

Diseño e implementación de cople y soporte para motor de CD - tacogenerador de banco de pruebas experimental

Efraín Ramírez Velasco¹, Josué Augusto Reyes Malanche², Francisco Javier Villalobos Piña¹, Abraham Alvarado Laguna¹ y Ma. Elena Castañeda Morales²

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos Ote. 1801, Bona Gens, 20256 Aguascalientes, Ags., R21153203@aguascalientes.tecnm.mx, francisco.vp@aguascalientes.tecnm.mx, G21153222@aguascalientes.tecnm.mx

² Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Departamento de Mantenimiento y seguridad Industrial, Blvd Juan Pablo II 1302, Ex hacienda la Cantera, 20200 Aguascalientes, Ags. josue.malanche@utags.edu.mx, mcastaneda@utags.edu.mx

Resumen

El diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotativas es una disciplina de gran relevancia tanto para la industria, los procesos productivos y el ámbito residencial, debido al uso predominante de estos dispositivos en diversas aplicaciones. En ese sentido, se plantea la construcción de un grupo de aditamentos utilizados en un banco de pruebas experimentales, destinado al estudio y diagnóstico de fallas mecánicas y eléctricas. Como parte del proyecto, se diseñaron y fabricaron componentes clave para el funcionamiento del banco. Entre ellos, se diseñó e implementó un cople de ejes, el cual permite el acoplamiento entre el motor de corriente directa (CD) que impulsa el generador síncrono y el tacogenerador, donde este último permite la medición de velocidad angular de las máquinas, ambas con ejes de diferente diámetro. Adicionalmente se diseñó y fabricó un soporte para asegurar el tacogenerador en su posición operativa. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que se obtuvieron valores de factor de seguridad de 73.37 para el cople y de 2,614.51 para el soporte, lo que indica que la resistencia de los materiales utilizados se encuentra por encima de los valores de las cargas aplicadas. Se utilizaron herramientas matemáticas y los programas de simulación SolidWorks y MD Solids para obtener dichos valores y en base a eso las piezas fueron fabricadas, cumpliendo con el objetivo de montaje de las máquinas y garantizando la transmisión efectiva del movimiento rotacional.

Palabras clave — Generador síncrono, Cople de eje, Soporte, Tacogenerador, Motor de CD.

Design and implementation of a shaft coupler and mount for DC motor - tachogenerator of experimental test bench.

Abstract

The fault diagnosis in rotative electrical machines is a highly relevant discipline in industry, production processes and residential sector, due to the widespread use of these devices in various applications. In this context, the construction of a group of components used in an experimental test bench is proposed, intended for the study and diagnosis of mechanical and electrical faults. As part of the project, key components for the operation of the test bench were designed and manufactured. Among them, a shaft coupler was designed and developed allowing to connect a direct current (DC) motor which drives the synchronous generator and the tachogenerator, which allows the measurement of the angular velocity in the machines, both of them having different shaft diameters. Additionally, a mount was designed and manufactured to secure the tachogenerator in its operational position. The results obtained were satisfactory, since safety factor values of 73.37 for the coupling and 2,614.51 for the support were obtained, which indicates that the strength of the materials used is above the values of the applied loads. Mathematical tools were used and the simulation programs SolidWorks and MD Solids to obtain those values and based on that the parts were manufactured, successfully achieving the objective of coupling the machines and ensuring the effective transmission of rotational motion.

Keywords — Synchronous generator, Shaft coupler, Mount, Tachogenerator, DC motor.

I. INTRODUCCIÓN

Los coples para ejes, son elementos de máquina de gran importancia destinados a permitir la transmisión de movimiento rotacional, lo cual puede lograrse utilizando ejes del mismo o de distinto diámetro. En la literatura se ha presentado el diseño de distintos coples en máquinas, como es el caso de coples automotrices los cuales se desgastan a causa del desalineamiento excesivo, sobrecargas de torque y por vibraciones [1]. Posteriormente, es presentado y analizado un mecanismo de acoplamiento esférico de velocidad constante, el

