cargas (M_1, M_2) depende de las magnitudes (W_1, W_2), las distancias (L_1, L_2) y de la inclinación de la barra (φ); en segunda instancia, la geometría del cable (posición del cabrestante $s, -h$ y el punto de aplicación a), que define netamente el término $a \sin(\alpha + \varphi)$. Este ultimo factor determina la efectividad con la cual la tensión puede generar un momento resistente al producido por los pesos, condicionando de esta manera el equilibrio del sistema.

A partir del anterior planteamiento analítico, y con el propósito de consolidar el comportamiento real del mecanismo, es necesario incorporar al estudio los valores geométricos y de carga obtenidos directamente del prototipo. A continuación, se presenta en la Tabla 4 las medidas reales ajustadas, que reúnen las dimensiones efectivas del sistema (L_1, L_2, h, a, s), así como las fuerzas aplicadas por los pesos (W_1, W_2), siendo $m_1 = 80 \text{ Kg}$ para el conjunto de las turbinas hidrocínicas y $m_2 = 60 \text{ Kg}$ para el generador. Estos datos permiten alimentar el modelo matemático desarrollado y constituyen la base para las posteriores validaciones, que incluyen el cálculo de la tensión (T), la verificación de las condiciones de equilibrio y los análisis paramétricos avanzados.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tabla 5. Medidas reales ajustadas del sistema mecánico

L_1 (m)	L_2 (m)	h (m)	a (m)	s (m)	W_1 (N)	W_2 (N)
1,6	0,66	0,59	0,2	0,3	784	588

Con el fin de establecer una línea base para la validación matemática del mecanismo de giro, se evaluó inicialmente la tensión en el cable para tres configuraciones angulares específicas. Inicialmente, el **Caso 1** corresponde a la geometría referencia, donde los ángulos articulares se fijan en cero ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$). Posteriormente, se seleccionaron dos configuraciones adicionales que representan condiciones contrastes en la operación; el **Caso 2** en condiciones desfavorables donde los ángulos incrementan el brazo de momento generado por las cargas ($\theta = 20^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, $\beta = 25^\circ$), por otro lado, el **Caso 3** representa una condición favorable en reducir el momento aplicado ($\theta = -10^\circ$, $\varphi = -15^\circ$, $\beta = -8^\circ$).

Así pues, la tensión se calculó mediante una función implementada en MATLAB (ver anexo B) a partir del modelo estático previamente formulado, permitiendo en la Tabla 6 comparar el efecto directo de los parámetros angulares sobre la respuesta mecánica del sistema.

Tabla 6. Resultados evaluación en configuraciones angulares específicas

Caso	Tensión (T) [N]	Longitud cable (L_x) [m]	α [°]
1	4393,38	0,598	80,38
2	5308,04	0,702	79,59
3	4979,17	0,549	78,78

Una vez evaluado el efecto de las configuraciones angulares, se realizó un barrido paramétrico sobre el parámetro s , correspondiente al desplazamiento longitudinal de la polea fija respecto al pivote debidamente demarcado. Este procedimiento se llevó a cabo manteniendo fijos los tres casos angulares previamente definidos, con el propósito de identificar como la posición del punto de anclaje del cable modifica la magnitud de la tensión requerida para mantener el sistema. Este barrido que se ve en la Tabla 7, se implementó íntegramente en MATLAB (ver Anexo C), detectando regiones de operación

en la que pequeños cambios en s producen variaciones significativas en la tensión, que llegan a ser críticas desde el punto de vista estructural.

Tabla 7. Resultados del barrido en la posición del cabrestante (s).

s [m]	Caso	T [N]	(L_x) [m]	α [°]
0.10	1	4393.38	0.598	99.62
0.20	1	4331.60	0.590	90.00
0.30	1	4393.38	0.598	80.38
0.40	1	4573.71	0.623	71.27
0.50	1	4859.40	0.662	63.05
0.10	2	6185.82	0.694	96.06
0.20	2	5652.13	0.691	87.78
0.30	2	5308.04	0.702	79.59
0.40	2	5108.92	0.726	71.80
0.50	2	5017.43	0.763	64.66
0.10	3	4484.95	0.546	99.82
0.20	3	4640.33	0.538	89.27
0.30	3	4979.17	0.549	78.78
0.40	3	5522.42	0.577	68.98
0.50	3	6282.33	0.620	60.32

Nota: Intervalo de s : 0.30 m a 0.5 m, con 5 muestras distribuidas uniformemente en tal intervalo.

