

ISSN 2523-6830

Volumen 4, Número 10 — Enero — Junio - 2020

Revista del
Diseño
Innovativo

ECORFAN[®]

ECORFAN-Taiwán

Editor en Jefe

CAMPOS - QUIROGA, Peter. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Revista del Diseño Innovativo, Volumen 4, Número 10, de Enero a Junio - 2020, es una revista editada semestralmente por ECORFAN-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, ZhongXin, Street 69. Postcode: 23445. WEB: www.ecorfan.org/taiwan, revista@ecorfan.org. Editor en Jefe: CAMPOS - QUIROGA, Peter. PhD. ISSN: 2523-6830. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda, LUNASOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Junio del 2020.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional para la Defensa de la Competencia y Protección de la Propiedad Intelectual.

Revista del Diseño Innovativo

Definición del Research Journal

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Ingeniería y Tecnología, en las Subdisciplinas Arquitectura internacional, Innovación tecnológica, Diseño Industrial, Técnicas de diseño empresarial, Diseño Multimedia, Diseño Publicitario, Diseño de sistemas Web, Arquitectura Residencial.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Revista del Diseño Innovativo es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Taiwan, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de Arquitectura internacional, Innovación tecnológica, Diseño Industrial, Técnicas de diseño empresarial, Diseño Multimedia, Diseño Publicitario, Diseño de sistemas Web, Arquitectura Residencial enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias de Ingeniería y Tecnología. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

DE LA ROSA - VARGAS, José Ismael. PhD
Universidad París XI

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

LÓPEZ - LÓPEZ, Aurelio. PhD
Syracuse University

VEGA - PINEDA, Javier. PhD
University of Texas

VAZQUEZ - MARTINEZ, Ernesto. PhD
University of Alberta

ROBLEDO - VEGA, Isidro. PhD
University of South Florida

ROCHA - RANGEL, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory

LAGUNA, Manuel. PhD
University of Colorado

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD
Universidad Politécnica de Valencia

Comité Arbitral

RODRÍGUEZ - DÍAZ, Antonio. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

JUAREZ - SANTIAGO, Brenda. PhD
Universidad Internacional Iberoamericana

CUAYA - SIMBRO, German. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

INZUNZA - GONÁLEZ, Everardo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

AVILÉS - COYOLI, Katia Lorena. PhD
Instituto Tecnológico de Pachuca

CASTRO - ENCISO, Salvador Fernando. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

CALDERÓN - PALOMARES, Luis Antonio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

MARTINEZ - MENDEZ, Luis G. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

MARTÍNEZ - RAMÍRES, Selene Marisol. PhD
Universidad Autónoma Metropolitana

NAVARRO - ÁLVEREZ, Ernesto. PhD
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

AMARO - ORTEGA, Vidblain. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

Cesión de Derechos

El envío de un Artículo a Revista del Diseño Innovativo emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Taiwan considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

Detección de Plagio

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandara a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceania. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Área del Conocimiento

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de Arquitectura internacional, Innovación tecnológica, Diseño Industrial, Técnicas de diseño empresarial, Diseño Multimedia, Diseño Publicitario, Diseño de sistemas Web, Arquitectura Residencial y a otros temas vinculados a las Ciencias de Ingeniería y Tecnología

Presentación del Contenido

Como primer artículo presentamos, *Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2*, por COLÍN-MARTINEZ, José Luis, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe, con adscripción en CIATEQ A.C., como segundo artículo presentamos, *Sistema de realidad virtual para la industria aerospacial*, por FAVELA-OLIVAS, Ruben Alonso & SANCHEZ-SANTIAGO, Pedro, con adscripción en el Colegio Nueva Vizcaya, como tercer artículo presentamos, *Estabilidad y diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga*, por TELLEZ-CUEVAS, Pedro, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y CRUZ-LUNA, Manuel, con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango, como último artículo presentamos, *Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado*, por ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain, con adscripción en la Universidad Autónoma del Carmen.

Contenido

Artículo	Página
Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2 COLÍN-MARTINEZ, José Luis, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe <i>CIATEQ A.C.</i>	1-13
Sistema de realidad virtual para la industria aeroespacial FAVELA-OLIVAS, Ruben Alonso & SANCHEZ-SANTIAGO, Pedro <i>Colegio Nueva Vizcaya</i>	14-22
Estabilidad y diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga TELLEZ-CUEVAS, Pedro, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y CRUZ-LUNA, Manuel <i>Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango</i>	23-29
Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain <i>Universidad Autónoma del Carmen</i>	30-40

Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2

Preliminary design and simulation of the rotor hub for a 50-kW class II wind turbine, according to the IEC-61400-2 standard

COLÍN-MARTINEZ, José Luis†*, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe

CIATEQ A.C., Av. del Retablo 150 Col. Constituyentes Fovissste Querétaro, C.P. 76150, Querétaro, México.

ID 1^{er} Autor: José Luis, Colín-Martínez / ORC ID: 0000-0003-3095-4115, CVU CONACYT ID: 879470

ID 1^{er} Coautor: Victor, Lopez-Garza / ORC ID: 0000-0001-9090-9119, Researcher ID Thomson: H-6969-2018, CVU CONACYT ID: 554311, Open ID: 107470673007841597382

ID 2^{do} Coautor: Isaac, Hernández-Arriaga / ORC ID: 0000-0002-0668-8649, CVU CONACYT ID: 45617

ID 3^{er} Coautor: María Guadalupe, Navarro-Rojero / ORC ID: 0000-0001-6326-3025, CVU CONACYT ID: 95394

DOI: 10.35429/JID.2020.10.4.1.13

Recibido 23 de Marzo, 2020; Aceptado 30 de Junio, 2020

Resumen

Actualmente la energía eólica en México está en crecimiento y lo mismo ocurre a nivel mundial, por lo que se deben de desarrollar proyectos con tecnologías nacionales para la fabricación de componentes de los aerogeneradores, en el presente trabajo se realiza una propuesta del diseño del cubo del rotor para una turbina de 50-kW, el objetivo es hacer una nueva propuesta que mejore el diseño anterior del proyecto P07 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico), el cual cuenta con un cubo mecano soldado para un prototipo de turbina de 30 kW. Se realiza además una simulación por medio de análisis del método de elemento finito (FEM) aplicando escenarios de carga con el método simplificado de cargas de la norma internacional IEC 61400-2. En las presentes simulaciones se analizan los casos de carga de la norma que influyen directamente en el cubo, después se simulan en el software de simulación ANSYS para validar el diseño propuesto, analizando principalmente los esfuerzos y las deformaciones. Los resultados obtenidos servirán de referencia para fabricar el cubo y evaluar la viabilidad de llevar a cabo una etapa comercial con miras a realizar componentes nacionales para los parques eólicos.

Aerogenerador, Cubo del rotor, Diseño, Simulación

Abstract

Currently, wind energy in Mexico is growing and the same is happening worldwide, so projects with national technologies for the manufacture of wind turbine components must be developed. In this work, a proposal is made for the design of the hub of the rotor for a 50-kW turbine, the objective is to make a new proposal to improve the previous design of project P07 of the Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico), which has a welded mechanical hub for a prototype turbine 30 kW. In addition, a simulation is performed through analysis of the finite element method (FEA) by applying certain load elements with the simplified load method of the international standard IEC 61400-2. In these simulations, the load cases of the norm that directly influence the cube are analyzed, then simulated in the ANSYS software to validate the proposed design, mainly analyzing the stresses and deformations. The results obtained will serve as a reference to manufacture the cube and evaluate the feasibility of carrying out a commercial stage with a view to making national components for wind farms.

Wind Turbine, Rotor hub, Design, Simulation

Citación: COLÍN-MARTINEZ, José Luis, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe. Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2. Revista del Diseño Innovativo. 2020, 4-10: 1-13

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jose.colin@ciateq.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En los últimos años, el sector de energía eólica en México ha crecido considerablemente con más de 50 parques eólicos en donde se encuentran alrededor de 2400 aerogeneradores operando según la AMDEE (AMDEE, 2018), sin embargo, un área en específico que se desarrolla lentamente es la fabricación de equipos y componentes para la energía eólica. En la actualidad a nivel nacional la tecnología que se desarrolla en el territorio nacional es para aerogeneradores de pequeña capacidad la cual comprende a la generación de 10 kW a 50 kW de potencia. Las instituciones que han desarrollado este tipo de proyectos son las siguientes:

- CIATEQ A.C (Aerogenerador de 350 W y 30 kW)
- CIATEQ A.C / INEEL (Aerogenerador de 500 W)
- INEEL (Aerogenerador de 500 W)
- UNISTMO (Aerogenerador de 5 kW)
- Instituto Tecnológico de la Laguna (Aerogenerador de 30 kW)

Por lo anterior, se identifica la necesidad de desarrollo de tecnología eólica mexicana como lo ha sido en años recientes el desarrollo de la Máquina Eólica Mexicana para impulsar el sector eólico y en consecuencia del sector energético nacional, así como diseñar componentes con las características específicas de las regiones de potencial eólico de México, con el fin de aumentar la competitividad a nivel internacional en la fabricación de turbinas de pequeña y mediana potencia.

Actualmente en la unidad de CIATEQ A.C. sede Bernardo Quintana, en el área de turbinas eólicas se trabaja en el proyecto de diseño, fabricación y pruebas de un aerogenerador con una potencia nominal de 30 kW, este proyecto está en la fase de ensamble de sistemas y pruebas finales. Además, se tiene aprobados tres proyectos para la consolidación de esta tecnología, uno de ellos se denomina “Desarrollo de aerogenerador de baja potencia (<100kW) con un enfoque integral de introducción al mercado nacional” en el cual se diseñará un aerogenerador comercial de 50 kW.

El aerogenerador que se diseñó de 30 kW, es un prototipo que se encuentra en un nivel de maduración TRL 4. El objetivo actual, es llevar un aerogenerador a una fase comercial con un TRL 7, a fin de diseñar y fabricar sus componentes con una visión de producción, y donde el principal problema a resolver es el desarrollo del rotor diseñado y fabricado bajo esta perspectiva de competitividad en el mercado nacional e internacional. Por lo cual se investigarán las mejores prácticas de diseño y manufactura para realizar una producción en serie a menor costo de producción comparado con el rotor de prototipo.

El diseño previo del sistema del rotor del aerogenerador de 30 kW que se desarrolló tuvo la finalidad de cubrir la necesidad de un prototipo de turbina eólica. La meta ahora, es realizar un nuevo diseño en donde el enfoque es diseñar los componentes del rotor para fines comerciales, por lo que su costo de producción debe ser competitivo y su manufactura con miras a su producción en serie. Desarrollando estos nuevos componentes, se podrá integrar un paquete de transferencia de tecnología a una empresa del sector energético que le interese explotar el mercado, fabricando los productos a gran escala.

Este trabajo, se enfoca en el diseño preliminar del cubo, el cual es el componente del rotor encargado de transmitir la energía mecánica de las aspas al tren de potencia y a su vez al generador eléctrico, el diseño del componente toma en cuenta distintas metodologías de diseño como o lo son: diseño para la manufactura, material, diseño para el ensamble y el diseño para la calidad. Se planea diseñar el cubo para mejorar el proceso de manufactura que se tiene actualmente en CIATEQ. Además, se pretende comprobar la viabilidad de esta nueva propuesta para bajar los costos de fabricación en manufactura en serie.

Rotor de un aerogenerador

El rotor es el elemento principal de una máquina eólica, siendo su función principal la transformación de la energía cinética del viento en mecánica utilizable, existe gran variedad de rotores y su clasificación más usual se realiza en función de la disposición del eje.

El rotor de una turbina puede variar dependiendo de la potencia que se requiere generar eso dependerá del tamaño de las aspas, a continuación, se enlistan los componentes que integran al rotor.

Aspas

La conversión de la energía cinética del viento al movimiento rotativo mecánico se produce debido a las aspas del rotor, estas piezas tienen una forma aerodinámica la cual cambia el flujo del aire, se normaliza y causa una diferencia de presión. Esta diferencia de presión sobre el aspa crea una fuerza de sustentación que a su vez crea un par en el rotor de la turbina eólica (Warmerdam, 2017-2018).

Cubo

Es el elemento de una máquina donde se apoya y gira un eje. Es una parte muy importante de los aerogeneradores ya que es aquí donde se apoyan las palas y el rotor y es la única parte externa de los aerogeneradores que gira siendo el transmisor de la fuerza del viento al interior de la góndola (Buenestado, 2017).

Sistema de alabeo

En los aerogeneradores modernos, la velocidad de giro es regulada a través del sistema pitch. El sistema pitch regula el ángulo de paso de las palas del rotor, generando así un mayor o menor accionamiento de salida en las palas del rotor. El sistema pitch completo, incluido el controlador, está alojado delante en el cubo del aerogenerador (IFM, 2017).

Nariz

Es simplemente un elemento aerodinámico con forma de punta y que se coloca en el buje. Su misión es la de redireccionar el viento de enfrente del rotor, viento a barlovento, hacia los respiraderos de la góndola y así evitar turbulencias en la parte frontal del rotor (Warmerdam, 2017-2018). Ver *Figura 1*.



Figura 1 Sistema del rotor ensamblado en una turbina eólica

Fuente: (Scitechdaily, 2020)

Diseño para X

El modelo tradicional de Diseño para X (DFX) es más detallado y amplio que el proceso de diseño tradicional (que considera forma, función, material, proceso) el cual no es tan eficiente como se necesita, la manufactura competitiva requiere el entendimiento preciso de las necesidades del consumidor, las tendencias del mercado, un sistema de diseño de productos competitivos, la utilización de materiales y procesos que lleven a la manufactura de productos de alta calidad, económicos y con rapidez, además de que sean seguros, usables, robustos, fáciles de inspeccionar y mantener. (Anil Mital, 2017)

Diseño para la calidad

La metodología empleada para esta sección fue el despliegue de la función de la casa de la calidad (QFD), esto para hacer una evaluación de las necesidades del cliente y para conocer el peso de características de calidad del producto para tomar en cuenta en el diseño final de la pieza. A continuación, se muestran las características del perfil del consumidor a seguir, ya que esto ayuda a identificar a los clientes potenciales, es decir, a las personas que puedan adquirir el producto o servicio de CIATEQ:

- Empresas que requieran diseños de componentes de turbinas eólicas.
- Empresas e instituciones que quieran realizar manufactura de rotores.
- Empresas que se interesen en adquirir tecnología para su explotación.

- Clientes para crear empresas de base tecnológica.

Como necesidades del cliente se identificaron las siguientes:

- Transferir torque efectivamente
- Unir componentes del rotor
- Almacenar componentes de control
- Sostener el cubo aerodinámico
- Impulsar el generador eléctrico
- Conectar sistema de alabeo
- Proceso de manufactura en serie
- Bajo coste de fabricación
- Facilidad de montaje

Después se especificaron las características técnicas necesarias para responder a los requerimientos del cliente, las características más importantes son las siguientes:

- Geometría del cubo
- Resistencia del material
- Maquinabilidad de la pieza
- Consumo de material
- Costo de fabricación
- Costo de instalación

Con estos datos se puede realizar la evaluación de la función de la casa de la calidad, además de la correlación que tiene los requerimientos del cliente y las características técnicas.

Diseño para la manufactura y el ensamble

Se ha definido la ingeniería concurrente (IC) como un acercamiento sistemático al diseño integrado de productos y los procesos relacionados, incluyendo manufactura y soporte. Pretende que los diseñadores consideren todos los elementos del ciclo de vida del producto, desde el diseño conceptual hasta su disponibilidad en el mercado, incluyendo calidad, costos y los requisitos del usuario.

Una de las metodologías de diseño utilizadas en IC, particularmente las relacionadas con la productividad, es diseño para manufactura (Design for Manufacturing DFM).

Que se puede definir como una colección de programas, técnicas, métrica, herramientas y métodos para mejorar la fabricación de partes o simplificar el ensamble de productos, analizando valores, tolerancias, movimiento, complejidad y conveniencia para el ensamble manual, automático o flexible para que encaje de manera óptima en un sistema de manufactura particular que resulta en costo y calidad excelente. El objetivo de utilizar diseño para manufactura aplicado a un proceso en particular, es diseñar productos que sean fáciles de mantener, confiables, en menor tiempo y que sean más simples, es decir, menos costosos para manufacturar, manteniendo la calidad de los mismos (Claudia Marcela Sánchez R, 2005), los principios de DFM son:

- Reducir el número total de partes
- Desarrollar un diseño modular
- Usar materiales y componentes estandarizados
- Diseñar partes multifuncionales
- Diseñar para fácil fabricación
- Evitar partes separadas
- Minimizar las operaciones de manipulación
- Utilizar tolerancias amplias
- Minimizar el número de operaciones
- Evitar operaciones secundarias.
- Rediseñar componentes para eliminar pasos de proceso.

Diseño CAD

Como primer paso en el proceso de diseño del cubo, se realizó una búsqueda virtual de imágenes, patentes, artículos científicos, etc. estableciendo como fecha de referencia el último año para ver las configuraciones más comunes del cubo. Para el diseño de la geometría del cubo, antes era común el uso de cualquiera de los centros esféricos o estrella, pero hoy en día es posible obtener cubos del rotor topológicamente optimizados. Un algoritmo de optimización se utiliza en FEM para variar el espesor de pared de acuerdo con la tensión local y obtener una solución con el uso mínimo de material. Estas geometrías tienen la forma de una manzana con aberturas adicionales en las zonas donde no se necesita ningún material. La figura 2, muestra la comparación entre el cubo esférico, el cubo de estrella y el cubo topológicamente optimizado. (Krishnappa, 2015)

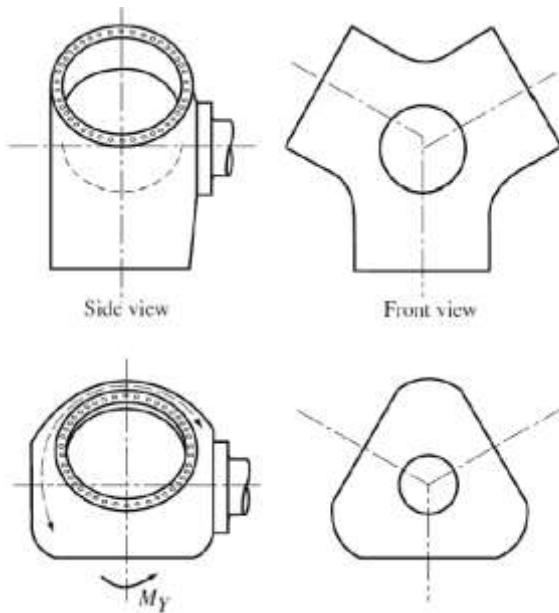


Figura 2 Geometría esférica del cubo
Fuente: (Krishnappa, 2015)

Para el diseño CAD del cubo, se utilizó el programa SolidWorks 2016, en el cual la carcasa general del cubo parte de una esfera, el modelo se muestra en la figura 3, este concepto se utilizó pensando en que la manufactura del cubo se va a realizar mediante fundición de acero, esto disminuirá el costo y el de fabricación comparado con el prototipo anterior.