cual es estudiado estructural y dinámicamente mediante programas de análisis de elemento finito asistido por computadora y de solución de mecanismos. Obteniendo las fuerzas de reacción en las juntas, los pares, las velocidades y los consumos de energía [2]. Existen también transmisiones de Toma de Fuerza (PTO por sus siglas en inglés), las cuales transfieren altas cargas de par desde una fuente de potencia, como un tractor, un implemento o cortadoras de pasto, accionado por la PTO. Para permitir el giro ascendente y descendente a lo largo de la línea de transmisión; y cualquier diferencia en la alineación vertical del eje de salida del tractor

y la entrada del implemento, se utilizan juntas flexibles que permiten la transferencia continua de potencia, incluso cuando la transmisión desde el tractor al implemento opera en un ángulo [3]. Por otro lado y tomando en cuenta que en cualquier escenario los componentes más importantes en una transmisión son los ejes, las cuales son utilizadas para transmitir torque y potencia, y por lo cual se encuentran sometidas a altas tasas de esfuerzo torsional y deformación es de gran importancia la selección correcta del material debido a su rigidez, resistencia y otras propiedades importantes en el diseño de elementos de máquinas [4]. De la misma manera se examinan las ventajas potenciales de un cople neumático capaz de cambiar su rigidez torsional durante su operación. Para ello se seleccionaron parámetros como el ángulo de torsión, torque, rigidez torsional promedio y el porcentaje de torque transmitido [5]. Se desarrolló un acoplador que permite la transmisión de datos a través de un eje rotativo o un brazo robótico, presentando algunas consideraciones de diseño, simulaciones y resultados de medición [6].

En otro contexto los soportes de máquinas son de gran importancia para el montaje y funcionamiento óptimo en diferentes sistemas mecánicos industriales, automotrices y aeroespaciales. Por eso se propone el diseño y fabricación de soportes ópticos para el espectrógrafo ESPRESSO, diseñado para detectar exoplanetas de tipo terrestre, el cual alcanza una velocidad radial extrema de 10 cm/s y una precisión espectroscópica [7]. Por otra parte se presenta el diseño y desarrollo de soportes flexibles para un telescopio espacial, los cuales incrementan la estabilidad reduciendo la presión en los tornillos de los montajes e incrementando la durabilidad a las vibraciones [8].

En este trabajo de investigación se presenta el proceso de diseño de piezas basado en esfuerzo, torque o fuerza, factor de seguridad y en la resistencia a la cedencia de los materiales seleccionados, que para el caso del cople fue aluminio 1060 y para el soporte acero A36. Los resultados obtenidos de forma analítica fueron corroborados mediante la herramienta de cómputo SolidWorks y MD Solids y así fabricar las piezas en cuestión, permitiendo realizar un montaje motor de CD - tacogenerador en un banco de pruebas experimentales.

II. METODOLOGÍA

El presente trabajo expone el diseño de algunas piezas clave en un banco de pruebas experimentales, acoplando un tacogenerador, el cual es un dispositivo de tecnología analógica que permite efectuar la medición de velocidad angular de un motor síncrono incorporado a un par motor-generador.

A. Diseño de Cople de Eje

Como se mencionó anteriormente se propone el diseño y la fabricación de un cople de eje y un soporte para un tacogenerador que conforma el banco de pruebas experimentales. Se considera primeramente el diseño del cople,

el cual se somete a un par de torsión medido de forma empírica con valor de 0.06 Nm, y cuyo modelo y plano de fabricación se observan en las figuras 1 y 2 respectivamente.

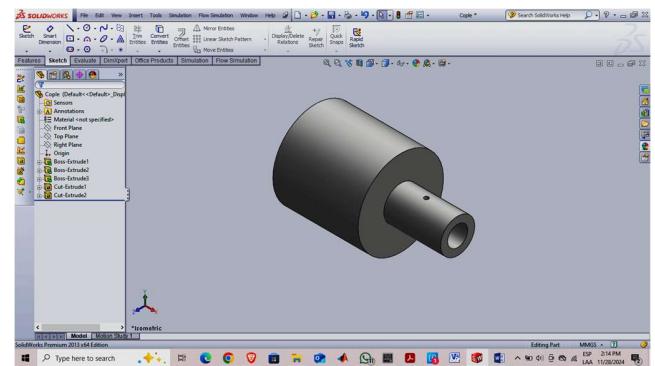


Fig. 1. Modelo del cople en SolidWorks.