De la misma manera, se efectuó un análisis sobre el parámetro a , que representa la distancia del punto de aplicación del cable respecto al extremo de la barra. El estudio se realizó nuevamente sobre las mismas tres configuraciones angulares, con el fin de evaluar cómo la modificación del brazo efectivo del cable influye en el momento resistente generado. Este barrido que se visualiza en la Tabla 8, se desarrolló en MATLAB (ver Anexo D), permitiendo determinar rangos que minimizan la tensión necesaria y asimismo zonas donde la geometría se vuelve desfavorable, contribuyendo a la identificación de los puntos críticos de diseño asociados a la interacción barra-cable.

Tabla 8. Resultados del barrido en la longitud del brazo (a).

a [m]	Caso	T [N]	(L_x) [m]	α [°]
0.10	1	9147.41	0.623	71.27
0.20	1	4393.38	0.598	80.38
0.30	1	2887.73	0.590	90.00
0.40	1	2196.69	0.598	99.62

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	04
				Fecha	24-02-2020

0.50	1	1829.48	0.623	108.73
0.10	2	10006.32	0.657	71.73
0.20	2	5083.43	0.668	80.34
0.30	2	3515.66	0.693	88.50
0.40	2	2781.04	0.731	95.96
0.50	2	2373.94	0.780	102.58
0.10	3	10351.16	0.607	70.61
0.20	3	4814.86	0.565	79.49
0.30	3	3057.44	0.538	89.51
0.40	3	2254.81	0.529	100.23
0.50	3	1837.13	0.539	110.93

Nota: Intervalo de s : 0.30 m a 0.5 m, con 5 muestras distribuidas uniformemente en tal intervalo.

El análisis angular evaluó el comportamiento de la tensión en el cable de anclaje ante modificaciones simultáneas de los ángulos φ (inclinación de la barra), β y θ (ángulos asociados a las cargas W_1 y W_2). Los resultados demuestran que la configuración en el **Caso 1** genera una tensión de referencia de 4393 N. Al incrementar los ángulos en el **Caso 2** la tensión aumenta un 20.8% hasta alcanzar 5308 N, mientras que con ángulos negativos en el **Caso 3** el incremento es del 13.3%, resultando en 4979 N. Este comportamiento confirma que la inclinación φ constituye la variable de mayor impacto en las solicitaciones del sistema, siendo el caso más crítico cuando la barra presenta pendiente positiva hacia W_2 . Los ángulos β y θ , aunque influyen en menor medida, modifican el coseno efectivo en los cálculos de momentos, contribuyendo a variaciones moderadas pero significativas en el rango del 13-21%.

Por un lado, el barrido paramétrico de la distancia horizontal s , que define la posición del punto de anclaje G respecto al pivote P , reveló un comportamiento no lineal de la tensión en el cable. Para la configuración base, se observó una disminución inicial de la tensión desde 0.1 m hasta 0.2 m, seguida de un incremento sostenido que alcanza 4859 N en 0.5 m. Este patrón se repite consistentemente en los tres casos angulares analizados, evidenciando la existencia de un valor óptimo alrededor de $s = 0.20 - 0.25$ m donde la tensión alcanza su mínimo local. El aumento de la tensión para valores superiores a $s = 0.30$ m se explica por el incremento en la longitud efectiva del cable L_x y la disminución del término geométrico $\sin(\alpha + \varphi)$, lo cual genera incrementos del orden del 15-20% respecto al valor mínimo. Por consiguiente, no resulta conveniente ubicar el anclaje a distancias mayores de 0.30 m del pivote, ya que esto compromete la eficiencia mecánica del sistema.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Por el otro, el análisis de sensibilidad del parámetro a , que representa la distancia desde el pivote P hasta el punto A donde se aplica la tensión del cable sobre la barra, demostró ser la variable geométrica de mayor influencia en el comportamiento estructural del mecanismo. Los resultados exhiben una relación inversamente proporcional marcada: mientras que para 0.1 m la tensión alcanza 9147 N, al incrementar este valor hasta 0.5 m la tensión se reduce drásticamente a 1829 N, lo que representa una disminución de aproximadamente 5 veces. Este comportamiento responde directamente al principio de momentos, donde aumentar el brazo de palanca del cable permite contrarrestar los momentos generados por W_1 y W_2 con menor fuerza de tensión. En consecuencia, se recomienda ubicar el punto de aplicación A en el rango de 0.40-0.50 m desde el pivote, configuración que optimiza significativamente las sollicitaciones del sistema y mejora su desempeño estructural.