Figura 3 Modelo CAD de la propuesta del cubo
Fuente: (SolidWorks, 2016)

Para el dimensionamiento de la pieza se tomó en cuenta las proporciones de los sistemas del aerogenerador, para el rotor se utilizará el mismo sistema pitch por lo cual se modelaron los barrenos de las caras en donde ensamblan las aspas, por último, se propuso un diámetro de barrenado para la conexión de la flecha del tren de potencia. La fundición de hierro es el material preferido para construir el cubo. La fundición de hierro se clasifica de acuerdo a sus propiedades mecánicas, tales como resistencia y dureza, en el estándar EN1563.

Los cubos hechos de fundición, son usualmente puestos a prueba mediante ensayos no destructivos con el fin de verificar sus propiedades mecánicas y detectar posibles defectos y discontinuidades internas. Los siguientes son los ensayos no destructivos disponibles y los más usados:

- Inspección por ultrasonido
- Inspección por partículas magnéticas
- Inspección visual
- Medición de dureza.

Es importante considerar si el material elegido posee la ductilidad necesaria. En ese sentido las bajas temperaturas son críticas para cubos hechos de fundición, en consecuencia, la elección debe hacerse considerando las temperaturas de los alrededores. Tenga en cuenta que las reparaciones del cubo por medio de soldadura no están permitidas (DNV RISO, 2002).

Método simplificado de cargas

La Norma IEC 61400-2 Parte 2: Pequeños Aerogeneradores, nos propone utilizar el Método de Cargas Simplificadas. Dicho método, hace uso de ecuaciones simplificadas para determinar los momentos y fuerzas generadas en los tres componentes principales del aerogenerador (aspas, torre y eje de baja), de acuerdo a ciertas condiciones que pueda experimentar el aerogenerador durante su tiempo de vida. (IEC, 2013) La Norma propone el diseño de 10 casos de carga, los cuales aparecen en la tabla 1.

Situación de diseño	Hipótesis de carga	Tipo de análisis
Producción de energía	A Operación normal	F
	B Orientación	U
	C Error de orientación	U
	D Empuje máximo	U
Producción de energía de más ocurrencia de fallo	E Velocidad de rotación máxima	U
	F Cortocircuito en la conexión de carga	U
Parada	G Desconexión (frenado)	U
Carga extrema del viento	H Carga extrema del viento	U
Condiciones de inmovilización y de falta	I Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	U
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J Deberá estar indicado por el fabricante.	U

Tabla 1 Hipótesis de carga de diseño para el método simplificado.
Fuente: (IEC, 2013)

Selección de casos de carga

A primera vista las cargas que actúan en el aerogenerador son bastante simples y obvias. Una corriente de aire en el rotor genera torque y es transferido al generador eléctrico. Una vista más cercana revela más cargas que las supuestas al principio. Junto con las cargas del viento, la estructura completa esta además sujeta a cargas inerciales, gravitacionales y de viento turbulento, el sistema coordinado de la turbina se muestra en la figura 4, en el cual se aprecia que el eje Z va en dirección de la torre, los ejes X y Y forman un plano paralelo al suelo en donde se encuentra la cimentación del aerogenerador. Una de las simplificaciones hechas es pensar que el viento es una corriente constante en todo el rotor. El viento es de hecho altamente no uniforme y su dirección cambiará a través del tiempo. Esto crea fuerzas adicionales y momentos alrededor del cubo las cuales someten al cubo y al chasis a complejos casos de carga.

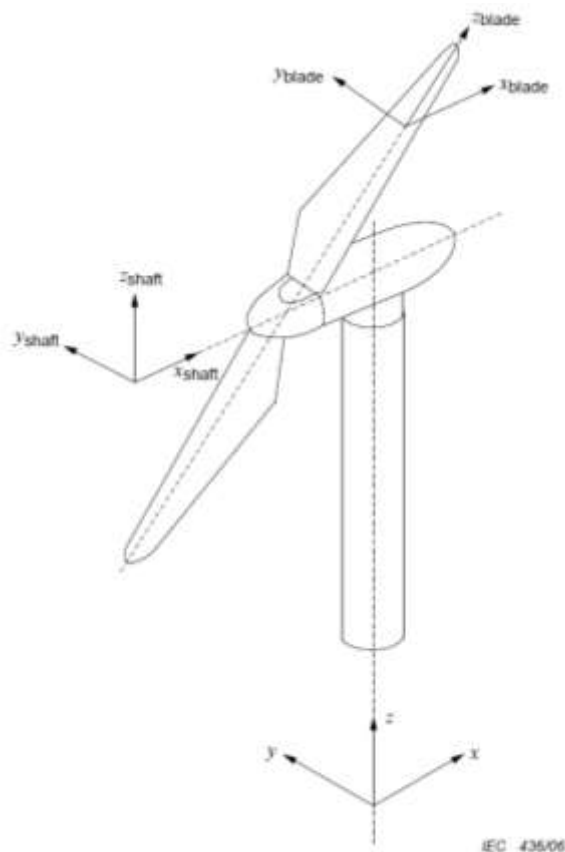


Figura 4 Sistema coordinado de la turbina eólica
Fuente: (IEC, 2013)

Dichas cargas provocan esfuerzos en diferentes áreas, y con ello, el máximo esfuerzo necesita ser identificado.

Las aspas experimentarán fuerzas en cada dirección y momentos alrededor de cada eje. Algunas de estas cargas son estables, algunas son cíclicas y algunas son completamente no-cíclicas. Esto hace al aerogenerador una máquina altamente dinámica y sujeta a fatiga.

Los momentos y fuerzas transmitidas al cubo y a la torre dependen de la configuración del cubo. Nos concentraremos en el cubo rígido ya que es la configuración de cubo más utilizada en los aerogeneradores comerciales. El cubo rígido tiene los álabes en voladizo y transmite todos los momentos a la torre (J.F. Manwell, 2009).

Las cargas a considerar para el diseño del cubo deben ser las que actúan en la interacción entre el álabe, eje principal y cubo. Dichos casos de carga son tomados en base a la norma IEC 61400-2 en el apartado correspondiente al diseño de pequeños aerogeneradores. Al analizar la información de los casos de carga del método simplificado, encontramos que los casos críticos en el cubo son los casos A, D y H. Con los resultados de los casos mencionados, se procederá a la simulación y optimización de los conceptos propuestos para el cubo del rotor.

Caso de carga A: Operación normal

El primer caso de carga cubre el comportamiento a la fatiga durante la operación normal de la turbina. Los rangos considerados en las cargas de fatiga son valores pico a pico (IEC, 2013).

Las cargas están definidas por las siguientes ecuaciones:

Cargas en el Aspa:

$$\Delta FzB = 2mBRcog\omega n2, design \quad (1)$$

$$\Delta MxB = \frac{Qdesign}{B} + 2mBgRcog \quad (2)$$

$$\Delta MyB = \frac{\lambda design Qdesign}{B} \quad (3)$$

Estos momentos de flexión son para aplicarse en la parte de la raíz del aspa. Las siguientes 3 ecuaciones dan las cargas en el eje de baja velocidad:

$$\Delta F_x - \text{shaft} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{\text{design}} Q_{\text{design}}}{R} \quad (4)$$

$$\Delta M_x - \text{shaft} = Q_{\text{design}} + 2mr_{\text{gr}} \quad (5)$$

$$\Delta M_{\text{shaft}} = 2mrgLr_b + \frac{R}{6} \Delta F_x - \text{shaft} \quad (6)$$

Caso de carga D: Empuje máximo

El aerogenerador pequeño puede estar expuesto a cargas de empuje altas en el rotor. Las cargas de empuje actúan en paralelo con el eje del rotor y tiene un valor máximo dado por:

$$F_{x-\text{shaft}} = C_T 3,125 \rho V_{ave}^2 \pi R^2 \quad (7)$$

Donde C_T es el coeficiente de empuje, igual a 0.5.

Caso de carga H: Cargas extremas de viento

Para este caso de carga la turbina está funcionando, durante velocidades de viento extremas como lo es $Ve50$. Para este caso hay dos instancias a considerar, la primera en una turbina parada y la segunda para una turbina en funcionamiento (IEC, 2013).

Cargas de turbina en paro:

$$M_y B = C_d \frac{1}{4} \rho V^2 e50 A_{proj,B} R \quad (8)$$

$$F_x - \text{shaft} = B \times C_d \frac{1}{2} \rho V^2 e50 A_{proj,B} \quad (9)$$

Para la turbina en movimiento:

$$M_{yb} = C_{l \max} \frac{1}{6} \rho V^2 e50 A_{proje,B} R \quad (10)$$

$$F_x - \text{shaft} = 0.17 B A_{proj,B} \lambda_{e50}^2 V_{e50}^2 \quad (11)$$

$$\lambda_{e50} = \frac{\eta_{\max} \pi R}{30 V_{e50}} \quad (12)$$

Datos de entrada y resultados del análisis simplificado de casos de carga

El método solo aplicará para turbinas de eje horizontal teniendo 2 o más aspas en voladizo, con sistemas coordinado de pitch y cubo rígido. Como primer paso se definen los siguientes parámetros de entrada que se muestran en la tabla 2.

Parámetro	Valor	Símbolo	Unidad
Densidad del aire	1.18	ρ	kg/m ³
Gravedad	9.81	g	m/s ²
Velocidad promedio de viento	8.5	V_{ave}	m/s
Numero de aspas	3	B	N/A
Radio del rotor	6	R	m
Área proyectada de las aspas	113.09	A_{projB}	m ²
Coeficiente de arrastre	1.5	C_d	N/A
Coeficiente de empuje	0.5	C_T	N/A
Masa del rotor (HUB + Blade)	860	m_r	kg
Velocidad extrema registrada una vez en 50 años	16.16	$Ve50$	m/s
Relación de velocidad en punta de diseño	5.91	λ_{design}	N/A
Torque del eje de diseño	70.76	Q_{design}	Nm
Distancia del centro de gravedad del rotor al eje de rotación (excentricidad)	0.03	er	m

Tabla 2 Parámetros definidos para la realización de los cálculos de casos de carga del método simplificado

Fuente: CIATEQ A.C

Con los datos anteriores se calculan los momentos y fuerzas con las ecuaciones establecidas anteriormente de acuerdo a la Norma IEC 61400-2, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Caso de carga A: Operación normal				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
4	Empuje en el eje x	104.61	N	$\Delta F_x - \text{shaft}$
5	Momento en el eje x	576.95	Nm	$\Delta M_x - \text{shaft}$
Caso de carga D: Empuje máximo				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
7	Máximo empuje en el eje x	15065.80	N	$F_x - \text{shaft}$
Caso de carga H: Cargas extremas de viento				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
9	Máximo empuje en el eje x	83337.17	N	$F_x - \text{shaft}$

Tabla 3 Resultados de los cálculos del método simplificado de cargas

Fuente: Elaboración Propia

Metodología a desarrollar

Para la selección del material se seleccionó el material de la base de datos del ANSYS, una vez que se obtengan los resultados de simulación se seleccionara el material con las características mecánicas que se requieran para cumplir con los factores de seguridad y el proceso de fabricación de la pieza.

En la simulación se utilizó el software de elemento finito ANSYS Workbench para evaluar cada uno de los casos de carga (A, D y H) el material que se seleccionó fue el acero estructural de la biblioteca del software las propiedades de este material se enlistan a continuación en la tabla 4.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m ³
Esfuerzo a la fluencia	250	MPa
Esfuerzo a la tensión	400-500	MPa
Elongación mínima en 50mm	23%	
Módulo de elasticidad	200	GPa
Espesor del material	0.06	m

Tabla 4 Propiedades del acero estructural

Fuente: (SUMITEC, 2017)

La geometría del cubo se importó de SolidWorks en formato IGS a la interfaz de ANSYS. Lo primero que se realizó fue definir las condiciones iniciales, como fue los soportes fijos, las fuerzas y momentos que actúan en la estructura del cubo, cabe aclarar que los ejes del software son diferentes a los de referencia de la norma por lo cual se ajustaron para que correspondieran, en este caso se hizo el cambio de ejes como se muestra en la figura 5.

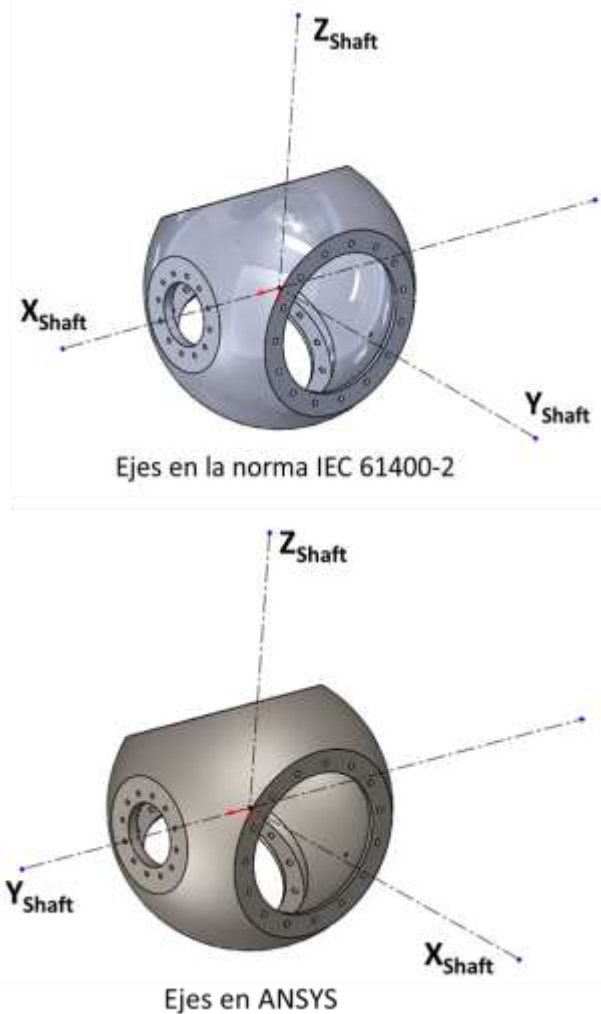


Figura 5 Conversión de ejes de ANSYS y de la norma IEC 61400-2

Fuente: *Elaboración Propia*

Para el caso de carga A, correspondiente a la ecuación 1 y los casos de carga D y H de las ecuaciones 7 y 9 respectivamente, para esto las condiciones que se aplicaron, fue colocar un soporte fijo en la cara de conexión con el eje del tren de potencia (color azul, figura 6) y también se colocó una fuerza sobre el eje Y en dirección hacia la torre en las caras donde van las bridas del aspa (color rojo) tal y como se muestra en la figura 6.

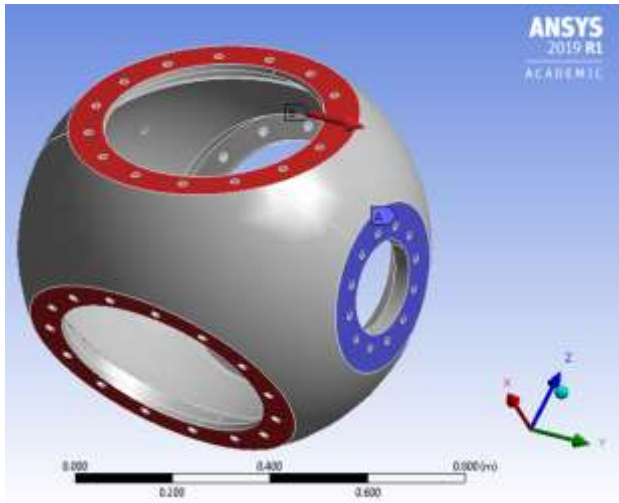


Figura 6 Configuración del caso de carga A, D y H. (Fuerzas sobre el eje X)

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Para el caso de carga A, correspondiente a la ecuación 2, las condiciones iniciales cambiaron colocando los soportes fijos en las caras donde van las bridas de las aspas (color azul, figura 7), mientras el momento se colocó sobre la cara de conexión del eje del tren de potencia (color rojo) tal y como se muestra en la figura 7.

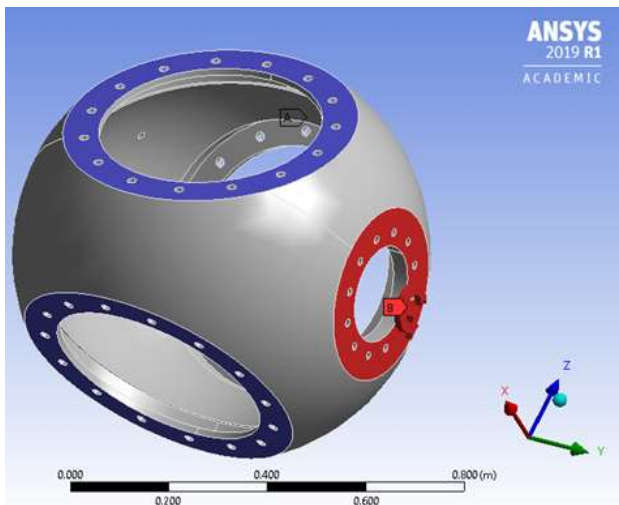
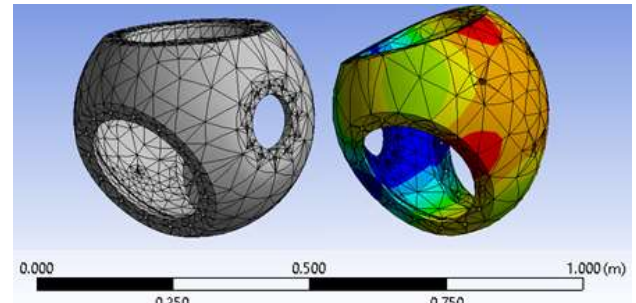


Figura 7 Configuración del caso de carga A (momento en el eje X)

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Resultados

En esta sección se comenzó con la generación del mallado del cubo para generar el modelo de elementos finitos, el proceso de mallado se comenzó con un tamaño del elemento de 0.1m y se aplicó un mallado general a toda la pieza, figura 8 (a). posteriormente se hizo una simulación para verificar la zona de interés de estudio, como se muestra en la figura 8 (b), los elementos que se utilizaron fueron tetraédricos.



a) Mallado general.

b) Análisis de deformación.

Figura 8 Mallado general del cubo, caso de carga H
Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Posteriormente, se utilizó la herramienta de mallado de body sizing en donde se configuró el tipo de la esfera de influencia con un radio de 0.5 m teniendo su origen exactamente en el centro de la conexión del cubo con la flecha del tren de potencia, esto es para el caso de carga A de la ecuación 2, el mallado en esta zona de incidencia se muestra en la figura 9.

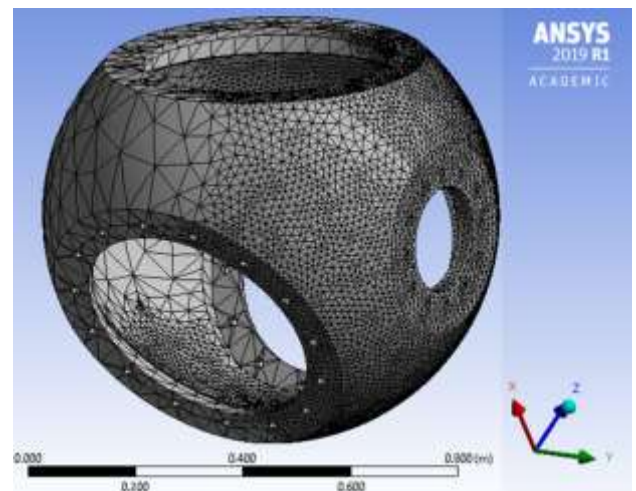


Figura 9 Mallado para el caso de carga A (Momento en X)

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Para los casos de carga A, ecuación 1, D y H, la zona de influencia a estudiar es la que se encuentra en la parte posterior del cubo por lo cual se generó la misma configuración de malla del caso pasado. La ubicación de la esfera de influencia se muestra en la figura 10.