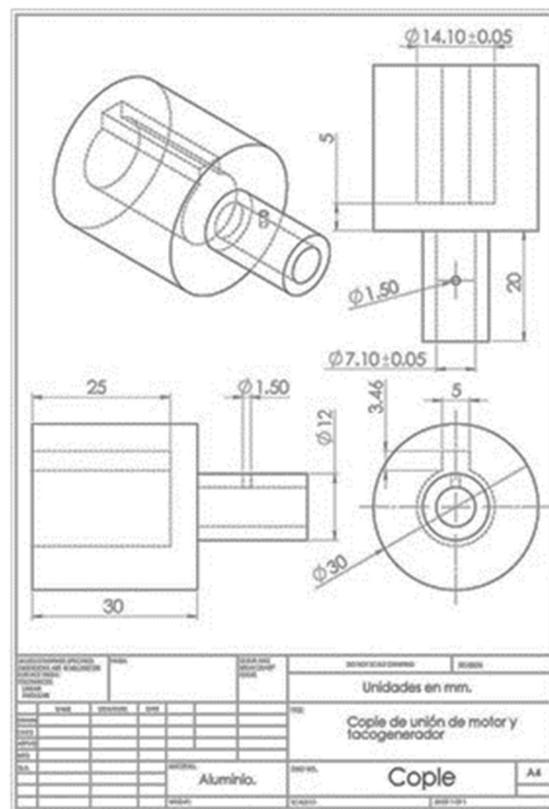


Fig. 2. Plano para maquinado de pieza elaborado en SolidWorks.

Es de hacerse notar que el esfuerzo τ actúa de manera uniforme en una sección anular dA de una sección circular llamada eje o flecha, que en este caso es el cople como se observa en la figura 3, ahora bien como la fuerza es igual al esfuerzo por el área, la fuerza en el área dA está dada como se presenta en la ecuación (1) [4].

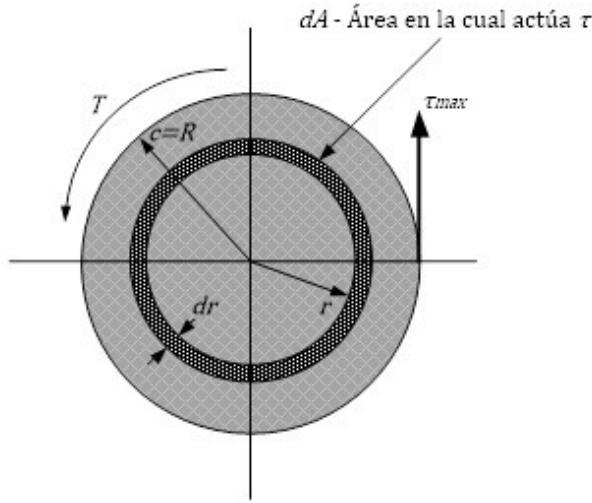


Fig. 3. Esfuerzo cortante τ en el radio r que actúa en el área dA .

$$dF = \tau dA = \tau_{max} \frac{r}{c} dA \quad (1)$$

El par de torsión generado por la fuerza es el producto de dF por la distancia radial a dA como se presenta en (2).

$$dT = \int_A dF = \tau_{max} \frac{r}{c} dA \cdot r \quad (2)$$

A partir de (2), se obtiene la ecuación (3).

$$\int_A dT = \int_A \tau_{max} \frac{r^2}{c} dA \quad (3)$$

Utilizando (3), se obtiene (4),

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad (4)$$

Siendo c la distancia desde el eje centroidal hasta la última fibra del material como se vio en la figura 3. J es el momento polar de inercia calculado utilizando la ecuación (5).

$$J = \frac{\pi D^4}{32} \quad (5)$$

En este caso como es una sección circular hueca con diámetros interno y externo de 7.1 mm y 12 mm respectivamente, el momento polar de inercia se obtiene mediante (6).

$$J = \frac{\pi(D_{ext}^4 - D_{int}^4)}{32} = 1,786.27 \text{ mm}^4 \quad (6)$$

Por lo tanto el esfuerzo torsional máximo es obtenido como se muestra en la expresión (7), considerando el par de 0.06 Nm y cambiando a mm.

$$\tau_{max} = \frac{(60 \text{ Nmm})(6 \text{ mm})}{(1,786.27 \text{ mm}^4)} = 0.2 \text{ MPa} \quad (7)$$

B. Diseño del Soporte

Se prosigue a la elaboración del modelo del soporte para el montaje del tacogenerador utilizando elementos roscados. Se empleó tubular de Acero Comercial cuadrado, de 19 mm de lado y 1.2 mm de espesor para la fabricación.