La integración de los tres análisis paramétricos permite establecer criterios de diseño fundamentados para el mecanismo de orientación. El sistema evidencia mayor sensibilidad al parámetro a que al parámetro s , siendo el primero el factor determinante en la reducción de tensiones. Se recomienda adoptar una configuración geométrica óptima con $a = 0.45$ m y $s = 0.22$ m, la cual garantiza condiciones combinadas de mínima tensión, menores sollicitaciones estructurales y mejor capacidad para equilibrar los momentos de las turbinas. Respecto a las variaciones angulares, resulta imperativo implementar topes mecánicos que limiten la inclinación máxima φ , dado que este ángulo constituye la variable angular crítica que puede incrementar significativamente la tensión del cable. Bajo las condiciones geométricas propuestas, el mecanismo operará en una región mecánicamente segura con tensiones significativamente reducidas, asegurando su viabilidad para integración en sistemas de giro de turbinas hidrocínicas sin comprometer la integridad estructural ni el desempeño funcional del conjunto.

4.4. Diseño al detalle del sistema propuesto

Luego del capítulo anterior, en el que se realizó el análisis estructural completo del mecanismo, incluyendo la verificación de esfuerzos, validación de las dimensiones críticas y comprobación de su comportamiento bajo las cargas establecidas, se procedió a elaborar el modelo CAD en detalle a través de software Autodesk Inventor. El diseño resultante, observado en la Figura 4, define la geometría final del sistema, establece el

ensamble de todos los componentes y confirma la conformidad con los criterios funcionales y de seguridad determinados en la fase analítica.

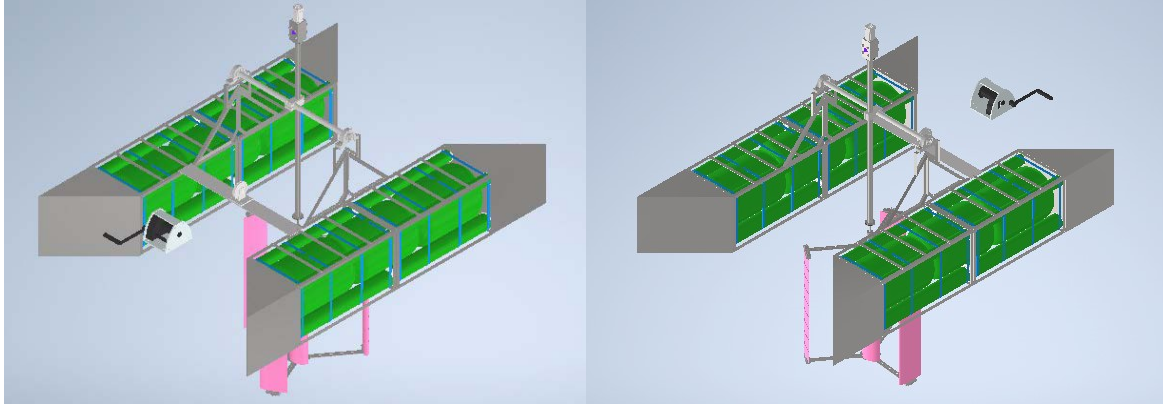


Figura 4. Diseño al detalle de mecanismo de orientación mediante polea-cable y cabrestante.

Con base en el modelo CAD definitivo y en los requerimientos técnicos identificados durante el proceso de diseño, se seleccionaron los componentes necesarios para la fabricación del mecanismo. Estos elementos, junto con sus características principales y su costo estimado, se presentan en la Tabla 9, la cual consolida el análisis económico del sistema propuesto. Esta tabla permite establecer el impacto financiero del diseño, identificar los materiales más relevantes en términos de costo y proyectar el presupuesto total requerido para la manufactura del prototipo o del sistema final.

Para establecer los rangos de costo presentados en esta tabla, se realizó una consulta en el mercado colombiano, examinando los precios de distribuidores especializados en equipos de izaje industrial, así como plataformas de comercio electrónico y ferreterías mayores. Es crucial destacar que los precios de los equipos MANIBOX GR y VS son estimaciones de alto rango, ya que, al ser maquinaria especializada, requieren una cotización formal directa del distribuidor oficial de HUCHEZ. La variación en los costos de las poleas de fundición y el cable de acero se justificó por el diámetro, la composición y el estricto cumplimiento del factor de seguridad necesario para soportar la tensión de trabajo de 10.000 N. Además, se ha incluido el Malacate o Winche Manual Genérico como una opción accesible para el presupuesto, ofreciendo una funcionalidad básica similar a un costo significativamente menor que los cabrestantes especializados de alta ingeniería.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tabla 9. Costos aproximados de los elementos del mecanismo de orientación polea-cable y cabrestante.