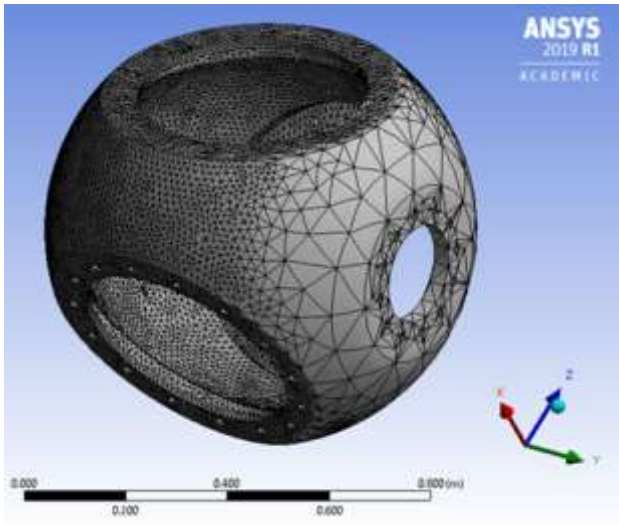


Figura 10 Mallado para los casos de carga A, D y H (Fuerzas en X)

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Una vez generada la malla, se fue observando la calidad de los elementos internos de la zona de influencia para verificar las formas tetraédricas de cada elemento en el cual cada vez se cambiaba el tamaño del elemento se hacían más uniformes, como se muestra en la figura 11.

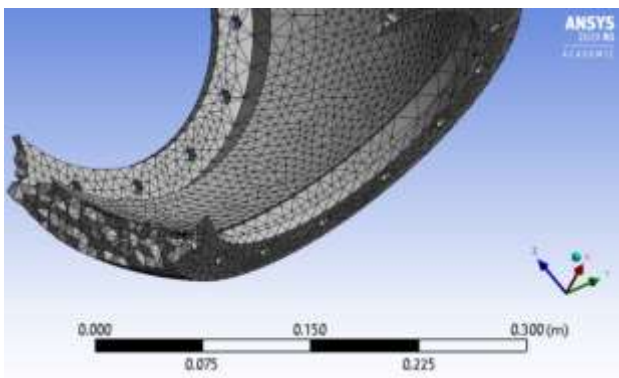


Figura 11 Detalle de la malla interna refinada para el caso de carga A (Momento en Y).

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Se realizó el proceso de convergencia de malla, esto para asegurar la solución del problema, se realizaron 10 simulaciones con 3 análisis: el máximo esfuerzo, el esfuerzo equivalente de Von Mises y la deformación, en la tabla 5, se muestran los resultados de las distintas iteraciones. Además, en el gráfico 1 se muestra los resultados de la teoría de falla de Von Mises en el cual se puede observar la convergencia de la malla del caso de carga A, enseguida también se muestran los resultados y graficas de cada uno de los casos de carga.

Caso de carga A: Empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	32673	135350	6.42E-08
5679	33056	135350	6.50E-08
5919	30796	27825	6.52E-08
6353	30958	27937	6.53E-08
9366	33496	30933	6.65E-08
11833	31907	27082	6.69E-08
19390	31384	29119	6.72E-08
50750	31067	27082	6.76E-08
51113	32207	28722	6.22E-08
107001	33004	29544	6.76E-08

Tabla 5 Resultados de las simulaciones del caso de carga A

Fuente: Elaboración Propia

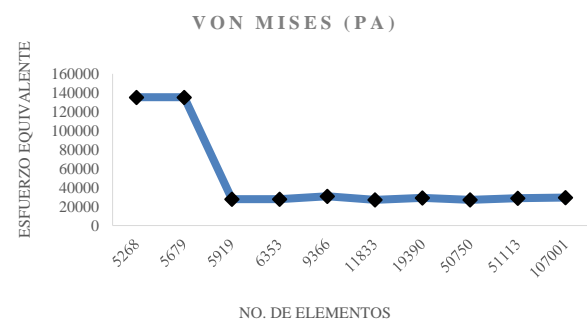


Gráfico 1 Convergencia de malla del caso A: Empuje en el eje X

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 y en el gráfico 2 se muestran los resultados del caso de carga A de la teoría de falla de Von Mises.

Caso de carga A: Momento en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5878	85372	30152	7.31E-08
5893	85372	140620	7.29E-08
6114	86097	13239	7.30E-08
6491	89125	141410	7.33E-08
8274	105150	143680	7.34E-08
10192	97111	144360	7.35E-08
15153	109350	153390	7.36E-08
36614	127450	159820	7.35E-08
72337	128850	162852	7.34E-08
113658	128580	165200	7.39E-08

Tabla 6 Resultados de las simulaciones del caso de carga A

Fuente: Elaboración Propia

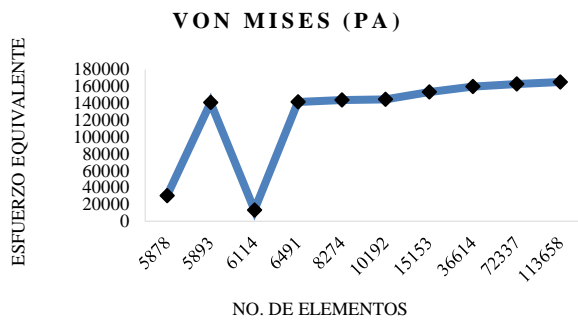


Gráfico 2 Convergencia de malla del caso A: Momento en el eje X.}

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 7 y en el gráfico 3 se muestran los resultados del caso de carga D de la teoría de falla de Von Mises.

Caso de carga D: Máximo empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	4705500	4342500	9.25E-06
5679	4760700	4394100	9.37E-06
5919	4435200	4007300	9.39E-06
6353	4458500	4023500	9.41E-06
9366	4825100	4455000	9.58E-06
11833	4595200	4165100	9.63E-06
19390	4133700	4715600	9.67E-06
50750	4474200	4900400	9.73E-06
51113	4538400	4880500	8.96E-06
107001	4876300	4792800	9.73E-06

Tabla 7 Resultados de las simulaciones del caso de carga D

Fuente: Elaboración Propia

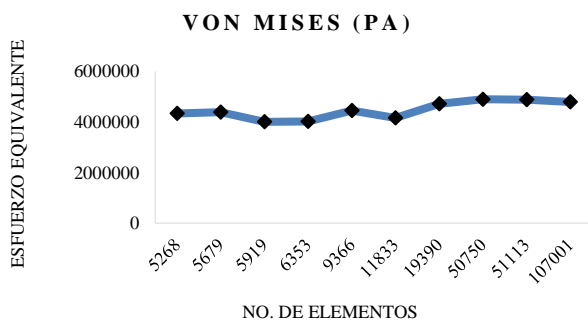


Gráfico 3 Convergencia de malla del caso D: Máximo empuje en el eje X

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 8 y en el gráfico 4 se muestran los resultados del caso de carga H de la teoría de falla de Von Mises.

Caso de carga H: Máximo empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	26029000	24021000	5.12E-05
5679	26334000	24306000	5.18E-05
5919	24534000	22166000	5.20E-05
6353	24663000	22256000	5.20E-05
9366	26685000	24643000	5.30E-05
11833	25418000	23045000	5.33E-05
19390	28397000	26086000	5.35E-05
50750	24749000	21575000	5.38E-05
51113	25657000	21578000	4.95E-05
107001	26148000	21146000	5.38E-05

Tabla 8 Resultados de las simulaciones del caso de carga H

Fuente: Elaboración Propia

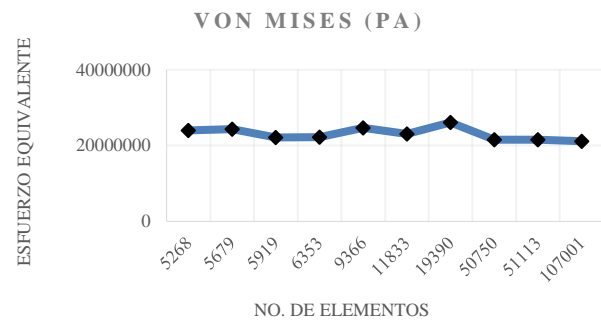


Gráfico 4 Convergencia de malla del caso H: Máximo empuje en el eje X

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se obtiene la convergencia de la malla, se pueden asegurar que los resultados de cada caso de carga son confiables y se pueden tomar estos datos para el rediseño posterior del cubo. A continuación, se muestra una simulación de ejemplo del caso de carga H, la cual es la hipótesis con el valor más alto de fuerza que se da en el eje X, los desplazamientos máximos de este caso se muestran en la figura 12.

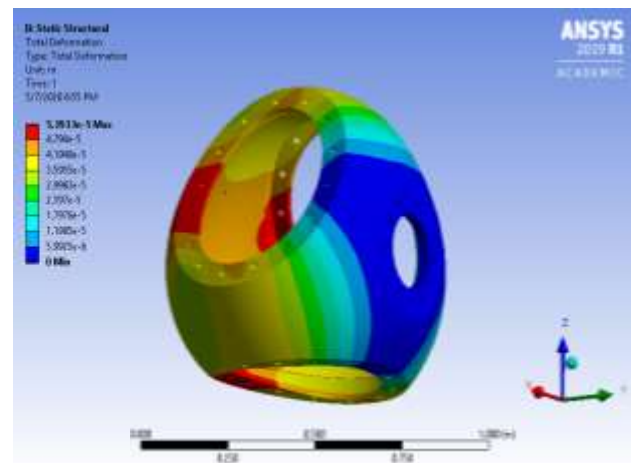


Figura 12 Resultado del análisis de deformación del caso de carga D

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

La figura 13 muestra la simulación del esfuerzo máximo principal del caso de carga D, en donde se muestran los resultados.

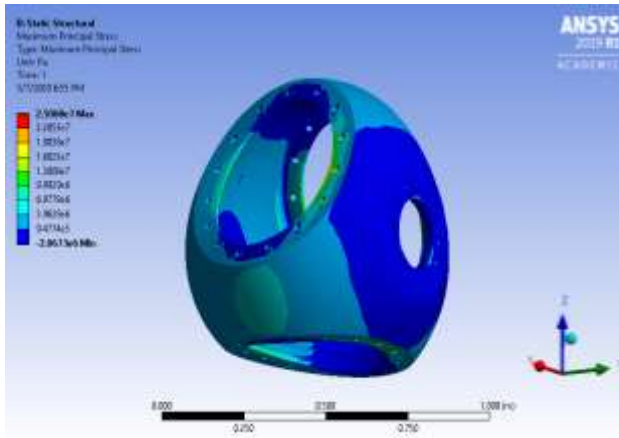


Figura 13 Resultado del esfuerzo máximo del caso de carga D

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

La figura 14 muestra los esfuerzos de la teoría de falla de Von Mises del caso de carga D.

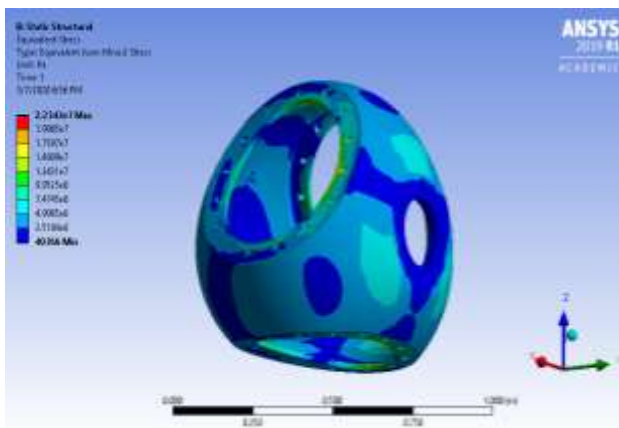


Figura 14 Resultado del análisis de la teoría de falla de Von Mises del caso de carga D

Fuente: (ANSYS Workbench R1 ACADEMIC, 2019)

Agradecimiento

A la gerencia de Turbomaquinaria y al posgrado de CIATEQ A.C. por las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo. Así como al CONACYT por las becas otorgadas a los alumnos de maestría.

Conclusiones

Los resultados obtenidos son satisfactorios para el material que se eligió para hacer la simulación, sin embargo, se deben de hacer más simulaciones del cubo considerando otro tipo de acero y una vez que se tenga el diseño de los componentes del aerogenerador (Aspas, tren de potencia góndola, sistemas de control etc.) se podrá dimensionar el cubo tomando en cuenta el diseño para el ensamble con otros componentes auxiliares, para que después se puedan afinar detalles de diseño.

Las simulaciones se realizaron con una licencia académica por lo que tenía un límite de elementos a analizar, por lo cual se puede utilizar una licencia comercial con la que cuenta CIATEQ, esto ayudaría a generar una malla más detallada una vez que se tenga el diseño final del componente.

Por los resultados obtenidos podemos concluir que la pieza es demasiado robusta ya que los desplazamientos que existen son demasiado pequeños por lo que se debe de hacer una optimización de la simulación para llegar al dimensionamiento mínimo cumpliendo los factores de seguridad establecidos por la norma.

Referencias

Aguilar-Acevedo, F. M.-V.-L.-P.-S.-B. (2020). Modelado Euler-Lagrange del rotor de un.

AMDEE. (2018). Asociación Mexicana de Energía Eólica . Obtenido de <https://amdee.org/>
Anil Mital, S. N. (Noviembre de 2017). Ingeniería de Manufactura en el siglo XXI.

ANSYS Workbench R1 ACADEMIC. (2019).
Buenestado, J. F. (2017). ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS. Madrid España.

Claudia Marcela Sánchez R, C. J. (14 de Octubre de 2005). Conceptos de diseño para manufactura (DFM) de piezas microfundidas.

DE OLIVEIRA, V. H. (2020). DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO DA FUNDAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA.

DNV RISO. (2002). Guidelines for desing of wind turbines. Denmark.

Fernández Guevara, A. (2020). Diseño de un parque híbrido de 15MW aplicado en la provincia de Celendín, región Cajamarca.

Funes Castro, S. (2020). Caracterización de una turbina mareomotriz de eje vertical.

IEC. (2013). INTERNATIONAL STANDRD IEC 61400. Suiza.

IFM. (2017). Sistema pitch eléctrico en un aerogenerador sin multiplicadora. Recuperado el Marzo de 2020, de http://eval.ifm-electronic.com/ifmmx/web/apps-by-industry/cat_060_010_010.html

J.F. Manwell, J. M. (2009). WIND ENERGY EXPLANINED. UK: WILEY.

Krishnappa, L. (2015). Fatigue Analysis of a 7.5 MW wind turbine rotor hub. Hannover, Alemania.

Scitechdaily. (2 de January de 2020). Obtenido de Successful Test for Superconducting 3.6-Megawatt Wind Turbine: <https://scitechdaily.com/successful-test-for-superconducting-3-6mw-wind-turbine/> SolidWorks. (2016).

SUMITEC. (2017). Acero estructural A36. México.

Warmerdam, M. P. (2017-2018). Aerodinámica de aerogenerador de eje horizontal de 500 kW. La Rioja España.

Sistema de realidad virtual para la industria aeroespacial

Virtual reality training system for aerospace industry

FAVELA-OLIVAS, Ruben Alonso*† & SANCHEZ-SANTIAGO, Pedro

Colegio Nueva Vizcaya

ID 1^{er} Autor: *Ruben Alonso, Favela-Olivas* / ORC ID: 0000-0001-9993-9023

ID 1^{er} Coautor: *Pedro, Sanchez-Santiago* / ORC ID: 0000-0002-0010-3590

DOI: 10.35429/JID.2020.10.4.14.22

Recibido 23 de Marzo, 2020; Aceptado 26 de Junio, 2020

Resumen

Este documento describe el proceso de diseño y desarrollo de un sistema de realidad virtual hecho a la medida de los procesos de manufactura de productos aeroespaciales a través de la metodología TRIZ con el objetivo de eliminar la larga curva de aprendizaje del personal operativo. Se identificaron los problemas críticos de ensamble que requieren meses de práctica y experiencia para cumplir con las expectativas de Calidad y Velocidad en los procesos de manufactura. La solución consiste en la concepción de un ambiente de simulación virtual con la introducción de tecnología 3D, interfaces interactivas y software avanzados que permiten al usuario adquirir el conocimiento y habilidades en cuestión de horas. La naturaleza de fabricación de aviones ejecutivos depende del factor humano debido a la alta complejidad de componentes ensamblados a mano a causa de la criticidad del producto y la alta variedad y especialización de diferentes componentes con distintas geometrías que se ensamblan de menor a mayor tamaño para finalmente construir un avión que mide 63 ft por 20 ft (e.g. Cessna Sovereign+) que consiste en 200 mil sub-ensambles y detalles que requieren de exactitud y perfección para entregar un producto que cumple con las expectativas de funcionalidad y calidad.

Innovacion TRIZ, Sistemas de realidad Virtual en manufactura, Curva de aprendizaje

Resumen

This document describes the process of design and development of a virtual reality system tailored to the Manufacturing environment of Aerospace industry using TRIZ methodology with the objective of reducing the learning curve in direct labor. There were identified the critical problems in Manufacturing that describe the longest timing of learning curve. The solution consists of conceiving a Virtual reality system introducing 3D technologies, interactive interfaces and Advanced software to help the user to learn faster and acquire the knowledge and skills in hours. Aircraft Manufacturing environment relies on human factor due to the high complexity of craftsmanship and product controls, severity and a high variety and specialization of many different components with different geometries that are assembled from minor to major assemblies to finally build an aerostructure sizing 63 ft x 20 ft (e.g. Cessna Sovereign+) that consists of 200 thousands sub-assemblies and details that require precision and perfection to manufacture a product that meets functional and quality expectations.

TRIZ innovation, Virtual Reality systems in Manufacturing, Learning curve

Citación: FAVELA-OLIVAS, Ruben Alonso & SANCHEZ-SANTIAGO, Pedro. Sistema de realidad virtual para la industria aeroespacial. Revista del Diseño Innovativo. 2020, 4-10: 14-22

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: rubenfavela@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad, la complejidad y alta diversidad de operaciones manuales en la Industria Aeroespacial demanda mucho conocimiento, habilidad y experiencia ya que el recurso humano es fundamental para manufacturar productos de Calidad en un ambiente de especificaciones críticas y cerradas de ingeniería. Por lo tanto, el talento y factor humano son partes clave para que los productores de aviones incrementen su producción, Calidad y dividendos.

Un operador de aero-estructuras requiere de mucho conocimiento teórico para prevenir problemas que pueden detener la línea de producción por días o semanas en el peor de los casos, ya que el retrabajo es un común denominador en la naturaleza de estos procesos y la probabilidad de que una aero-estructura se manufacture con cero defectos es de un 12% bajo condiciones de personal experimentado (aproximadamente 2 años) y un 0% con personal menor a 6 meses.