Componente	Especificación	Costo Unitario (Estimado COP)	Observación
Cabrestante (Alto Rendimiento)	MANIBOX GR (1500 kg)	\$1.500.000 - \$2.000.000	Referencia de alta gama, alto factor de seguridad.
Cabrestante (Opción Accesible)	Winche Manual Genérico (1.5 Ton)	\$350.000 - \$550.000	Opción básica, fácil de adquirir.
Polea (Diámetro 300 mm)	Fundición, D=300mm, Cap. > 15000 N	\$250.000	Diámetro mediano, relación ideal para el cable.
Polea (Diámetro 500 mm)	Fundición, D=500mm, Cap. > 15000 N	\$450.000	Mayor diámetro, mayor precio y mejor vida útil del cable.
Cable de Acero	1/2" (4 mm), 15000 N (por metro)	\$16.000 - \$22.000	Se debe verificar el diámetro exacto para el MANIBOX elegido.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo de grado cumplió con el objetivo de diseñar un mecanismo de control de orientación para turbinas hidrocínicas montadas sobre estructuras flotantes, optimizado en términos de desempeño estructural y funcional. A través de una metodología sistemática que integró revisión de literatura, evaluación multicriterio, validación computacional y diseño de detalle, se logró desarrollar una solución técnicamente viable basada en un sistema de polea-cable y cabrestante. Los resultados obtenidos demuestran que el mecanismo propuesto es capaz de garantizar el posicionamiento angular controlado de las turbinas bajo condiciones operacionales variables, contribuyendo así al aprovechamiento eficiente de la energía hidrocínica en zonas rurales de difícil acceso. La configuración geométrica óptima identificada ($a = 0.45 \text{ m}$, $s = 0.22 \text{ m}$) permite operar con tensiones significativamente reducidas, asegurando la integridad estructural del sistema y su viabilidad para implementación práctica en ambientes fluviales.

La revisión sistemática permitió identificar y categorizar doce diseños contemporáneos de mecanismos de control de orientación, clasificados en cinco arquitecturas fundamentales: sistemas de orientación angular multi-eje, mecanismos paralelos de orientación limitada, actuadores lineales de conversión rotacional-traslacional, sistemas giroscópicos de control de momento, y mecanismos de transmisión de potencia. Se evidenció una clara especialización arquitectónica según el dominio de aplicación, donde los diseños aeroespaciales priorizan la relación masa-potencia, los robóticos favorecen la versatilidad cinemática, y los industriales enfatizan la capacidad de carga. La ausencia de soluciones universales confirma que cada aplicación requiere un compromiso ingenieril específico entre múltiples variables de diseño.

La evaluación comparativa mediante matriz de selección multicriterio, ponderando seis criterios categóricos (durabilidad, costo, capacidad de carga, facilidad de fabricación/mantenimiento, eficiencia/precisión, y adaptabilidad al entorno), permitió identificar objetivamente el sistema de polea-cable y cabrestante como la solución óptima con una calificación de 4.11 sobre 5.00. Este diseño demostró superioridad en aspectos críticos para la aplicación hidrocínica, particularmente en resistencia a la degradación ambiental, capacidad para absorber cargas dinámicas y compatibilidad geométrica con

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

estructuras flotantes. La metodología aplicada garantizó una selección fundamentada que equilibra requerimientos técnicos, operacionales y económicos.

El análisis estructural mediante modelado matemático y simulación computacional confirmó la viabilidad del mecanismo seleccionado. Los tres estudios paramétricos realizados (variación angular, barrido en s , barrido en a) revelaron que el parámetro a (distancia del punto de aplicación del cable) constituye la variable de mayor influencia, con capacidad de reducir la tensión hasta en cinco veces al incrementarse de 0.1 m a 0.5 m. Se determinó que la configuración óptima ($a = 0.45$ m, $s = 0.22$ m) minimiza las solicitaciones estructurales, mientras que la implementación de topes mecánicos para limitar la inclinación φ es imperativa para evitar incrementos críticos de tensión superiores al 20%. El sistema operará con una tensión base de 4393 N en condiciones de referencia, dentro de rangos mecánicamente seguros.

El desarrollo del modelo CAD definitivo en Autodesk Inventor consolidó la geometría final del mecanismo, estableciendo el ensamble completo de componentes y confirmando la conformidad con los criterios funcionales y de seguridad. La selección técnica de componentes comerciales, documentada en el análisis de costos, reveló que el sistema puede implementarse con una inversión estimada entre \$2,116,000 y \$3,222,000 COP (configuración de alto rendimiento) o entre \$616,000 y \$1,272,000 COP (configuración accesible), dependiendo del nivel de especificación del cabrestante. Esta flexibilidad económica facilita la adaptación del diseño a diferentes contextos presupuestarios sin comprometer la funcionalidad esencial del sistema.

Adicionalmente, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo de la tensión del cable mediante sensores de carga para prevenir fallos por fatiga. Además, es fundamental establecer protocolos de mantenimiento preventivo que incluyan inspección periódica, lubricación y reemplazo oportuno del cable de acero y las poleas. Igualmente, se sugiere incorporar topes mecánicos ajustables que limiten físicamente el ángulo de inclinación φ como sistema redundante de seguridad. Para la fabricación, se aconseja utilizar acero inoxidable AISI 316 en componentes expuestos al ambiente acuático e implementar protección o recubrimientos especializados en elementos sumergidos, garantizando mayor resistencia a la corrosión y extendiendo la vida útil del mecanismo.