En México, la rotación de personal promedio es de un 4.89% mensual (INDEX 2019, p. 5), esto significa que, en un periodo de un año, un 59% de la gente será remplazada por gente completamente nueva. Por lo tanto, los niveles de Calidad y eficiencia se ven afectados directamente por la naturaleza de este comportamiento. En esta investigación, se introducen conceptos tecnológicos y de innovación para resolver esta problemática a través de la implementación de sistemas de realidad virtual que aceleran el aprendizaje desde un ambiente controlado donde las personas se someten a múltiples variables, casos y toma de decisiones para que al interactuar con el sistema inteligente y aumentado se vaya aprendiendo de una manera estandarizada y con las mejores prácticas de manufactura el conocimiento y habilidad motriz básicas para prevenir fallas de Calidad, Seguridad y Eficiencia. Esto, a través de consistentes repeticiones, el conocimiento pasa de una actividad consciente al inconsciente, permitiéndole al personal desarrollar reacciones automáticas en base al conocimiento expuesto para tomar las mejores decisiones de métodos de manufactura y solución de problemas (troubleshooting) durante el ambiente real de producción teniendo el respaldo necesario para salvaguardar el producto.

La hipótesis principal de la investigación consiste en demostrar que las nuevas tecnologías y la realidad virtual impactan considerablemente el aprendizaje en los sistemas de manufactura. Para lo cual se detectaron las principales fuentes del conocimiento que impactan los procesos de manufactura y bajo estos conocimientos claves se diseñaron módulos en realidad virtual que impacten en el aprendizaje.

El diseño de las variables y factores de ruido a los que se exponen los operadores de ensamble en este Sistema de Realidad Virtual se dedujeron a través de la observación de los procesos de ensamble, análisis de riesgo de manufactura, probabilidades de falla por características críticas de proceso y por las Características de producto claves especificadas en la ingeniería de diseño. Se utilizaron metodologías como FMEA, Pareto, Análisis de sobrevivencia y probabilidad de falla, ergonomía, DFA/DFM y algoritmos de agrupación de datos (data-mining & clustering) para encontrar las variables claves que se hacen presentes en el ambiente de manufactura a los que se expone el personal nuevo que impactan en el 95% de los problemas de Calidad, Ergonomía y Velocidad.

Después de localizar las 12 familias claves y los 48 fenómenos de ensamble que afectan la curva de aprendizaje, se utilizaron metodologías de Diseño de Experimentos fraccionados y de señal-ruido, análisis de correlación y superficie de respuesta, TRIZ y solución de problemas avanzados para optimizar y robustecer los métodos de manufactura y el diseño de pruebas para evaluar y enseñar al personal en el ambiente interactivo 3D. En la ejecución del Sistema Virtual, se seleccionaron los ensambles representativos para cada una de las variables y se procesaron a través de herramientas CAD para modelar en 3D la Fábrica, las herramientas, fixturas, aero-estructuras, etc. Que se utilizan para simular el ambiente de producción. En el caso del sistema interactivo, se instalaron sensores de movimiento a través de "Leap Motion" y "Oculus Rift", para detectar el movimiento de la persona e introducirlo al ambiente 3D en tiempo real y poder interactuar con los objetos CAD.

El desarrollo de las pruebas en ambiente virtual se llevó a cabo a través de programación orientada a objetos en Unity para conectar específicos movimientos de la persona con la selección de herramientas, detección física de las piezas, comunicación con el ambiente 3D, así como la retroalimentación del sistema cuando ocurren omisiones al método de manufactura ya sea por posicionamiento de las manos que afectan Seguridad o errores que ocasionaran defectos en las piezas.

El sistema cuenta con el conocimiento del proceso de manufactura e información que inteligentemente va desplegando cuando los errores van ocurriendo durante el aprendizaje interactivo y lleva registro de los problemas para finalmente calificar cada prueba y proporcionar una evaluación objetiva y concluir si la prueba fue exitosamente aprobada o no. Las pruebas fueron secuenciadas estratégicamente para que el personal no pueda aprender una nueva técnica si previamente no ha demostrado la habilidad y conocimiento en las pruebas anteriores. Se desarrolló una base de datos que captura toda la información de las pruebas para llevar control de las áreas de oportunidad y las habilidades adquiridas para finalmente decidir cuando una persona está lista para pasar al ambiente productivo.

El dispositivo de Realidad Virtual cuenta con un vasto nivel de pruebas e interacciones que a una persona experta en el sistema y con un alto grado de entendimiento del proceso de manufactura le tomaría 4 horas terminar el entrenamiento, esto significa, que se cuenta con suficiente material para asegurar que el sistema cuenta con una buena herramienta de evaluación para pronosticar si una persona se desempeñará adecuadamente en un ambiente real.

Descripción del método

El estudio consiste en comparar dos universos, 1) el estado actual que se basa en el entrenamiento en aula más el tiempo que le conlleva al personal aprender en el proceso de manufactura con el principio de “trial-error” en oposición.

2) sistema propuesto de realidad virtual que en adición al entrenamiento en aula se incluyen los módulos en 3D que interactúan con los usuarios para mostrarles en un simulador las condiciones de manufactura y los problemas que se suscitaran una vez que estén en el proceso de ensamble ya que previamente se entiende en que fallan y este sistema promueve el conocimiento y la habilidad con anticipación al “Trial-error”.

Para evaluar el sistema de realidad virtual en comparación con la enseñanza en aula tradicional se definió que en un periodo de 6 meses se evaluarán los resultados del personal nuevo en las áreas piloto de implementación del sistema de realidad virtual. Los participantes serán 20 personas de nuevo ingreso que se someterán al entrenamiento en realidad virtual que competirán en contra del historial conocido de que las personas que se entrenan bajo condiciones tradicionales toman 9 meses para adquirir la habilidad y mantener una eficiencia del 95% y un 5% de defectos por problemas de habilidad.

En esta investigación se utilizaron técnicas cuantitativas para evaluar si el sistema de realidad virtual es significativamente mejor con un nivel de confianza del 95% a través de una prueba de hipótesis de distribución normal tipo Z. Las Técnicas de colección de datos consistieron en medir en un periodo de 6 meses la cantidad de defectos y tiempos de ciclo por operación por cada persona y obtener la distribución de tiempos de ciclo e ir monitoreando de esta manera la curva de aprendizaje hasta alcanzar el 95% de eficiencia y 5% de defectos.

Análisis de investigación

Durante la investigación se observaron los comportamientos y relaciones entre defectos y causas con el objetivo de agrupar en patrones y detectar a través de un análisis estratégico las variables vitales de los procesos de manufactura que hacen que la curva de aprendizaje sea tan larga. La relación causa-defecto es crítica ya que el modelo de aprendizaje está vinculado con la falta de adherencia a un estándar conocido del proceso de manufactura que se hace evidente en el producto cuando ocurre un defecto y el operador aprende a través de su error para de esta forma mejorar su desempeño.

En el Pareto (Figura 1) se describe la cantidad de defectos que ocurrieron durante el proceso de observación en un periodo de 3 meses. De las 49 categorías de defectos, el 26% de los defectos explican 91% de todos los problemas.

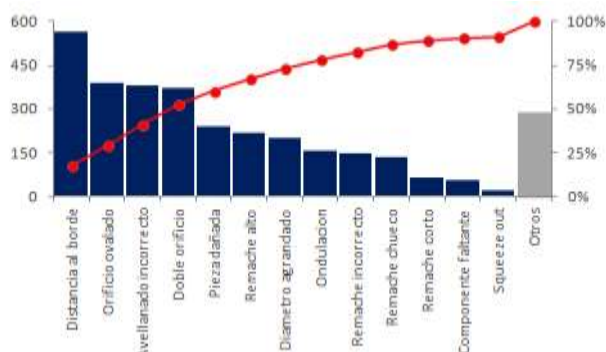


Figura 1 Pareto Cantidad de defectos
Fuente (Favela, 2019)

A través de un análisis de causa y defecto se determinó que 13 defectos son explicados por 13 causas directas donde todas ellas están relacionadas a falta de conocimiento y omisión a un estándar de manufactura con las cuales se desarrolló un dendograma (Figura 2) donde se observa que hay un 53% de similitud entre las causas y defectos agrupándose dos universos 1) relación entre herramienta y omisión de estándar y 2) habilidad de uso de herramienta y conocimiento.

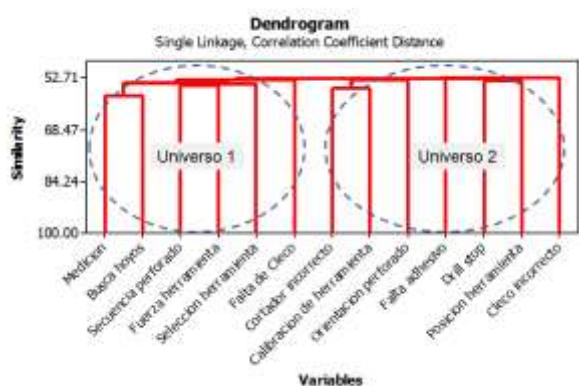


Figura 2 Dendograma para agrupación de causas y defectos
Fuente (Favela, 2019)

Cada una de las causas y defectos asociados que dificultan el aprendizaje están a su vez vinculados con el tipo de ensamble que las personas bajo aprendizaje realizan, esto se puede observar en el análisis de sensibilidad de factores (Figura 3) donde demuestra que existe una afinidad entre el grupo de causas y defectos y los tipos de ensamble.

Esto significa que cada tipo de ensamble tiene distintas mezclas de los 13 defectos mencionados formando 5 uniones de similitud entre los ensamblajes.

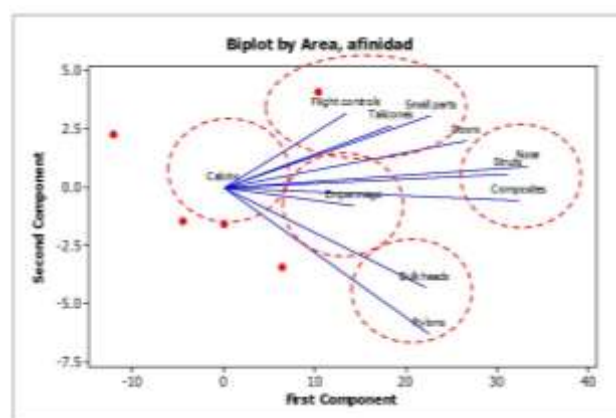


Figura 3 Análisis de sensibilidad por tipo de ensamble
Fuente (Favela, 2019)

Con el análisis de sensibilidad de las variables críticas por ensamble y las correlaciones entre causa y defecto se determinaron 14 módulos de enseñanza asociados a este tipo de fallas para prevenir la ocurrencia de la causa y así mismo la aparición de defectos explicados en la tabla 1.

Módulo de enseñanza	Ocurrencia
Uso de escalas (Enfocado a medición de distancias al borde)	76%
Uso de clecos (Curso básico de sheet metal)	52%
Avellanado	46%
Instalación de remaches BJ, XLZ y BB	42%
Instalación de Cherrys	42%
Uso de Squeezes	39%
Taladrado	39%
Team Bucking	21%
Aplicación de sellador	17%
Instalación de Hi-Lok	16%
Electrical Bonding	14%
Cutout	14%
Instalación de Huck Bolt	11%
Instalación y remoción de remaches acerados	10%

Tabla 1 Módulos de enseñanza por ocurrencia de falla y defecto
Fuente (Favela, 2019)

La curva de aprendizaje en el proceso de ensamble de aviones esta principalmente relacionado al entendimiento de las herramientas y la interacción con los defectos y sus causas mas que a la habilidad y al talento de la persona como se describe en la figura 4.

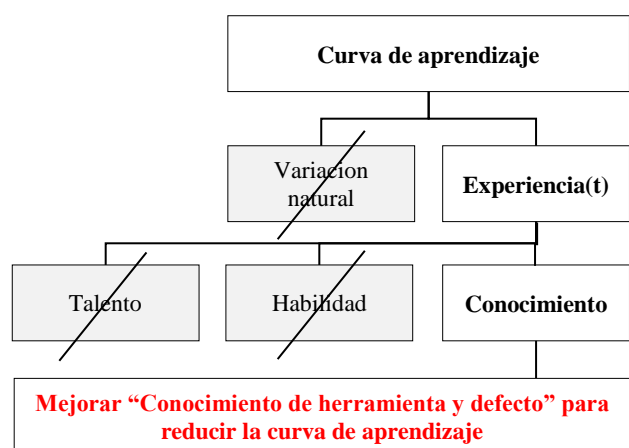


Figura 4 alcance de los módulos de enseñanza (Favela, 2019)

Definición del concepto de realidad virtual

El reto del aprendizaje para este proyecto consiste en acelerar las repeticiones de los 14 módulos de manufactura detectados como críticos para impactar el conocimiento y habilidad del personal. Para buscar la solución óptima se siguió la metodología de TRIZ a través de principios de inventiva y contradicciones; en este caso, se utilizaron como contradicciones los parámetros de velocidad (speed) y pérdida de información (Loss of information) que indican que mientras mayor repetición se gana más conocimiento, las oportunidades consisten en acelerar la velocidad del conocimiento adquirido con menor tiempo de exposición a las repeticiones. Para eso se diagnosticaron las potenciales soluciones que brindan las herramientas de TRIZ concluyendo que existen dos vertientes: 1) copiar el ambiente o 2) utilizar cambios de color o propiedades ópticas.

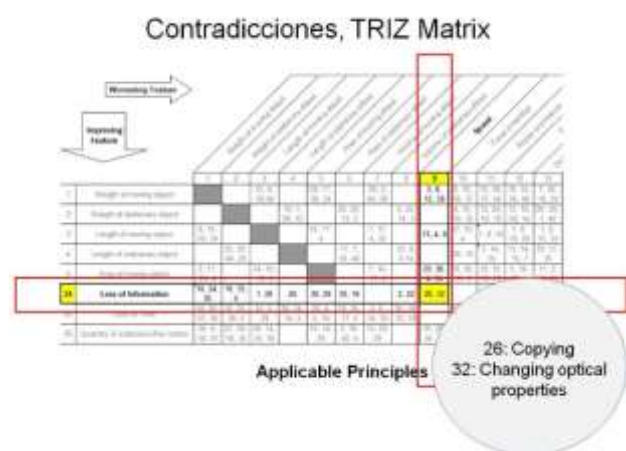


Figura 5 Análisis TRIZ para el aprendizaje (Favela, 2019)

En el caso del principio de “Copying”, TRIZ establece que puede solucionarse con tres diferentes perspectivas:

- En lugar de no disponibles, caros o frágiles objetos utilizar copias simples y baratas
 - Realidad virtual a través de computadoras
 - Escuchar audios en lugar de asistir a seminarios
- Reemplazar un objeto por copias ópticas
- En caso de que se utilicen copias ópticas, mover a infrarrojo o UV

En base a las alternativas, la solución más adecuada consiste en mover el ambiente productivo a un sistema de realidad virtual donde interactivamente se presenten los 14 módulos quedando el diagrama de TRIZ de la siguiente manera:



Figura 6 Diagrama TRIZ resultante (Favela, 2019)

Diseño del sistema de realidad virtual

El concepto consiste en una interface natural con el usuario (Natural User Interface) a través de leap motion, Unity y Oculus Rift que son dispositivos de realidad virtual disponibles en el mercado (Figura 7), estos operan de una manera similar a un videojuego donde didácticamente explican los 14 módulos de entrenamiento claves para el proceso de ensamble.

En este ambiente virtual aparecen todos los componentes en un rack o mesa para que el usuario (operador) tome virtualmente las piezas e interactúe con el software donde se les colocará preguntas y pruebas donde se valide que cumple con los requerimientos para operar en un ambiente productivo.



Figura 7 Sistema de realidad virtual Leap motion y Oculus rift (Leap motion and Oculus rift, 2019)

El sistema de entrenamiento en realidad virtual consiste en tres fases para cada módulo: 1) introducción al tópico 2) evaluación de la teoría y 3) ejercicios interactivos entre movimientos de mano, selección de herramientas, ejecución de tareas en ensambles que permitan demostrar el entendimiento y la habilidad conocida para ejecutar cada actividad. La introducción es conformada por una experiencia audiovisual donde el usuario se ve situado en un gran hangar, una voz comienza a narrar la explicación de cada tema, mientras los objetos relacionados al mismo se muestran frente al aprendiz. Los objetos tienen animaciones y dependiendo de la tarea aparece la descripción y funcionamiento de cada elemento (Figura 8).



Figura 8 Módulo de realidad virtual de taladrado (Favela, 2019)

La evaluación teórica depende de preguntas amigables que se muestran al usuario con posibles respuestas y este debe seleccionar la correcta, al finalizar el proceso se le indica al usuario si aprobó o no la evaluación.



Figura 9 Módulo de selección de herramienta de remachado (Favela, 2019)

El ejercicio interactivo (Figura 9) se refiere a la práctica para demostrar el conocimiento adquirido en la práctica y demostrar el entendimiento mecánico de la ejecución de la tarea y se muestran todas las alternativas en un ambiente simulado de producción con una planta de manufactura y ensambles reales en dimensión y complejidad que le permiten al usuario replicar el conocimiento y aprender junto con la interacción del sistema los errores cometidos en vivo y de esta manera convertir el conocimiento localizado en el ambiente consciente del cerebro en una actividad inconsciente a través de la repetición de ejercicios físicos en el ambiente simulado para finalmente dominar la relación conocimiento-práctica del sistema ayudando al operador a ejecutar la tarea correctamente y entender la parte de campo que es único en este tipo de ambientes de entrenamiento de manufactura para la Industria Aeroespacial.



Figura 10 Módulo de instalación de puertas con taladro 90 a grados (Favela, 2019)

Resultados

Durante un periodo de 6 meses se monitorearon los resultados del personal nuevo en las áreas piloto, como se puede observar en la figura 11, la Calidad del producto se ve impactada directamente y en un periodo de 4 semanas el operador es capaz de reducir en un 82%.

Los defectos que normalmente se cometían antes de la implementación del sistema por la capacitación que reciben durante la exposición virtual y los ejercicios interactivos que replican el ambiente productivo. A través de las mejoras en la Calidad del proceso la eficiencia se ve impactada también por la eliminación de retrabajos críticos que incrementan el tiempo de ciclo de las operaciones de ensamble en el proceso de “sheet metal”. Con un 95% de nivel de confianza, el simulador en realidad virtual más el aula es significativamente 4 veces más eficiente que mantener solamente el sistema tradicional validando la hipótesis principal de la investigación.

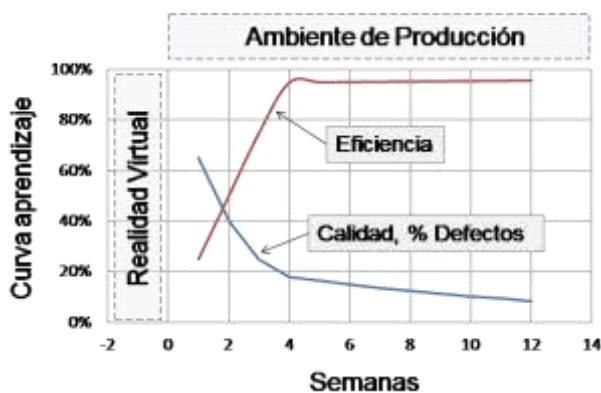


Figura 11 Resultados de implementación de realidad virtual (Favela, 2019)

Como se puede observar en la prueba Z de la figura 12, la realidad virtual es significativamente mejor que el entrenamiento tradicional.