Por último, para futuras investigaciones se propone desarrollar un prototipo físico a escala real que valide experimentalmente los resultados teóricos, evaluando el comportamiento dinámico bajo condiciones reales de caudal variable y cargas hidrodinámicas.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Adicionalmente, se recomienda implementar estrategias de control automático mediante algoritmos adaptativos que ajusten la orientación de las turbinas en tiempo real utilizando sensores de flujo, maximizando así la captación energética. Estos desarrollos permitirían mejorar el desempeño global del sistema y establecer nuevas líneas de investigación en diseño inteligente y automatización de mecanismos hidrocinéticos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- Ahadi, P., Fakhrabadi, F., Pourshaghaghay, A., & Kowsary, F. (2023). Optimal site selection for a solar power plant in Iran via the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Renewable Energy*, 215, 118944. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118944>
- Ao, M., Yu, G., Wang, L., Sun, L., & Ren, Y. (2024). A unified optimization design method for multi-stage non-circular gear transmission based on periodic B-spline interpolation. *Advances in Engineering Software*, 197, 103760. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2024.103760>
- Bianchi, S., Andriotis, C., Klein, T., & Overend, M. (2024). Multi-criteria design methods in façade engineering: State-of-the-art and future trends. *Building and Environment*, 250, 111184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111184>
- Bu, F. (2020). Nonlinear adaptive robust motion control for hydraulic winch in oil and gas wireline operation. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8991–8996. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2015>
- Budynas, R. G. ., Nisbett, J. Keith., & Shigley, J. Edward. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
- Corficolombiana Investigaciones. (2025). *Informe Trimestral de Dinámica Sectorial - Energía*. https://investigaciones.corfi.com/analisis-sectorial-y-sostenibilidad/perspectiva-sectorial-energia/sector-energia/informe_1311074
- Cui, X., Liu, G. R., & Li, Z. R. (2023). A high-order edge-based smoothed finite element (ES-FEM) method with four-node triangular element for solid mechanics problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 151, 490–502. <https://doi.org/10.1016/jenganabound.2023.03.018>
- Georgescu, A., Simionescu, P. A., & Tălpășanu, I. (2014, November 14). Design and Prototyping of a Cost-Effective Sun Tracking System for Photovoltaic Panels. *Volume 6B: Energy*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-37682>
- Ghaedrahmati, R., & Gosselin, C. (2022). Kinematic analysis of a new 2-DOF parallel wrist with a large singularity-free rotational workspace. *Mechanism and Machine Theory*, 175, 104942. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104942>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Gouker, R. M., Gupta, S. K., Bruck, H. A., & Holzschuh, T. (2006). Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(11–12), 1049–1075. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0152-4>
- Grosu, S., De Rijcke, L., Grosu, V., Geeroms, J., Vanderboght, B., Lefeber, D., & Rodriguez-Guerrero, C. (2018). Driving Robotic Exoskeletons Using Cable-Based Transmissions: A Qualitative Analysis and Overview. *Applied Mechanics Reviews*, 70(6). <https://doi.org/10.1115/1.4042399>
- Harmon, J. M., Arthur, D., & Andrade, J. E. (2020). Level set splitting in DEM for modeling breakage mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 365, 112961. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112961>
- Huang, B., Li, Z. H., Tian, X. Z., Yang, L., Zhang, P. J., & Chen, B. (2021). Modeling and correction of pointing error of space-borne optical imager. *Optik*, 247, 167998. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167998>
- Li, X., Li, X., Tang, L., Yang, Z., & Yang, L. (2025). Development of a compact solar array drive assembly based on ultrasonic motor for deep space micro-nano satellites. *Acta Astronautica*, 228, 865–874. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.12.061>
- Li, Y., Gao, Y., Peng, Y., & Yao, S. (2025). Enhancing low-frequency motion of passive vibration-driven robots with inertial amplification structure: Modeling, simulations and experiments. *Applied Mathematical Modelling*, 140, 115877. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.115877>
- Linares-Espinós, E., Hernández, V., Domínguez-Escrig, J. L., Fernández-Pello, S., Hevia, V., Mayor, J., Padilla-Fernández, B., & Ribal, M. J. (2018). Metodología de una revisión sistemática. *Actas Urológicas Españolas*, 42(8), 499–506. <https://doi.org/10.1016/j.acuro.2018.01.010>
- Lohakare, P., Bewoor, A., Kumar, R., Said, N. M., & Sharifpur, M. (2022). Benchmark using multi criteria decision making (MCDM) technique to optimally select piston material. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.05.025>
- Low Carbon Power. (2025). *Electricidad en Colombia en 2023/2024*. <https://lowcarbonpower.org/es/region/Colombia>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Luo, Y., Yang, G., Cao, J., Yang, J., Chen, J., Zhao, H., & Wang, Z. (2023). Multibody dynamics analysis of a Kaplan turbine runner in full operating conditions. *Journal of Energy Storage*, 72, 108269. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108269>
- Martínez Cortés, B. J. (2021). *Propuesta para oficializar y calcular la pobreza energética en Colombia* [Economía, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca]. <https://repositorio.unicolmayor.edu.co/handle/unicolmayor/3492>
- Mingliang, Z. (2025). Controllability analysis of mechanical multibody dynamics control systems based on lie symmetry. *Alexandria Engineering Journal*, 127, 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.05.048>
- Mohamed, N., Bilel, N., & Alsagri, A. S. (2020). A multi-objective methodology for multi-criteria engineering design. *Applied Soft Computing*, 91, 106204. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106204>
- Mooren, N., van Meer, M., Witvoet, G., & Oomen, T. (2024). Compensating torque ripples in a coarse pointing mechanism for free-space optical communication: A Gaussian process repetitive control approach. *Mechatronics*, 97, 103107. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103107>
- Mott, R. L. ., Vavrek, E. M. ., & Wang, Jyhwen. (2018). *Machine elements in mechanical design*. Pearson.
- Nenchev, D. N., Konno, A., & Tsujita, T. (2019). Kinematics. In *Humanoid Robots* (pp. 15–82). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804560-2.00009-2>
- Noman, M., Li, G., Khan, M. W., Wang, K., & Han, B. (2024). Multi-stage control design for oscillating water column-based ocean wave energy conversion system. *Renewable Energy*, 237, 121622. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121622>
- Octrue, M., Nicolle, A., Genevier, R., & Lefebvre, C. (2015). A New Experimental Approach to Test Open Gears for Winch Drums. *Procedia Engineering*, 133, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.657>
- Pan, Y., Fan, J., Liu, G., Liu, Y., & Zhao, J. (2024). Design and kinematic analysis of a rope-driven linkage frog-like swimming robot with multidirectional controllable motion. *Ocean Engineering*, 291, 116430. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116430>
- Promaue, C., Das, S., & Nassehi, A. (2024). Finite Element Based mechanical properties prediction for material extrusion additive manufacturing to enable rapid production

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

system design. *Procedia CIRP*, 130, 59–64.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.056>

Qu, J.-P., Zhong, H., Bao, N., Fang, C., Zhang, H., Jiang, H., & Huang, Z.-X. (2025). A novel triboelectric generator based on wind-induced film vibration for harvesting breeze energy. *Nano Energy*, 140, 111005. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111005>