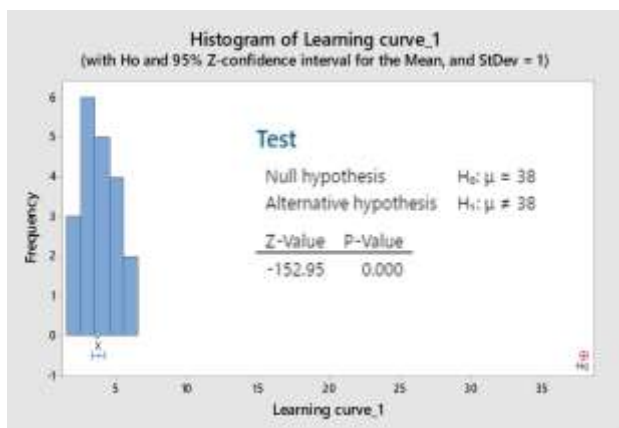


Figura 12 Prueba Z para comparar estadísticamente realidad virtual contra el estado actual (Favela, 2019)

Las líneas de entrenamiento Virtual mostraron que se necesita de 18 horas de exposición a prácticas interactivas para asegurar que el 95% de los operadores aprenden los conceptos y las habilidades básicas para prevenir los defectos y errores de ensamble en el área productiva.

El sistema de entrenamiento se implementó al 100% de capacidad en una empresa aeroespacial (Textron Aviation México) sistemas de Realidad Virtual para satisfacer una demanda de 40 operadores cada 2 meses y poder sostener cualquier crecimiento, entrenamiento y rotación de personal en el futuro.

Se incluyeron en el Sistema de entrenamiento de la Compañía los módulos relacionados a Realidad Virtual que son obligatorios para introducir a cualquier personal a una nueva área de manufactura como se muestra en los temas de entrenamiento de la Figura 13 donde los marcados en azul se refieren a los de Realidad Virtual.

Temas de entrenamiento tradicional			
P - Aplicación de soldador	P - Avelanado	P - Cable de seguridad	P - Duple en placa
P - Electrical Bond	P - Instalación de remaches Cherry	P - Instalación de H.Lok	P - Instalación de Hi-Lok
P - Instalación de Nuplate	P - Instalación de remaches acorados	P - Remachado con Siquera	P - Remoción de Hi-Lok
P - Remoción de remaches en placa 1	P - Remoción de remaches en placa 3	P - Remoción de remaches en placa 5	P - Remoción de remaches en placa 6
P - Remoción de remaches en placa 2	P - Remoción de remaches en placa 4	P - Remoción de remaches en placa 7	P - Taladro de 90 grados
P - Taladro y remachados	P - Torxi bucking	T - Aplicación de soldador	T - Avelanado
T - Cable de seguridad	T - Curso básico de sheet metal	T - Curso básico de taladros y brocas	T - Curso de uso de la escala
T - Duple	T - Electrical Bond	T - Instalación de Nuplate	T - Instalación de remaches acorados
T - Instalación y remoción de Hi-Lok	T - Instalación y remoción de remaches Cherry	T - Rabatabu y prevención de Gap	T - Remoción de remaches
T - Remoción de remaches acorados	T - Taladrado con 90 grados	T - Torxi bucking	T - Uso correcto de Siquera

Figura 13 Módulos de entrenamiento virtual y tradicional (Favela, 2019)

Conclusiones

El sistema de Realidad Virtual es una herramienta crítica para exponencializar el aprendizaje en los ambientes donde se necesiten enseñar tópicos referentes a habilidades e interacciones de múltiples factores.

En el caso de la Industria Aeroespacial brinda la oportunidad de romper el estereotipo clásico de remachado de placas de metal y pruebas pequeñas que no representan la realidad del ambiente productivo además de dejar de depender de lecciones impartidas por un entrenador en un aula, exámenes escritos y simplificar el manejo de bases de datos para monitorear el desempeño del personal con el entrenamiento.

Los 14 módulos después de 2 semanas de exposición al sistema pudieron lograr que en las áreas piloto de manufactura se redujeran los defectos causados por conocimiento y habilidad del proceso de ensamble en un 84% proporcionando 4 veces más velocidad en la ejecución de tareas que la manera tradicional.

Cada prueba reprobada en el ambiente simulado representa ahorros para la compañía de \$124 mil dólares en scrap, \$162 mil dólares en eficiencia y \$388 mil dólares por retrabajo todos ellos recurrentes anualmente por evitar que se convierta en un defecto y desperdicio en el ambiente productivo.

El Sistema Operativo permite rastrear el desempeño de cada operador y anclarlo con la carrera de crecimiento del personal a través del desarrollo de nuevas habilidades y mostrar versatilidades de la gente para la ejecución de nuevas tareas en distintos ensambles sin la necesidad de sistemas en base de papel que son difíciles de conservar.

Estos ambientes interactivos son el futuro de las organizaciones de manufactura ya que reducen la variación del que introduce un entrenador permitiendo además enseñar de una manera estandarizada y didáctica los temas de una mejor manera rompiendo barreras de lenguaje y proporcionando herramientas al facilitador de entrenamiento para tomar decisiones de en qué momento cada persona está lista para moverse a un ambiente productivo.

Este tipo de tecnología se sigue explorando para aplicarse en múltiples áreas, hoy en día está al alcance de cualquier compañía ya que los dispositivos y software están disponibles a bajo costo y el único reto está en la imaginación y el talento de la gente que lo diseña y lo programa.

En el sistema Industrial NUI (Natural User Interface) que se maduró en las Plantas de Manufactura de Textron Aviation tuvo un costo de hardware de 4,500 dólares y \$69 mil dólares de horas de programación en México.

El éxito principal del proyecto está en el entendimiento de la necesidad y observar las relaciones de los problemas desde el enfoque del usuario en el ambiente productivo con un pensamiento estratégico antes de brincar a programar tareas sin un sentido global que indique como se conectaran cada uno de los elementos para proporcionar el conocimiento acelerado al personal operativo.

La realidad Virtual es la solución a nuevos sistemas de aprendizaje que permitirán a múltiples personas desarrollar las habilidades en menor tiempo y con el método adecuado sin depender del entrenador para alcanzar la pericia que según Malcolm Gladwell toma 10,000 horas de repetición en su libro *Outliers: The story of success*.

En relación a la tecnología, la realidad virtual está limitada, es más la mercadotecnia detrás de ella que las funciones que se pueden ejecutar con programación básica. Esta tecnología requiere de personal altamente calificado para la programación e intervención de nuevos objetos que se mueven alrededor de un sistema adaptado a la solución del cliente y es difícil conseguir el talento humano para desempeñarlo en México.

Como analogía, los paquetes de Realidad Virtual que ofrece el mercado como HTC, Samsung, es como comprar un videojuego en el cual se debe conseguir un programador especializado que lo decodifique, después modifique los personajes y finalmente rescriba la historia ya que solo provee un ambiente para empezar a utilizarse y en la mayoría de los casos, se falla en adaptar soluciones. En nuestro caso, conseguir al programador fue un reto decenas de entrevistas, reuniones con escuelas en distintas partes de país y tomó 9 meses contratar a la persona correcta. Para los futuros desarrolladores de proyectos en función de Realidad Virtual, es imperativo constatar las habilidades del programador para que la solución se pueda llevar a cabo y no esperar que la compra del software es la parte clave del proyecto.

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores por su guía, reflexión y enseñanzas, a Textron Aviation México por abrirme las puertas y proporcionarme los recursos para ejecutar este proyecto de Innovación clave para su Negocio y especialmente a Hector Heras (VP operaciones de Textron Aviation México) por su continua enseñanza, liderazgo, ejemplo de vida y asesoría.

Referencias

- Arencibia, M. G., & Cardero, D. M. (2020). DEEP LEARNING: SU IMPACTO ECONÓMICO.
- Cardillo, J., & Chacón, E. (2020). Necesidad de formación en I4. 0 y los sistemas ciber-físicos, caso latinoamerica:¿ Qué se debe saber?.
- Drucker, Peter, (1993), The Rise of the Knowledge Society. New York: Butterworth-Heinemann
- E. Gobbetti, R. Scateni (1996), Virtual Reality: Past, Present and Future, Cagliari Italy
- Estadísticas asociaciones Index (2019). Estadísticas IMMEX. Consejo Nacional de la Industria y Manufacturera de exportación.
- F. P. Brooks (1999), What's real about virtual reality?, University of North Carolina at Chapel Hill
- Goldman Sachs (2016), Virtual & augmented reality, The Goldman Sachs Group, Inc.
- Guzman Arredondo, A., Cenicerros Cázares, D., (2015), Ejercicios y Rúbricas para la Investigación educativa, Idea Editorial, 1a Edición, Mexico 2015
- I. H. Witten, E. Frank (2005), Data mining Practical Machine Learning Tools and Techniques, Second edition, Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Inc, ISBN: 0-12-088407-0
- J. Bechtold, C. Lauenstein y otros (2014), Industry 4.0 – The Capgemini Consulting View, Capgemini Consulting, https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/capgemini-consulting-industrie-4.0_0.pdf
- R. Page (1994), Brief History of Flight Simulation, QANTAS SIMULATION SERVICES
- Rodríguez Lozano, H. M. (2020). Análisis de un material compuesto con uso de nanotubos de carbono para aplicación en estructuras espaciales.
- Sánchez, J. A., Andrada, P., Blanqué, B., & Torrent, M. (2020). Predictive Maintenance Plan for Switched Reluctance Motor Drives. IEEE Latin America Transactions, 18(01), 67-74.
- T. Munh Heng (2010), Learning Curves & Productivity in Singapore Manufacturing Industries, National University of Singapore, Developed in ASIA (ANDA), Phnom Penh
- T. P. Wright, "Factors Affecting the Cost of Airplanes," Journal of the Aeronautical Sciences (February 1936).
- Tolosa Alarcon, D. (2020). Sistema automático de control de instrumentos por GPIB para la calibración de multimetros digitales de 6 1/2 dígitos (Doctoral dissertation).

Estabilidad y diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga

Stability and design of a LQR controller for a Ball-Beam system

TELLEZ-CUEVAS, Pedro†*, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y CRUZ-LUNA, Manuel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango.

ID 1^{er} Autor: *Pedro, Tellez-Cuevas* / ORC ID: 0000-0002-3235-1898, Researcher ID Thomson: G-2875-2019, CVU CONACYT ID: 342839.

ID 1^{er} Coautor: *Aldo, Hernández-Luna* / ORC ID: 0000-0002-7717-5314, Researcher ID Thomson: I-1165-2018, CVU CONACYT ID: 441305.

ID 2^{do} Coautor: *Manuel, Cruz-Luna* / ORC ID: 0000-0002-0640-8926, Researcher ID Thomson: H-8709-2018, CVU CONACYT ID: 368159

DOI: 10.35429/JID.2020.10.4.23.29

Recibido 23 de Marzo, 2020; Aceptado 12 de Junio, 2020

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga, así como su análisis de estabilidad, el control de un sistema Bola-Viga es uno de los más interesantes para la ingeniería de control ya que es un sistema dinámico altamente no lineal. Los objetivos de este documento se centran en el rendimiento del sistema usando un control LQR para diferentes perturbaciones así mismo obtener los planos de fase. El trabajo parte con el modelado del sistema de bola-viga, el cual consiste de dos brazos mecánicos, una caja de engranes y un servomotor de CD, posteriormente se diseña el control LQR, esto permite realizar la simulación y la obtención de la respuesta del controlador bajo diferentes condiciones. En el sistema el par de entrada se genera desde el servomotor de CD para controlar la posición de la bola en la viga, donde la bola rueda libremente sobre la viga. El análisis del rendimiento se lleva a cabo utilizando LQR robusto y se presentan las características de rendimiento del sistema. Finalmente, el análisis de estabilidad se lleva a cabo trazando los planos de fase.

Sistema de bola-viga, Espacio de estados, Análisis de estabilidad

Abstract

This article presents the design of an LQR controller for a Ball-Beam system, as well as its stability analysis, the control of a Ball-Beam system is one of the most interesting for control engineering since it is a highly non-dynamic system linear. The objectives of this document focus on the performance of the system using an LQR control for different disturbances as well as obtaining the phase plans. The work starts with the modeling of the ball-girder system, which consists of two mechanical arms, a gear box and a DC servomotor, later the LQR control is designed, this allows simulation and obtaining the response of the controller under different conditions. In the system the input torque is generated from the DC servo motor to control the position of the ball on the beam, where the ball rolls freely on the beam. Performance analysis is performed using robust LQR and the performance characteristics of the system are presented. Finally, the stability analysis is carried out by plotting the phase planes.

Ball and beam system, State space, Stability analysis

Citación: TELLEZ-CUEVAS, Pedro, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y CRUZ-LUNA, Manuel. Estabilidad y diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga. Revista del Diseño Innovativo. 2020, 4-10: 23-29

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: ingelecptc@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La dinámica de un sistema está condicionado por acciones, ya sea de un modo deseado a través de la manipulación de variables o por perturbaciones que son aquellas variables no manipuladas. El desafío actual es el modelado y control, interrelacionados, de sistemas modernos y complejos, tales como el control de tráfico, procesos químicos y sistemas robóticos [1]. El control de un sistema Bola-Viga es uno de los más interesantes para la ingeniería de control ya que es un sistema dinámico altamente no lineal, el cual consiste en una viga que rota en donde una bola se mueve libremente cambiando de posición mientras rueda en la viga. Este sistema se puede aplicar en problemas de estabilidad para varios sistemas, como la estabilidad horizontal de un avión durante el aterrizaje y el flujo de aire turbulento, y el problema de equilibrio de los robots.

Una propiedad interesante del sistema de bola-viga que motivó la investigación es que, es un sistema inestable. Se han realizado muchos estudios sobre el sistema de bola-viga. Hirsch [2] construyó el sistema bola-viga, uso un sensor ultrasónico para medir la posición de la bola. El ángulo de la viga lo midió a través de un potenciómetro. El motor con caja de cambios se accionó con un circuito de amplificador operacional de alta potencia. Yu [3] usa un controlador PD para controlar el modelo no lineal del sistema bola-viga. El controlador aplicado es una síntesis de tipo PD que muestra la respuesta con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 150 ms. Sin embargo, existen algunos errores de estado estable.

Los objetivos de este documento se centran en el rendimiento del sistema usando un control LQR para diferentes perturbaciones así mismo obtener los planos de fase. La organización de este documento es la siguiente: de inicio se realiza el modelado del sistema de bola-viga, posteriormente se diseña el control LQR, esto permite la configuración experimental y la obtención de resultados.

Modelado del sistema de bola y viga

El modelado es el primer paso en el diseño de un lazo de control. Cuanto mayor es el conocimiento del proceso, mejores son los resultados que obtendremos, ya que el diseño del control será basado en el modelo.

La configuración mecánica del sistema bola-viga se muestra en la figura 1 [4], consiste de dos brazos mecánicos, una caja de engranes y un servomotor de CD. La bola se coloca en la viga, donde rueda libremente a lo largo de su plano horizontal. El brazo de palanca está unido a la viga en un extremo y el servo engranaje en el otro.

Aplicando la ley de Kirchhoff de voltajes al motor de CD se obtiene

$$V_{in} = I_m R_m + K_b \dot{\theta} + L_m \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Donde $\dot{\theta}$ es la velocidad angular, V_{in} es el voltaje de entrada, I_m , R_m y L_m son la corriente, la resistencia y la inductancia de armadura respectivamente y K_b la constante de la fuerza electromotriz. Si la inductancia de armadura tiene un valor muy pequeño la ecuación (1) se reduce a:

$$V_{in} = I_m R_m + K_b \dot{\theta} \quad (2)$$

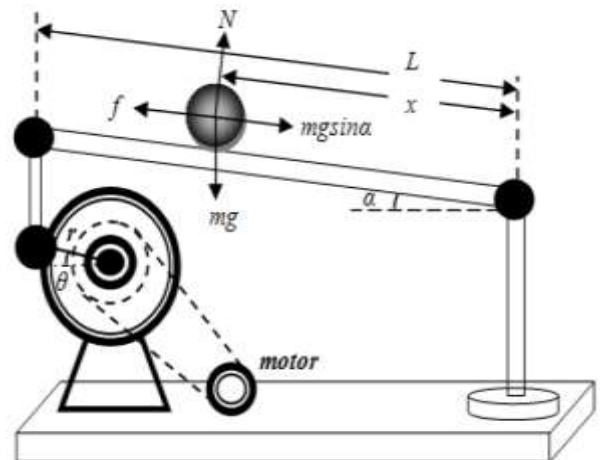


Figura 1 Sistema bola viga

El par que actúa sobre la viga es:

$$\tau_m = \frac{1}{K_g} (J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta}) \quad (3)$$

El coeficiente de fricción viscosa es B_m , el par rotacional es τ_m , K_g es la relación entre la caja de engranes del motor y el servo, J_m es la inercia. En base a las ecuaciones anteriores el modelo del motor queda descrito como

$$V_{in} = \frac{R_m J_m}{K_m K_g} \ddot{\theta} + \left(K_b + \frac{R_m B_m}{K_m K_g} \right) \dot{\theta} \quad (4)$$

Para obtener el modelo matemático del sistema bola viga utilizamos las ecuaciones de Euler-Lagrange, considerando que el sistema no tiene perturbaciones y no hay fricción quedando

$$H = T - P \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{2} \left[(J_1 + mr^2) \dot{\alpha}^2 + \frac{7}{5} m \dot{r}^2 \right] - \left(mgr + \frac{L}{2} Mg \right) \sin \alpha \quad (6)$$

El lagrangiano H resume la dinámica del sistema. Puesto que no hay fuerza externa sobre la bola, las ecuaciones de movimiento de Lagrange se dan en las ecuaciones (7) y (8)

$$(J_1 + mr^2) \ddot{\alpha} + 2mr\dot{r}\dot{\alpha} + \left(mgr + \frac{L}{2} Mg \right) \cos \alpha = \tau \quad (7)$$

$$\frac{7}{5} \ddot{r} - r\dot{\alpha}^2 + g \sin \alpha = 0 \quad (8)$$

Considerando que sin fricción el ángulo de la viga conduce a que $g \sin \alpha \approx g\alpha$, entonces al linealizarse estas ecuaciones se puede estimar cuando sistema se aproxima a un punto de equilibrio. En este punto $\dot{\alpha} \approx 0$ entonces $-r\dot{\alpha}^2 \approx 0$ y las ecuaciones (7) y (8) quedan

$$(mr^2 + K_1) \ddot{\alpha} + (2mr\dot{r} + K_2) \dot{\alpha} + \left(mgr + \frac{L}{2} Mg \right) \cos \alpha = \tau \quad (9)$$

$$K_4 \ddot{r} - r\dot{\alpha}^2 + g\alpha = 0 \quad (10)$$

Donde

$$K_1 = \frac{R_m J_m L}{K_m K_g d} + J_1$$

$$K_2 = \frac{L}{d} \left(\frac{K_m K_b}{R_m} + K_b + \frac{R_m B_m}{K_m K_g} \right)$$

$$K_3 = 1 + \frac{K_m}{R_m}$$

$$K_4 = \frac{7}{5}$$

La representación en el espacio de estados [5]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{K_4} x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \frac{1}{m x_1^2 + K_1} \left[K_3 V_{in} - \right. \\ &\left. (2 m x_1 x_2 - K_2) x_4 - \left(mg x_1 + \right. \right. \\ &\left. \left. \frac{L}{2} Mg \right) \cos x_3 \right] \end{aligned}$$

La variable $x_1 = r$ (m) es la posición de la bola en la viga, $x_2 = \dot{r}$ (m/s) representa la velocidad de la bola, $x_3 = \alpha$ (rad) indica la posición angular de la viga y $x_4 = \dot{\alpha}$ (rad/s) es la velocidad de la viga.

El modelo representado por las ecuaciones diferenciales de estado es no lineal como la mayoría de los sistemas físicos. Este modelo se puede aproximar a su versión lineal bajo ciertas condiciones en determinados puntos de equilibrio. La linealización se realiza alrededor de un punto o trayectoria de operación, definido por valores nominales.

$$\text{El punto } x_{eq} = f(x_{eq}, 0) = 0$$

$$\begin{aligned} 0 &= x_2 \\ 0 &= -\frac{g}{K_4} x_3 \\ 0 &= x_4 \\ 0 &= \frac{1}{m x_1^2 + K_1} \left[K_3 V_{in} - (2 m x_1 x_2 - K_2) x_4 - \right. \\ &\left. \left(mg x_1 + \frac{L}{2} Mg \right) \cos x_3 \right] \end{aligned}$$

Despejando, obtenemos que el punto de equilibrio resulta

$$x_{eq} = \left[-\frac{L M}{2 m} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]$$

Tomando el punto de equilibrio se linealiza el sistema alrededor de dicho punto derivando las ecuaciones de estado para obtener las matrices A y B por lo que se obtiene a partir de:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_{eq}} \quad \text{y} \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_{eq}} \quad (12)$$

Para este trabajo se consideran los siguientes datos del sistema $L=0.7$ m; $M=18.848 \times 10^{-3}$ Kg; $m=0.5$ Kg; $g=9.81$ m/s²; $J_1=7.35 \times 10^{-4}$ Kg.m²; $d=0.075$ m; $B_m=0.4 \times 10^{-6}$ N.m.s; $K_b=0.022$ V/rad/s; $K_m=0.022$ N m/A; $R_m=9.4$ Ω; $\tau=0.0163$ N.m; $J_m=8.5 \times 10^{-7}$ Kg.m²; $I_m=0.76$ A;

Ya con los datos se sustituyen en (11) y (12) quedando

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7.0014 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1140.9 & 0 & 0 & -48.25 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 233.148 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Diseño del controlador LQR.

El control LQR es un controlador que proporciona el mejor rendimiento posible, ofrece una ley de control simple, muy robusto tanto en tiempo continuo o en tiempo discreto. Para el control óptimo, las especificaciones de control son formuladas en una función de costo. La función de costo (también conocida como figura de mérito, índice de desempeño, etc.), es una función que penaliza el "mal" comportamiento del sistema, es decir cuánto más lejos este el sistema de la situación deseada, mayor será el valor de la función de costo. Entonces, el objetivo del controlador óptimo, será minimizar esta función.

El control LQR se plantea como la necesidad de calcular la mejor entrada $u(t)$, que permita llevar el sistema de un estado inicial $x(t_0)$, a un estado final $x(t_f)$ en un tiempo $t_f - t_0$. Para calcular la ganancia de realimentación K es siguiendo el criterio de optimización minimizando el funcional cuadrático

$$J = \int_0^{t_\infty} [x^T(t) + Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (15)$$

Donde Q y R son matrices positivas definidas, generalmente diagonales o cuando menos simétricas, que determinan la importancia de cada parámetro dentro de la función de costo, que ponderan las variables de estado y la actuación respectivamente, la matriz Q la importancia de los estados durante la transición y R la importancia de la entrada.

La formulación del problema utilizando una matriz R distinta de cero, tiene particular importancia en la práctica ya que esta matriz nos limitará el valor de la entrada u , aplicada al sistema.

Como el criterio se basa en funcionales cuadráticos, recibe el nombre de regulador lineal cuadrático (LQR). El funcional J puede interpretarse como el costo total de la transición de las variables de estado de un punto a otro.

Con las siguientes restricciones

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (16)$$

$$u(t) = -Kx(t) \quad (17)$$

No hay reglas que puedan emplearse de forma general para la selección de las matrices Q y R . Una regla simple consiste en escoger Q y R diagonales, asignando valores grandes a aquellas variables que se desee minimizar.

En cualquier caso, los valores de Q y R deben ser siempre positivos o cero. El conocimiento que se posea del sistema resulta fundamental en la selección de estas matrices. Aun así, es conveniente calcular diferentes controladores, en base a distintos valores para las matrices Q y R , y verificar su efectividad mediante la simulación. Una ventaja importante del control LQR es que, sea cual sea la elección de las matrices Q y R , se preserva la estabilidad asintótica y la robustez del controlador.

Considerando lo anterior, se definen las matrices Q y R , con ellas se determina la importancia relativa del error y el gasto de energía de la señal de control por tanto:

$$Q = \begin{bmatrix} 50000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$R = [0] \quad (20)$$

Simulación y resultados

La simulación del sistema bola-viga con controlador se desarrolla sobre el software MATLAB/SIMULINK. El obtener la matriz K , analíticamente no es tarea fácil, MATLAB cuenta con la función $K=lqr(A,B,Q,R)$. Para ello es necesario ajustar Q y R hasta obtener el desempeño deseado.

La matriz A y B se toman de (13) y (14) y la matriz Q y R de (18) y (20) respectivamente con lo que se obtuvo:

$$K = [-228.553 \quad -239.47 \quad 114.978 \quad 2.248] \quad (21)$$

La Figura 2 muestra el diagrama de control del sistema bola-viga en SIMULINK con el controlador LQR.

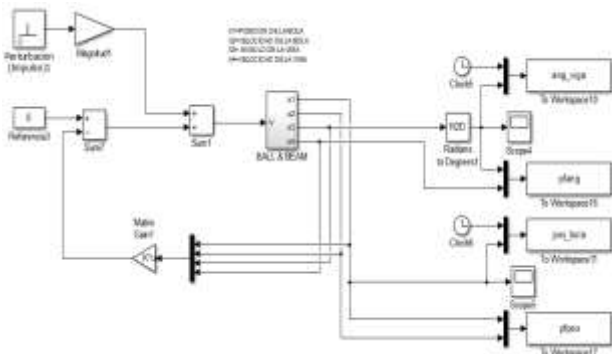


Figura 2 Sistema de control LQR en SIMULINK

Los resultados de la simulación para el control de seguimiento se ilustran en la Gráfico 1 para el caso de una perturbación impulso cuya magnitud es de 5N con una referencia 0°. La respuesta que se grafica corresponde a la posición angular de la viga con respecto a la horizontal, se observa que tiene dos sobreelongaciones una de ±1.7° y un tiempo de asentamiento de 3s.

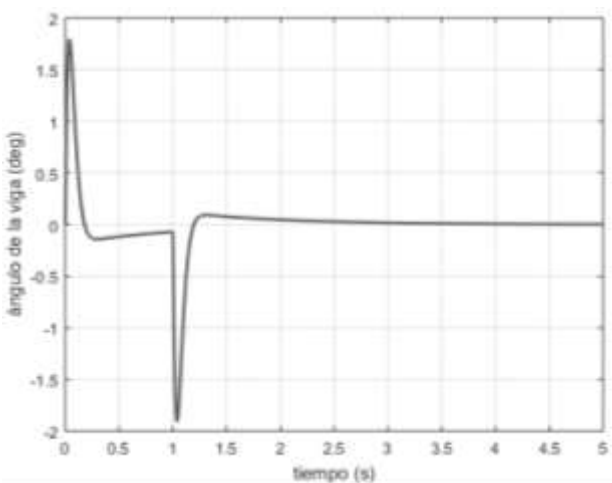


Gráfico 1 Respuesta del sistema con una perturbación de 5 N.

Los Gráficos 2 y 3 muestran el comportamiento del sistema con unas perturbaciones de 25 N y 50 N respectivamente en donde se observa que la salida sigue con éxito la trayectoria de referencia, proporcionan un buen rendimiento ambas con un tiempo de asentamiento para el caso de ambas figuras de 3s.

Pero en el caso de la respuesta del Gráfico 1 se tienen sobreelongaciones de 8°, -12° y dos pequeños picos de ±1°. La respuesta de la Gráfico 2 muestra que alcanza unas sobreelongaciones de 15°, 12°, 4°, 1°, -20°, -6° - 0.5°, hasta que alcanza el valor de referencia.

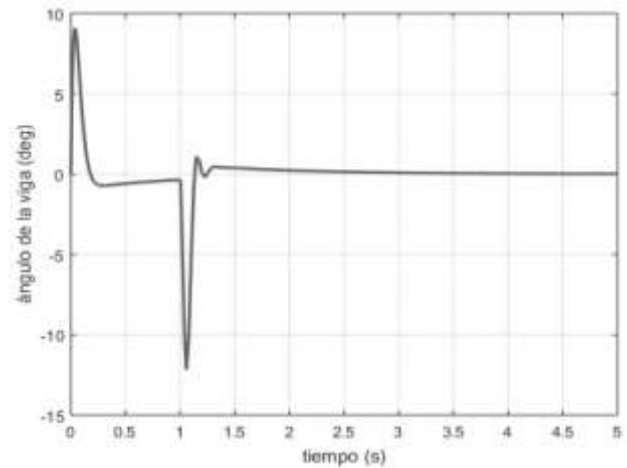


Gráfico 2 Respuesta del sistema con una perturbación de 25 N.

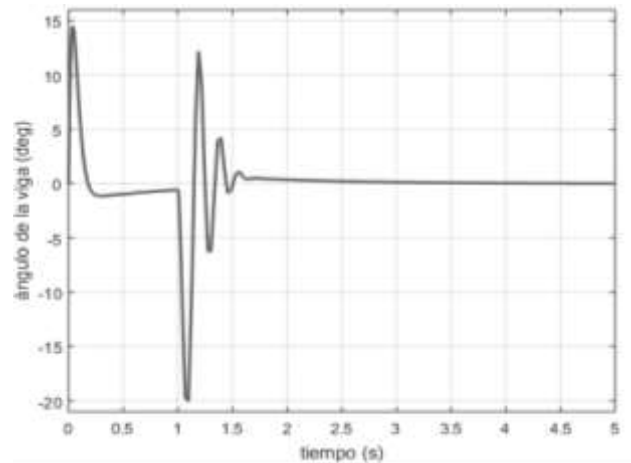


Gráfico 3. Respuesta del sistema con una perturbación de 50 N.

La estabilidad es una característica importante a considerar en el desarrollo y análisis de un controlador, cuando el sistema es lineal se dispone de algunos criterios, entre los cuales está el criterio de estabilidad de Routh o el Nyquist, sin embargo cuando el sistema es no lineal estos criterios no son aplicables [6].

Para verificar la estabilidad del sistema por medio del análisis gráfico con el plano de fase en el que se grafica la posición angular (eje x) contra la velocidad angular (eje y) de la respuesta del sistema.

El Gráfico 4, muestra la trayectoria en el plano de fase del sistema, en ella se observa que la trayectoria parte desde un punto establecido por las condiciones iniciales, que en este caso son cero, y después de cierto tiempo llega al punto esperado ya que se ha perturbado con un impulso de 5N.

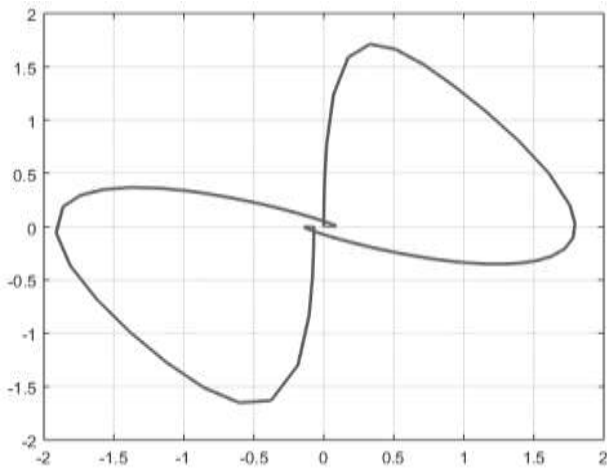


Gráfico 4 Plano de fase del sistema para una perturbación de 5N

En el Gráfico 5 se observa que la trayectoria es muy parecida a las del Gráfico 4, solo con pequeñas variaciones en su trayectoria.

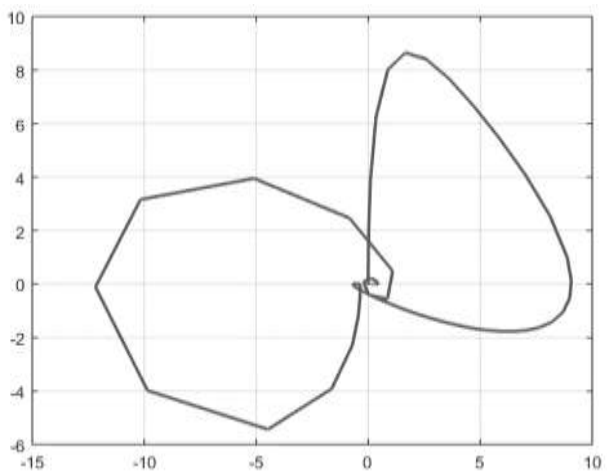


Gráfico 5 Plano de fase del sistema para una perturbación de 25N

El Gráfico 6 describe una trayectoria más irregular debido a las sobreelongaciones, que se observan en el Grafico 3, pero alcanza el punto deseado, en ambas trayectorias para las diferentes perturbaciones las respuestas convergen al mismo valor de referencia.

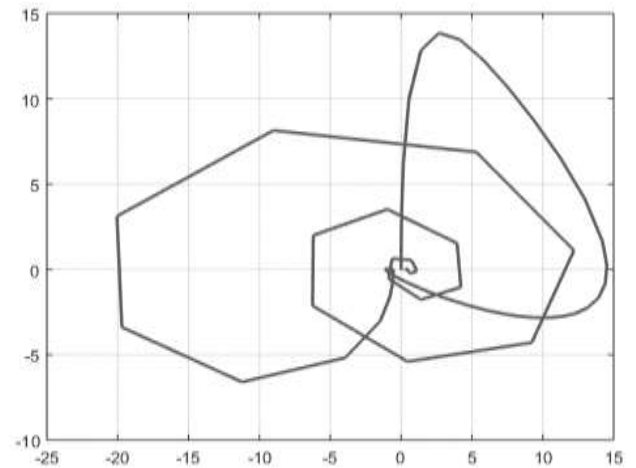


Gráfico 6 Plano de fase del sistema para una perturbación de 50N

Agradecimiento

Los autores desean expresar su agradecimiento a las carreras de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Informática del Instituto Tecnológico Superior de Huachinango por el apoyo y las facilidades para el desarrollo de este trabajo.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolla un controlador LQR para un sistema bola viga, el cual es representado por un modelo no lineal. Se obtiene el comportamiento dinámico del sistema con una referencia de 0 y diferentes perturbaciones impulsos, la respuesta obtenida muestra que el sistema responde rápido con pequeñas sobreelongaciones para perturbaciones magnitudes pequeñas y en caso de magnitudes grandes tiene picos mayores con respecto con los de menor magnitud pero en ambos caso alcanza el valor deseado.

Para la estabilidad por medio de plano de fase, las trayectorias de la respuesta del sistema no lineal con el controlador LQR, las respuestas convergen al mismo valor de referencia. Finalmente, este estudio proporciona un rendimiento dinámico con precisión de la posición angular de la viga.

Referencias

- [1] Dorf, Richard C.y Bishop Robert H., Sistemas de Control Moderno, 10. Ed., Prentice-Hall, 2007.
- [2] Hirsch, R. (1999). Mechatronic instructional systems ball on beam system. Shandor Motion Systems.

- [3] Yu, W.; and Ortiz, F. (2005). Stability analysis of PD regulation for ball and beam system. IEEE Conference on Control Application, 517-522.
- [4] B. M. Hung, S. S. You, H. S. Kim, T. W. Lim. "Embedded controller building for ball and beam system using optimal control synthesis", Journal of Engineering Science and Technology Vol. 12, No. 6 (2017) 1460 – 1474.
- [5] Keshmiri, M.; Jahromi, A.F.; Mohebbi, A.; Amoozgar, M.H.; and Xie, F.W. (2012). Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 5(1), 14-35.
- [6] Leonid Reznik, "Fuzzy Controllers", Newnes, Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1er Ed., ISBN 0 7506 3429 4., 1997.

Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado

Design of a controller for refrigeration systems applying a simplified thermal comfort index

ALEJO-CHAN, Francisco Javier†*, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain

Universidad Autónoma del Carmen. Facultad de Ingeniería y Tecnología

ID 1^{er} Autor: *Francisco Javier, Alejo-Chan* / ORC ID: 0000-0003-0117-4005, Researcher ID Thomson: AAO-9227-2020, CVU CONACYT ID: 919878

ID 1^{er} Coautor: *Sósimo Emmanuel, Díaz-Méndez* / ORC ID: 0000-0003-1087-4193, Researcher ID Thomson: H-4671-2019

ID 2^{do} Coautor: *Hussain, Alazki* / ORC ID: 0000-0002-1960-3624, Researcher ID Thomson: M-1706-2017

DOI: 10.35429/JID.2020.10.4.30.40

Recibido 23 de Marzo, 2020; Aceptado 12 de Junio, 2020

Resumen

En este trabajo el objetivo es estudiar un índice de confort térmico simplificado y aplicar a un modelo de un edificio con sistema de refrigeración con la finalidad de comprobar si este índice de confort simplificado funciona como un sustituto al índice estandarizado que se encuentra indicado en normas internacionales y conlleve a la disminución en el uso de seis variables de entrada a solo dos lo que presentaría una reducción en la cantidad de instrumentos de medición a utilizar en aplicaciones reales. Esta aplicación presenta un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) para calcular la temperatura que satisfaga las condiciones para que dentro del edificio se mantenga un ambiente confortable siguiendo las escalas de los índices de confort. Se requiere realizar comparaciones de temperaturas, escalas de confort térmico y porcentaje de personas insatisfechas en ambos modelos para así obtener una validación. La programación de los modelos matemáticos del edificio como de los índices de confort térmicos simplificado y estándar se planea demostrar en base a diagramas de bloques mediante el software Matlab® en su plataforma de Simulink.

Confort térmico, Control PID, PMV

Abstract

This work, the objective is to study a simplified thermal comfort index and apply it to a model of a building with a cooling system in order to check if this simplified comfort index works as a substitute for the standardized index that is indicated in international standards and lead to the decrease in the use of six input variables to only two, which would present a reduction in the number of measuring instruments to be used in real applications. This application presents a Derivative Integral Proportional Controller (PID) to calculate the temperature that satisfies the conditions so that inside the building a comfortable environment is maintained following the scales of the comfort indices. Comparisons of temperatures, thermal comfort scales and percentage of dissatisfied people in both models are required to obtain a validation. The programming of the building's mathematical models as of the simplified and standard thermal comfort indices is planned to demonstrate based on block diagrams using the software Matlab® on its Simulink platform.