Rezaei, M. M., Zohoor, H., & Haddadpour, H. (2025). Analytical solution for nonlinear dynamics of a rotating wind turbine blade under aerodynamic loading and yawed inflow effects. *Thin-Walled Structures*, 113164. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113164>

Rodriguez-Cianca, D., Verstraten, T., Rodriguez-Guerrero, C., Jimenez-Fabian, R., Näf, M. B., Vanderborght, B., & Lefeber, D. (2020). The two-degree-of-freedom cable pulley (2DCP) transmission system: An under-actuated and motion decoupled transmission for robotic applications. *Mechanism and Machine Theory*, 148, 103765. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103765>

Rosen, D. W. (2014). Research supporting principles for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(4), 225–232. <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.951530>

Shi, Z. (2021). Introduction. In *Intelligence Science* (pp. 1–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85380-4.00001-4>

Suh, J., & Choi, W. (2023). Design and Verification of Parallelogram Mechanism With Geared Unit Rolling Joints for Reliable Wiring. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(6), 3756–3763. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3264716>

Toloei, A. R., Pirzadeh, M., & Vali, A. R. (2016). Design of predictive control and evaluate the effects of flight dynamics on performance of one axis gimbal system, considering disturbance torques. *Aerospace Science and Technology*, 54, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.04.019>

Travis Douville, Mark Severy, Todd Wall, & Kendall Mongird. (2022). *Small Hydropower Interconnections: State Interconnection Processes*. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-33051.pdf

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Unde, J., Colan, J., & Hasegawa, Y. (2025). Novel Articulated Lead Screw Linear Actuator Enabled by Transforming Linkage Mechanism. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(2), 1369–1376. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3521682>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Sistema de Transmisión Nacional 2012-2025*. https://www1.upme.gov.co/siel/Plan_expansin_generacion_transmision/PLAN_COMPLETO_2012-2025.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (2024). *Proyección de la demanda de Energía eléctrica y Potencia máxima 2024-2038*.

U.S Department of Energy. (2025a, August 26). *Microhydropower Systems*. <https://www.energy.gov/energysaver/microhydropower-systems>

U.S Department of Energy. (2025b, August 27). *Planning a Microhydropower System*. <https://www.energy.gov/energysaver/planning-microhydropower-system>

Uzun, B., Ozsahin, I., Agbor, V. O., & Uzun Ozsahin, D. (2021). Theoretical aspects of multi-criteria decision-making (MCDM) methods. In *Applications of Multi-Criteria Decision-Making Theories in Healthcare and Biomedical Engineering* (pp. 3–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824086-1.00002-5>

Vanbecelaere, F., Van Oosterwyck, N., Derammelaere, S., Cuyt, A., Monte, M., & Stockman, K. (2022). On-line motion profile optimization for reciprocating mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 173, 104833. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104833>

Wang, C. (2024). Study on dynamic performance and optimal design for differential gear train in wind turbine gearbox. *Renewable Energy*, 221, 119776. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119776>

WEN, Q., GUO, S., LI, H., & DONG, W. (2018). Nonlinear dynamics of a flapping rotary wing: Modeling and optimal wing kinematic analysis. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(5), 1041–1052. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.03.004>

Xie, L. Y., & Zhao, B. F. (2024). Review on mechanical system reliability models. In *Developments in Reliability Engineering* (pp. 111–137). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13242-1.00018-7>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Xu, Z., Pan, S., Chen, L., Lu, M., Liang, Z., & Qin, Y. (2022). Dynamic modeling and open-loop analysis of a control moment gyroscope considering the influence of a flexible vibration isolator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108611>
- Zhang, T., Lin, T., Liu, Y., & Chen, B. (2024). Analysis of tooth root three-dimensional fatigue crack initiation, propagation, and fatigue life for spur gear transmission. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 134, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104741>
- Zhu, H., & Hu, C. (2021). A study on floating overhead power transmission system for offshore energy development: Design and modeling approach. *Ocean Engineering*, 236, 109528. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109528>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ANEXOS

Anexo A. Función Tensión general por MATLAB

```

function [T, Lx, alpha, MT, D] =
tension_general(L1,L2,a,s,h,phi,W1,W2,beta,theta)

%% Conversión a radianes
phi = deg2rad(phi);
beta = deg2rad(beta);
theta = deg2rad(theta);

%% Calculos geometricos

AGx = s - a*cos(phi);
AGy = -h - a*sin(phi);

Lx = sqrt(AGx^2 + AGy^2);

%% Angulo alpha en grados
alpha_1 = atan2(h + a*sin(phi), s - a*cos(phi));
alpha = rad2deg(alpha_1);

%% Momentos
M1 = W1*L1*cos(phi-beta);
M2 = W2*L2*cos(phi+theta);

D = a*(h*cos(phi) + s*sin(phi));

if abs(D) < 1e-12
    T = NaN;
    warning('Denominador ~ 0 (Configuración singular, por ello T = NaN)');
    return
end

%% Tensión general
T = ((M1-M2)*Lx)/D;

end

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Anexo B. Análisis de casos angulares por MATLAB