Thermal Comfort, PID Control, PMV

Citación: ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain. Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado. Revista del Diseño Innovativo. 2020, 4.10: 30.40

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: 090024@mail.unacar.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El estudio del confort térmico es una tarea compleja debido en como los humanos perciben su ambiente y manejan sus condiciones, incluyendo tanto aspectos psicológicos o fisiológicos, pasando por características del ambiente. Existen investigaciones (Kolic, Line, & Akbar Berry, 2017) sobre como las emociones de las personas podrían ser afectadas por el entorno térmico en que se encuentran, pero también influyen otras sensaciones al igual de preferencias de cada individuo.

Ahora bien, el confort térmico no es la única sensación que debe tenerse en cuenta, también influye el confort visual, confort acústico y la calidad del aire para obtener una adecuada calidad en la vida de las personas (2014). El ruido está considerado como uno de los mayores contaminantes del mundo, lo que afecta gradualmente a la salud física y mental de las personas. Además, el ruido está posiblemente relacionado con influir en la sensación térmica y percepción de temperaturas (Pellerin, 2004), aunque no todos los estudios están de acuerdo. En lo que respecta al confort visual, la mala distribución o exceso de iluminación en interiores son parte del problema que con lleva insatisfacción, además al ser generadores de calor, esta influye en las sensaciones térmicas de los ocupantes, así como fatiga visual provocados por estancias prolongados.

El estrés por calor térmico es la causa de muchos trastornos ocupacionales que interrumpen el desempeño del trabajador y la calidad del trabajo e incluso proporcionando la muerte (Zare, Bodin, Cercier, Brunet, & Roquelaure, 2015). El confort térmico tiene un factor de gran importancia en la construcción de edificios con el objetivo de crear ambientes cómodos y agradables que ayude en la salud de los ocupantes. Para ello con el invento de del aire acondicionado se hizo posible la regulación de la temperatura en los interiores y con independencia de las condiciones externas.

Actualmente los sistemas de aires acondicionados son importantes para la satisfacción y comodidad de las personas dentro de edificios, esto debido a que las personas se pasan entre un 80% a 90% su tiempo en estos lugares (U.S Department of Labor, 2012–13)

Pero provocando que el consumo energético total de un edificio sea un 30 a 40 % del consumo total de los edificios (Energy, 2017). Lo ha llevado que la principal preocupación sea el reducir el consumo de energía sin la necesidad de dejar de usar sistemas de aires acondicionados.

Por otro lado, en años recientes se ha tomado seriedad sobre los efectos de comodidad y salud de las personas que son provocados a raíz del ambiente interior en diferentes campos de aplicación.

Para ello, en los estándares internacionales ASHRAE-55 (ASHRAE, 2013) e ISO 7730 (ISO, 2005) se proporcionan especificaciones para lograr un ambiente de conformidad en interiores de edificio donde además especifica un modelo para calcular el estado de confort térmico denominado como índice PMV (Voto Medio Predicho).

La norma ASHRAE-55 específica con precisión, las combinaciones de los factores humanos o personales y de las condiciones térmico-ambientales más adecuadas con la tarea de satisfacer el sentir de los ocupantes de un lugar cerrado. Mientras que la norma ISO 7730 proporciona métodos para predecir la sensación de confort térmica y el grado de insatisfacción de las personas presente en ambientes térmicos tolerantes. Permite determinar analíticamente e interpretar el confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas), dando las condiciones ambientales consideradas aceptables para el confort térmico general, así como aquellas que representan molestias locales.

El modelo PMV-PPD fue desarrollado por P.O. Fanger en 1972 (P.O., 1972).

En el modelo de Fanger (P.O., 1972), el índice PMV es calculado a partir de seis variables: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire, humedad del aire, actividad personal y aislamiento de la ropa. En el cual se muestra en una escala de siete niveles. Actualmente el modelo PMV-PPD se usa como el principal modelo de confort térmico en los estándares ASHRAE-55 e ISO 7730.

Desde entonces se han desarrollado diversos estudios y métodos para estandarizar e incluso mejorar el confort térmico en interiores dando a su vez una mejor respuesta a las exigencias de las personas resultando en una mejora en la calidad de vida.

Aires acondicionados convencionales con sistema de control.

En la actualidad la mayoría de los edificios utilizan un único sistema de aires acondicionados convencionales, generalmente son controlador mediante controladores ON/OFF donde su principal problema es no tomar en cuenta el ahorro de energía, así como inconvenientes debido al accionamiento continuo de sus actuadores como el compresor y ventiladores, además de presentar pobre regulación a cambios de temperaturas (Federspiel & Asada, 1992). A medida del avance en los sistemas de aires acondicionados, se han implementado mejores controladores que cumpliera con temperaturas constantes en menor tiempo y de manera estable.

El controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) es el más implementado en los sistemas de climatización; 97% de los controladores en aplicaciones industriales utilizan la metodología PID de los cuales basan su funcionamiento en la regulación de la velocidad del ventilador del aire acondicionado y la velocidad del flujo del vapor de agua (Mohammed, Mohammed, & Jabbar, 2018). Posteriormente se han aplicado técnicas de control inteligentes y robustas en los sistemas de aires acondicionados convencionales.

Aires acondicionados convencionales con sistema de control y aplicación de índices de confort térmico (PMV-PPD).

Los índices de confort térmico como el PMV en el control de los sistemas de aires acondicionados son de gran estudio para el trato del confort en los ocupantes de edificios. Por ejemplo, Hamdi (1998) propuso una estrategia de control de un Sistema HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado) implementando lógica difusa, aplicando el índice PMV de seis variables para obtener un ambiente de confort térmico interior constante y utilizando simulaciones numéricas.

Bermejo (2012), propone un nuevo sistema capaz de adaptarse a las preferencias térmicas del usuario y medir su nivel de comodidad al agregar parámetros térmicos en el índice térmico PMV en un conjunto con reglas difusas. Castilla (2014), presenta una arquitectura de control predictivo no lineal multivariable que permite de forma simultánea mantener el confort térmico y la calidad de aire mediante el uso de técnicas de ventilación natural y forzada. Se presenta en (Vázquez, 2018) una herramienta educativa interactiva diseñada para el aprendizaje de conceptos de confort térmico.

La herramienta desarrollada permite la definición del modelo térmico de una casa. En base a este modelo, el confort térmico se estima mediante PMV-PPD. También aborda una estrategia de control simple que se puede aplicar a los sistemas convencionales de HVAC. La herramienta está disponible para estudiantes de grado en ingeniería de control. Valladares (2019), propone un algoritmo de inteligencia artificial entrenado con 10 años de experiencias pasadas para mantenga el confort térmico y la calidad del aire dentro de los niveles óptimos mientras consume la menor cantidad de energía de las unidades de aire acondicionado y ventiladores.

Aires acondicionados convencionales con aplicación de índices de confort térmico simplificado (PMV-PPD).

Se analizan las principales variables de PMV y se simplifican los parámetros para implementar el modelo sin incurrir en costos adicionales o instalar equipos como sensores. Además, se compara el control simplificado de PMV con un control basado en la temperatura ambiente. El control simplificado de PMV proporciona un 7.0% más de confort térmico y un 5.6% más de reducción de energía que los logrados por el control de temperatura ambiente (Hana, Lee, JonghunKim, Jang, & Jeong, 2014).

Una metodología aplicada (Morgado, MárioTalaia, & LeonorTeixeira, 2017), utiliza una escala de color con el índice EsConTer demostró ser un método interesante para estudiar fácilmente los entornos térmicos y predecir el confort térmico de un espacio interior por la cual propone ser un nuevo modelo simplificado para la evaluación del riesgo de estrés térmico.

Con el objetivo de minimizar las investigaciones que requieran mucho tiempo para identificar problemas de confort térmico en los lugares de trabajo.

A pesar de estas investigaciones desarrollados, la mayoría en ambientes experimentales, hoy en día se tiene el problema de que comercialmente los sistemas de aires acondicionados no cuentan con una función que base su funcionamiento en conformidad térmica, esto debido a que los métodos existentes como el índice PMV complica su implementación al utilizar instrumentos muy sofisticados para medición de seis variables interiores y por ende resulta muy costoso para colocar en el mercado.

Esto nos lleva a buscar una alternativa para la implementación de dicha función que proporcione los mismos resultados que el índice PMV estandarizado, pero reduciendo recursos. Un modelo simplificado de confort térmico sería una buena opción debido a su simplicidad en el manejo de variables reduciendo a solamente dos y ayudado con una técnica de control, disminuiría considerablemente el número de instrumentos a utilizar y con ello un costo menor.

Modelo matemático de un edificio con sistema de refrigeración

Se utiliza como modelo del sistema una habitación que incorpora una etapa de refrigeración donde se suministra aire para enfriar el interior de la habitación.

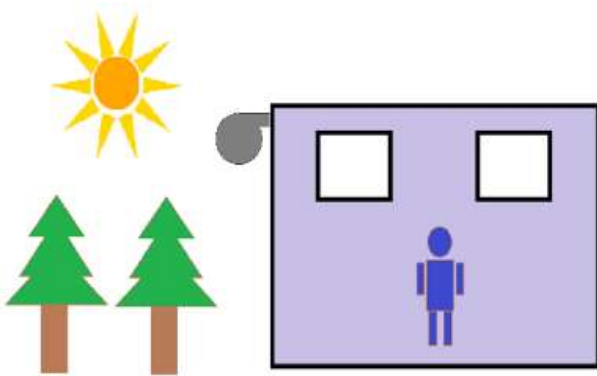


Figura 1 Sistema de una habitación con refrigeración
Fuente: *Elaboración Propia*

Las ecuaciones que modelan al sistema (Bejan, 1995) (Klein, 1967) se muestran a continuación:

La ecuación de balance de masa toma la forma

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

donde el término a la izquierda representa el cambio de masa de aire dentro de la habitación, que es el volumen de control en estudio; \dot{m}_{in} representa la masa que llega a la habitación desde el intercambiador de calor; \dot{m}_{out} es la masa que sale de la habitación.

Considerando que la cantidad de flujo de masa de aire que sale y regresa a la habitación es la misma.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (2)$$

La ecuación (1) queda de la siguiente forma

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = 0 \quad (3)$$

La ecuación de la tasa de equilibrio energético toma la forma

$$\frac{dU_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} \quad (4)$$

El término a la izquierda en la ecuación (4) representa el cambio de la energía interna del aire dentro de la habitación.

\dot{Q} es la tasa de energía transferida del ambiente a la habitación al ambiente; h_{in} representa la entalpia del aire que ingresa a la habitación; y h_{out} representan la entalpia del aire que sale de la habitación. \dot{W} es la tasa de trabajo.

Considerando que no hay tasa de trabajo desarrollado en la habitación.

$$m_{cv} \frac{dU_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} \quad (5)$$

Donde el término m_{cv} representa la masa de aire dentro de la habitación que permanece constante con respecto al tiempo, entonces considerando que el aire en estudio es como un gas ideal con constantes calores específicos.

$$m_{cv}C_v \frac{dT_{room}}{dt} = \dot{Q} + \dot{m}_{in}C_p(T_{in} - T_{room}) \quad (6)$$

La capacidad calorífica específica del aire a presión y volumen constantes son C_p y C_v respectivamente. La ecuación (6) se puede escribir como

$$\frac{dT_{cv}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{m_{cv}C_v} + \frac{\dot{m}_{in}C_p}{m_{cv}C_v}(T_{in} - T_{room}) \quad (7)$$

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{m_{cv}C_v} + \frac{\dot{m}_{in}k}{m_{cv}}(T_{in} - T_{room}) \quad (8)$$

La masa de aire inyectada a la habitación \dot{m}_{in} es una función de T_{room} . La derivada dT_{room}/dt representa la variación de la temperatura con el tiempo dentro del volumen de control; el primer y el segundo término a la derecha en la ecuación (8) son la carga térmica y la energía eliminada por el intercambiador de calor, respectivamente; k es la relación de capacidad calorífica específica entre C_p y C_v del aire; T_{room} es la temperatura del aire del edificio.

Modelo del índice de confort térmico PMV-PPD

El confort térmico está definido por el estándar estadounidense ASHRAE-55 como la condición mental que demuestra una agradable sensación con el ambiente térmico.

El trabajo Fanger relaciona la sensación térmica con la existencia de equilibrio térmico observando en una cantidad de personas dentro de un espacio cerrado.

El método de Fanger predice el confort térmico sobre una base de un conjunto de parámetros y ecuaciones empíricas del calor transferido entre el cuerpo humano y el medio ambiente.

Este análisis tiene como resultado un índice que predice la escala de sensación térmica. Al índice se le denomina Voto Medio Previsto (PMV), donde actualmente es el más utilizado en los estándares internacionales para medir los niveles de confort dentro de los edificios y los representa en una escala de siete niveles como se puede apreciar en la tabla 1, que consiste en los valores de -3 (mucho frío) a 3 (mucho calor).

PMV	Sensación térmica
+3	Mucho calor
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutro
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Muy frío

Tabla 1 Escala de Sensación Térmica
Fuente: (ISO,2005)

En la metodología de Fanger se tiene presente el uso de seis variables: el nivel de actividad o metabolismo (M_{et}), aislamiento térmico de la ropa (I_{cl}), la temperatura del aire (T_a), la humedad relativa (R_h), la velocidad del aire (v) y la temperatura radiante media (T_{mr}).

Agregando a la figura 1, las respectivas seis variables del modelo de confort PMV, queda representado de la siguiente manera en la figura 2.

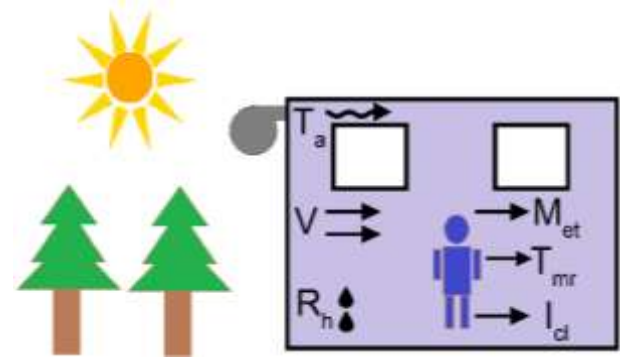


Figura 2 Sistema de refrigeración de una habitación con representación de variables del índice PMV
Fuente: Elaboración Propia

Para el cálculo del índice PMV se utiliza las siguientes ecuaciones (Croitoru, 2015) (Vázquez, 2018) :

$$PMV = (0.325e^{-0.042M_{et}} + 0.028)L \quad (9)$$

$$L = (M_{et} - W) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & - 0.0014M_{et}(34 - T_a) \\ & - 3.05 \\ & \times 10^{-3}[5733 \\ & - 6.99(M_{et} - W)P_{ain}] \\ & - 0.42(M_{et} - W \\ & - 58.15) - 1.72 \\ & \times 10^{-5}M_{et}(5867 \\ & - P_{ain}) - 3.96 \\ & \times 10^{-8}F_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 \\ & - (T_{mr} + 273)^4] \\ & - F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \end{aligned}$$

Donde L representa la carga térmica en el cuerpo humano (W/m^2); W es el trabajo externo (W/m^2); P_{ain} es la presión parcial de vapor de agua en el aire (P_a); T_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa ($^{\circ}C$); h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/^{\circ}C m^2$); F_{cl} es el factor de área de la ropa.

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M_{et} - W) - 0.1515I_{cl} \times [3.96 \times 10^{-8}F_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mr} + 273)^4] + F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (11)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25}, B \geq 12.1\sqrt{v} \\ 12.1\sqrt{v}, B \leq 12.1\sqrt{v} \end{cases} \quad (12)$$

$$B = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (13)$$

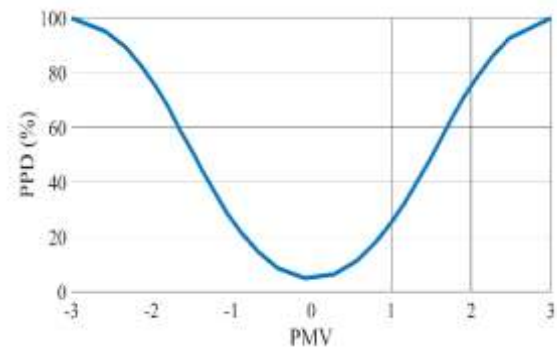
$$F_{cl} = \begin{cases} 1.0 + 0.2I_{cl}, I_{cl} \leq 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl}, I_{cl} > 0.5clo \end{cases} \quad (14)$$

A consecuencia del índice PMV, se presenta otro índice asociado, el cual se le nombra Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD). Este índice establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas térmicamente insatisfechas, lo que quiere decir cuál es porcentaje de personas que siente demasiado frío o demasiado calor. Si el valor del índice PMV se encuentra cercano al neutro, es decir a cero, el porcentaje de personas insatisfechas será aproximadamente de 5%.

La relación de los dos índices PMV y PPD se expresa en la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.219PMV^2)] \quad (15)$$

La relación del índice PMV-PPD se puede observar en la gráfica 1.



Grafica 1 PPD en función al índice PMV
Fuente: (ISO,2005)

Modelo del índice de confort térmico PMV Simplificado

Los métodos que existen para evaluación de confort térmico por lo general requieren de equipos de medición especializada que por lo general no son viables para gran parte de las medianas y pequeñas empresas. Uno de estos métodos es un índice simplificado llamado EsConTer, desarrollado por Talaia y Simo (2009). Este índice se presenta en forma de una escala térmica basada en una escala de colores que comprende también a la escala de siete niveles presentada en el índice PMV estándar que establece el estándar ASHARAE-55.

De la cual este índice utiliza la temperatura de aire y la temperatura de bulbo húmedo como entradas de datos, lo que proporciona un valor adimensional en un rango de +3 a -3 siguiendo el mismo esquema de sensación térmica ASHARE-55. La fórmula del índice de confort térmico simplificado EsConTer (Morgado M. T., 2015) (Talaia M. M., 2013) es la siguiente:

$$EsConTer = -3.75 + 0.103(T_a + T_w) \quad (16)$$

Donde T_a ($^{\circ}C$) es la temperatura del aire y T_w ($^{\circ}C$) es la temperatura de bulbo húmedo.

Modificando la figura 2, reemplazando las variables del índice PMV y sustituyéndola por el índice simplificado EsConTer, se muestra en la figura 3.

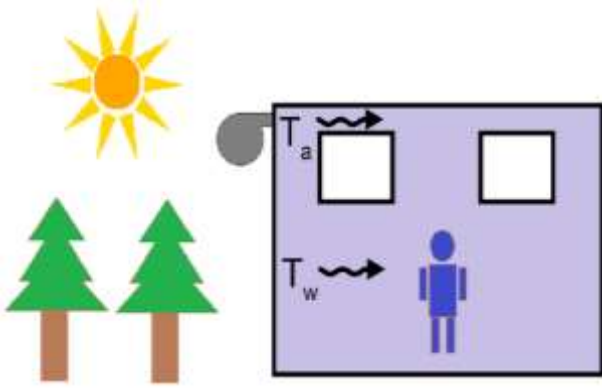


Figura 3 Sistema de refrigeración de una habitación con representación de variables del índice de confort térmico simplificado EsConTer

Fuente: Elaboración Propia

Aplicación de los índices de confort PMV-PPD estándar y simplificado

Se realiza la programación del modelo matemático de una habitación con sistema de refrigeración de la ecuación (7), además de los índices de confort tanto el estándar de la ecuación (9) como el simplificado de la ecuación (15). De igual manera se lleva a cabo el bloque de control, el cual está en función del índice de confort y se encarga de controlar el flujo de aire que entra al edificio para así realizar los cambios de temperatura que requiera para que el índice de confort sea el deseado.

Esta se lleva a cabo en diagramas de bloques del software Matlab®/Simulink. La representación del diagrama de bloque del sistema con el índice de confort estándar se observa en la figura 4.



Figura 4 Diagrama de bloques representando el sistema con el índice de confort térmico estándar de seis variables.

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la aplicación del índice de confort simplificado, el funcionamiento del controlador es la misma, solo aplica un cambio de variables que interactúan con este índice. La representación se encuentra en la figura 5.

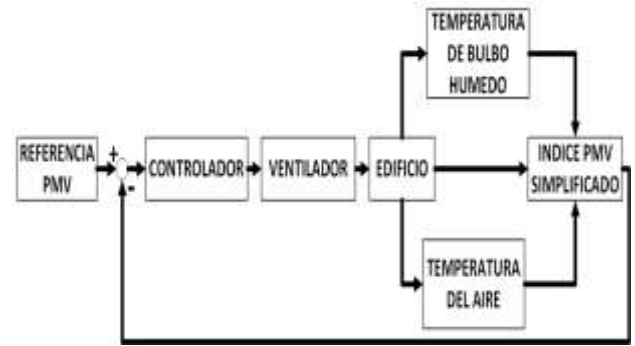


Figura 5 Diagrama de bloques representando el sistema con el índice de confort térmico simplificado

Fuente: Elaboración Propia

Se utiliza una estrategia simple de control clásico PID implementado a la ecuación (7) en conjunto con las ecuaciones de confort (9,15), tomando como entrada una referencia basado en la escala dado por los índices de confort, se ajustan manualmente los parámetros del valor proporcional, integral y derivativo mediante la ecuación característica del controlador PID. Donde K_p es la constante de proporcionalidad, K_i corresponde a la constante de acción integral, K_d es la constante de la acción derivativa, $e(t)$ indica el error y $u(t)$ representa la señal de control.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Con este controlador se espera que reduzca el error entre la referencia de entrada con el valor obtenido de los modelos de confort térmicos, para que así se alcance el valor de referencia PMV deseado en el menor tiempo posible y disminuyendo los sobretiros.

Consideraciones para la simulación

Al tomar como modelo matemático una habitación con sistema de refrigeración expresado en la ecuación (7), se toman las siguientes consideraciones.

- El flujo de tasa de aire, \dot{m}_{in} , que es inyectada al edificio tiene como valor máximo de 20 kg/s.
- La temperatura de la masa de aire inyectada al edificio es de 18 °C.
- La temperatura inicial del aire del edificio es de 30 °C.
- El volumen del edificio es considerado de 56 m³ y la cantidad de masa dentro de esta es de 70 kg.

- Las capacidades de calor específicas del aire, C_p y C_v , son 1.007 kJ/kg K y 0.7179 kJ/kg K.
- Se considera que existe una disipación térmica al medio ambiente \dot{Q} como 3.51 kW h.

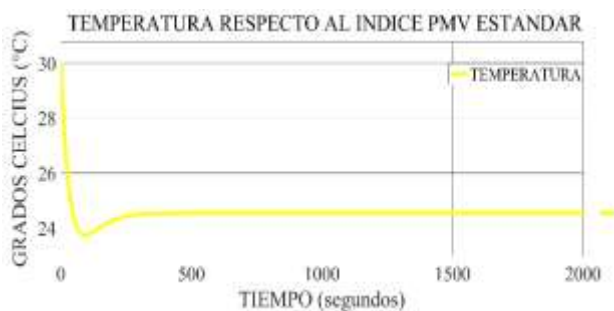
Para simular las condiciones de las variables del modelo de confort PMV estándar de las ecuaciones (9-14) se considera lo siguiente.

- Dado las condiciones típicas de una oficina $T_a = T_{mr}$
- La velocidad del aire se toma, $v = 0.15$ m/s .
- Se considera un porcentaje de humedad relativa, $R_h = 50\%$.
- Aislamiento térmico típico de un traje de negocios, $I_{cl} = 1.0$ clo
- Rango metabólico de una persona en estado de reposo, $M_{et} = 1.2$

Mientras que el índice de confort térmico simplificado solo toma dos variables, la temperatura del aire (T_a) en el interior del edificio y la temperatura de bulbo húmedo $T_w = 12$ °C aproximadamente.

Resultados de las simulaciones

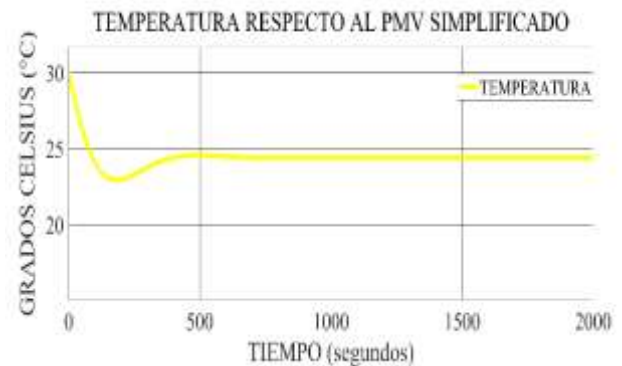
Para las simulaciones se toma como valor de referencia el valor neutro de la escala PMV el cual es cero. Los resultados se obtuvieron con los mismos valores de PID para ambos sistemas de confort el cual da parte para realizar comparaciones entre los dos índices. Los valores de PID utilizados son los siguientes, proporcional en 500, integrador en 5.5 y derivador en 10. La grafica 2 muestra el resultado de la temperatura del edificio calculado por el modelo de confort térmico estándar.



Grafica 2 Temperatura proporcionado por el índice PMV estándar

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, la gráfica 3 muestra la temperatura del edificio calculado por el modelo de confort térmico simplificado.



Grafica 3 Temperatura proporcionado por el índice PMV simplificado.

Fuente: Elaboración Propia

Para visualizar una mejor comparación, la gráfica 4 proporciona ambas temperaturas en una misma grafica.



Grafica 4 Comparación de Temperaturas de los índices de confort térmico.

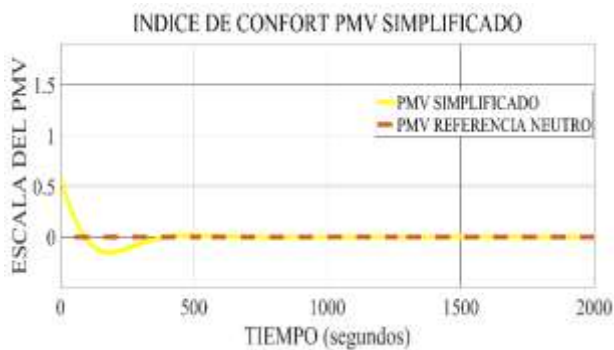
Fuente: Elaboración Propia

Con respecto a las escalas de confort dentro del edificio, la gráfica 5 muestra el resultado obtenido mediante el modelo de confort térmico estándar. Cabe mencionar que el valor deseado debe ser del valor neutro de la escala, es decir cero.



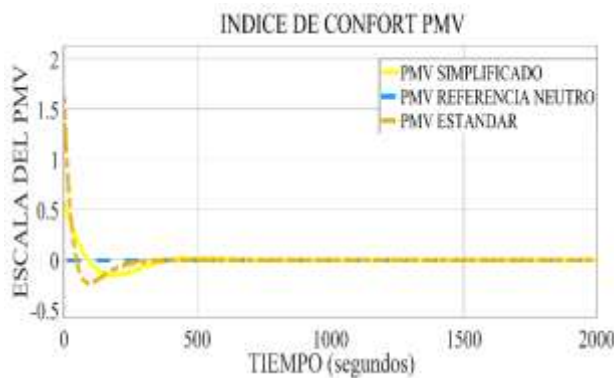
Gráfica 5 Escala de confort térmico obtenido por el modelo de PMV estándar
Fuente: Elaboración Propia

La gráfica 6 se observa el resultado obtenido del modelo de confort PMV simplificado.



Gráfica 6 Escala de confort térmico obtenido por el modelo de PMV simplificado
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 7, se realiza la comparación de ambos resultados de confort térmicos.



Gráfica 7 Comparación de las escalas de confort térmico
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del porcentaje de personas insatisfechas PPD en base al índice PMV estándar se observa en la gráfica 8.



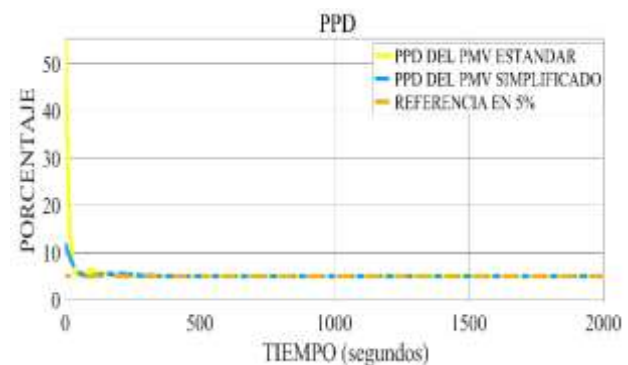
Gráfica 8 Valor obtenido PPD en base al PMV estándar
Fuente: Elaboración Propia

Mientras que el porcentaje obtenido de PPD del modelo PMV simplificado se visualiza en la gráfica 9.



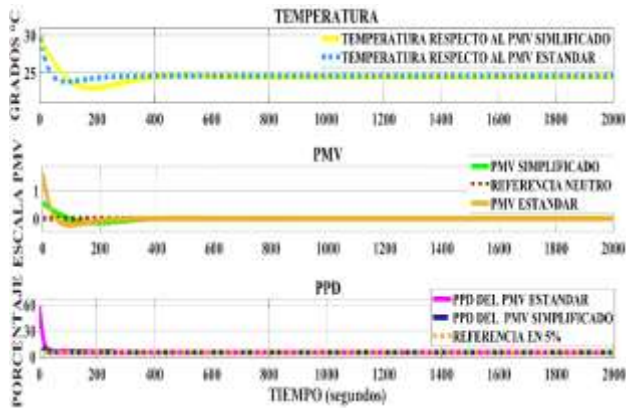
Gráfica 9 Valor obtenido PPD en base al PMV simplificado
Fuente: Elaboración Propia

Se comparan los resultados de ambos PPD en una sola grafica como se observa en la gráfica 10.



Gráfica 10 Comparación PPD en base a los índices PMV.
Fuente: Elaboración Propia

Por último, la gráfica 11 combina las tres comparaciones anteriores de temperatura, índice PMV y PPD.



Gráfica 11 Comparación de Temperaturas, PMV y PPD

Fuente: Elaboración Propia

Agradecimiento

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma Del Carmen por las facilidades prestadas.

Conclusiones

Se presentó los modelos matemáticos de los índices de confort, así como también las ecuaciones que representan al sistema de un edificio con sistema de refrigeración. Se realizó la programación de ambos modelos y se determinó aplicar un control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Las simulaciones mostraron comparaciones entre ambos modelos, donde se obtienen resultados muy semejantes entre ellos. El modelo con el índice de confort térmico simplificado obtuvo valores deseados bajo las condiciones que se plantearon al momento de realizar las simulaciones. Los valores de temperatura en ambos modelos presentaron ser muy semejantes, el valor de confort térmico PMV en ambos casos convergen al deseado y lo mismo sucede en cuanto al porcentaje de personas insatisfechas (PPD). Por lo que se concluye que el modelo de confort térmico simplificado puede usarse como sustitución al modelo de confort térmico estándar.

Referencias

ASHRAE. (2013). ANSI/ASHRAE 2013. Standard 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA, USA.

Bejan, A. T. (1995). Thermal design and optimization. John Wiley & Sons.

Croitoru, C. &. (2015). Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 304-318.

d'Ambrosio Alfano, F. R., Olesen, B. W., Palella, B. I., & Riccio, G. (2014). Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. Energy and Buildings, 326-336.

Energy, D. o. (2017). Department of Energy, Buildings energy databook, Office of Energy, Efficiency & Renewable Energy. Washington, DC.

Federspiel, C., & Asada, H. (1992). User-Adaptable Comfort Control for HVAC Systems. American Control Conference. Chicago, IL, EE. UU., EE. UU.

Hamdi, M., & Lachiver, G. (1998). A Fuzzy Control System Based on. IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, AK, USA.

Hana, H., Lee, J., JonghunKim, Jang, C., & Jeong, H. (2014). Thermal Comfort Control Based on a Simplified Predicted Mean Vote index. Energy Procedia, 61, 970-974.

ISO. (2005). ISO 7730: 2005 Ergonomics of the thermal environment., Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

Klein, M. J. (1967). Thermodynamics in Einstein's thought. Science, 509-516.

Kolich, M., Line, J., & Akbar Berry, S. M. (2017). A Review of Human Physiological, Psychological & Human Biomechanical Factors on Perceived Thermal Comfort of Automotive Seats. SAE Technical Paper.

Mar, C. M., Álvarez, J., Julio, N.-R., Francisco, R., & M., B. (2014). Control predictivo no lineal del confort térmico y calidad de aire. XXXV Jornadas de Automática.

Mohammed, J. A.-K., Mohammed, F. M., & Jabbar, M. A.-S. (2018). Investigation of high performance split air conditioning system by using Hybrid PID controller. Applied Thermal Engineering, 129, 1240-1251.

ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain. Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado. Revista del Diseño Innovativo. 2020

Morgado, M. T. (2015). Creating productive workers in industrial context from the Definition of Thermal Comfort. *Int. J. Ind. Eng. Manag.* 75-84.

Morgado, M., MárioTalaia, & LeonorTeixeira. (2017). A new simplified model for evaluating thermal environment and thermal sensation: An approach to avoid occupational disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 60, 3-13.

P. Bermejo, L. R. (2012). Design and simulation of a thermal comfort adaptive system based on fuzzy logic and on-line learning. *Energy and Buildings*, 367-379.

P.O., F. (1972). *Thermal comfort analysis and applications in environment engineering*. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press.

Pellerin, N. &. (2004). Effects of steady-state noise and temperature conditions on environmental perception and acceptability. *Indoor air*, 129–136.

Talaia, M. M. (2013). Evaluation of the thermal comfort in workplaces e a study in the metalworking industry. *Occupational Safety and Hygiene.*, 473-477.

Talaia, M. S. (2009). EsConTer: Um índice de avaliação de ambiente termico. V Congresso Cubano de Meterologia, (pp. 1612-1626). Cuba. U.S Department of Labor. (2012–13). U.S Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Occupational Outlook, Medical Assistants.

Valladares, W., Galindo, M., Gutiérrez, J., Wu, W.-C., Liao, K.-K., Liao, J.-C., . . . Wang, C.-C. (2019). Energy optimization associated with thermal comfort and indoor air control via a deep reinforcement learning algorithm. *Building and Environment*, 155, 105-117.

Vázquez, J. G. (2018). Educational tool for the learning of thermal comfort control based on PMV-PPD indices. *Computer applications in engineering education*, 26(4), 906-917.

Zare, M., Bodin, J., Cercier, E., Brunet, R., & Roquelaure, Y. (2015). Evaluation of ergonomic approach and musculoskeletal disorders in two different organizations in a truck assembly plant. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 34-42.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

[Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2^{do} Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3^{er} Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

ID 1^{er} Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2^{do} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2^{do} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen (En Español, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)

Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)

Citación: Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista del Diseño Innovativo. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del Artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No. 10 y Negrita]

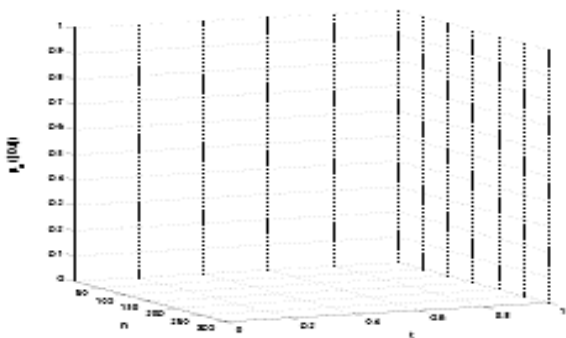


Gráfico 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

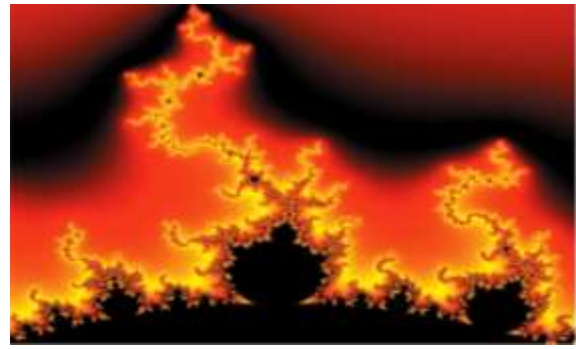


Figura 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Cada Artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Artículo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. No deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Artículo.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

Ficha Técnica

Cada Artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción.*
2. *Descripción del método.*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda.*
4. *Resultados.*
5. *Agradecimiento.*
6. *Conclusiones.*
7. *Referencias.*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

Reserva a la Política Editorial

Revista del Diseño Innovativo se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista del Diseño Innovativo emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Taiwan considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-México, S.C en su Holding Taiwan para su Revista del Diseño Innovativo, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC)

HISPANA (Información y Orientación Bibliográfica-España)

Servicios Editoriales:

Identificación de Citación e Índice H.

Administración del Formato de Originalidad y Autorización.

Testeo de Artículo con PLAGSCAN.

Evaluación de Artículo.

Emisión de Certificado de Arbitraje.

Edición de Artículo.

Maquetación Web.

Indización y Repositorio

Traducción.

Publicación de Obra.

Certificado de Obra.

Facturación por Servicio de Edición.

Política Editorial y Administración

244 - 2 Itzopan Calle. La Florida, Ecatepec Municipio México Estado, 55120 Código postal, MX. Tel: +52 1 55 2024 3918, +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 4640 1298; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

CAMPOS - QUIROGA, Peter. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN® Taiwan), sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

69 Calle Distrito YongHe, Zhongxin. Taipei-Taiwán.

Revista del Diseño Innovativo

“Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2”

COLÍN-MARTINEZ, José Luis, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe

CIATEQ A.C.

“Sistema de realidad virtual para la industria aeroespacial”

FAVELA-OLIVAS, Ruben Alonso & SANCHEZ-SANTIAGO, Pedro

Colegio Nueva Vizcaya

“Estabilidad y diseño de un controlador LQR para un sistema Bola-Viga”

TELLEZ-CUEVAS, Pedro, HERNÁNDEZ-LUNA, Aldo y CRUZ-LUNA, Manuel

Instituto Tecnológico Superior de Huachinango

“Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado”

ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain

Universidad Autónoma del Carmen