```

clear; clc;

%% Parámetros geométricos y cargas de entrada iniciales
W1 = 784; % [N]
W2 = 588; % [N]
L1 = 1.6; % [m]
L2 = 0.66; % [m]
a = 0.2; % [m]
s = 0.3; % [m]
h = 0.59; % [m]

%% Configuraciones angulares ( $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\beta$ )
casos = [
    0, 0, 0; % Caso 1: referencia
    20, 30, 25; % Caso 2: desfavorable
    -10, -15, -8 % Caso 3: favorable
];

%% Cálculo de tensiones
Tensiones = zeros(size(casos,1),1);

for i = 1:size(casos,1)

    theta = casos(i,1);
    phi = casos(i,2);
    beta = casos(i,3);

    [T, Lx, alpha] = tension_general(L1,L2,a,s,h,phi,W1,W2,beta,theta);
    Tensiones(i) = T;

    fprintf("Caso %d ( $\theta$ =%d°,  $\phi$ =%d°,  $\beta$ =%d°) → T = %.2f N, Lx = %.3f m,  $\alpha$  = %.2f°\n", ...
        i, casos(i,1), casos(i,2), casos(i,3), T, Lx, alpha);

end

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Anexo C. Análisis paramétrico del desplazamiento longitudinal en la polea del cabrestante (s) por MATLAB

```

clear; clc;

%% Parámetros constantes
W1 = 784; W2 = 588;           % Pesos [N]
L1 = 1.6; L2 = 0.66;        % Longitudes [m]
a = 0.2;                    % [m]
h = 0.59;                   % [m]

%% Casos angulares (en grados)
casos = [
    0, 0, 0;                % Caso 1: referencia
    20, 30, 25;            % Caso 2: desfavorable
    -10, -15, -8           % Caso 3: favorable
];

%% Rango de s
s_vals = linspace(0.1, 0.5, 5); % 5 puntos para mostrar resultados

%% Mostrar resultados
fprintf("Resultados:\n");
fprintf("s [m]\tCaso\tT [N]\t\tLx [m]\t\tα [°]\n");
fprintf("-----\n");

for j = 1:size(casos,1)
    theta = casos(j,1);
    phi = casos(j,2);
    beta = casos(j,3);

    for i = 1:length(s_vals)
        s = s_vals(i);
        [T, Lx, alpha] = tension_general(L1,L2,a,s,h,phi,W1,W2,beta,theta);
        fprintf("%.2f\t%d\t%.2f\t\t%.3f\t\t%.2f\n", s, j, T, Lx, alpha);
    end
end
end

```

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Anexo D. Barrido paramétrico sobre el punto de aplicación del cable en la barra (a) por MATLAB

```

clear; clc;

%% Parámetros constantes
W1 = 784; W2 = 588;      % Pesos [N]
L1 = 1.6; L2 = 0.66;    % Longitudes [m]
s = 0.3;                % [m] (fijo)
h = 0.59;               % [m]

%% Casos angulares (en grados)
casos = [
    0, 0, 0;           % Caso 1: referencia
    20, 30, 25;       % Caso 2: desfavorable
    -10, -15, -8      % Caso 3: favorable
];

%% Rango de a
a_vals = linspace(0.1, 0.5, 5); % Barrido en a

%% Mostrar resultados
fprintf("Resultados (barrido en a):\n");
fprintf("a [m]\tCaso\tT [N]\t\tLx [m]\t\tα [°]\n");
fprintf("-----\n");

for j = 1:size(casos,1)
    phi = casos(j,1);
    theta = casos(j,2);
    beta = casos(j,3);

    for i = 1:length(a_vals)
        a = a_vals(i);
        [T, Lx, alpha] = tension_general(L1,L2,a,s,h,phi,W1,W2,beta,theta);
        fprintf("%.2f\t%d\t%.2f\t\t%.3f\t\t%.2f\n", a, j, T, Lx, alpha);
    end
end
end

```