La estructura modelada en SolidWorks se observa en la figura 4.

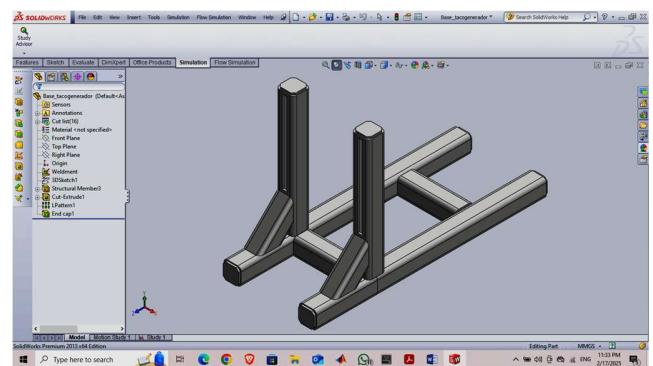


Fig. 4. Soporte para tacogenerador en SolidWorks.

Se realizó un análisis de tensiones en los elementos que conforman dicho soporte, simplificando el modelo en 2D para su análisis como es presentado en la figura 5, el término $W/2$ es debido a que la estructura está compuesta por dos secciones simétricas con barras en diagonal que sujetan al tacogenerador como se observó en la figura 4, siendo el peso del generador $W = 15 \text{ N}$.

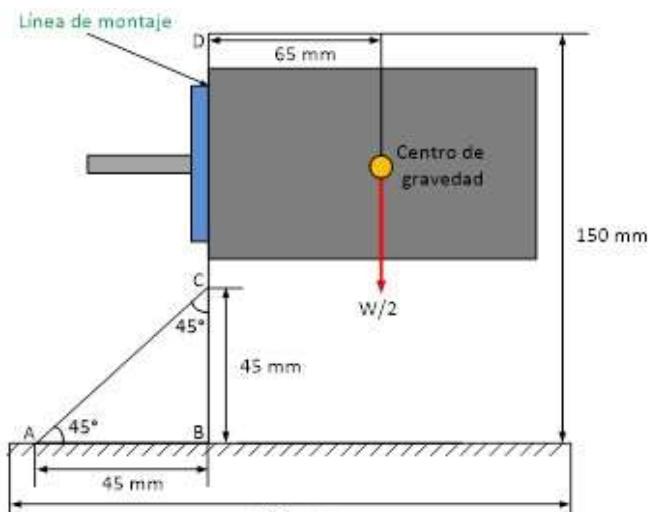


Fig. 5. Diagrama de cuerpo libre de soporte para tacogenerador en 2D.

En el diagrama de cuerpo libre, $W/2$ actúa en el centro de gravedad localizado a 65 mm aproximadamente desde la línea de montaje en dirección vertical, con una magnitud de 7.5 N, se puede observar también que la barra formada por los nodos B y C tiene la misma magnitud de 7.5 N en compresión como se puede ver en la figura 6.

El análisis es mostrado a continuación en (8).

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ Ax &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ Ay + By &= 7.5 N \\ \sum M_B &= 0 \\ Ay(0mm) + By(45mm) &= 7.5 N(45mm) \\ By &= 7.5 N \end{aligned} \quad (8)$$

Ahora, tomando el nodo B de la figura 5 se realiza el análisis de tensiones como se muestra en (9).

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ T_{AB} &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ By - T_{BC} &= 0 \\ 7.5 N - T_{BC} &= 0 \\ T_{BC} &= 7.5 N \end{aligned} \quad (9)$$

Se calcula el esfuerzo axial en (10), tomando el valor de carga obtenido en (9) como T_{BC} , y considerando el área de sección transversal del tubular utilizado de 78.44 mm^2 .

$$\sigma_{\text{axial}} = \frac{P}{A} = \frac{7.5 N}{78.44 \text{ mm}^2} = 95.61 \text{ kPa} \quad (10)$$

En donde P es la carga a la que está sometido el elemento y A es el área de sección transversal. Se comprueba lo calculado utilizando el paquete computacional de ingeniería mecánica MD Solids, mostrando los resultados en la figura 6.

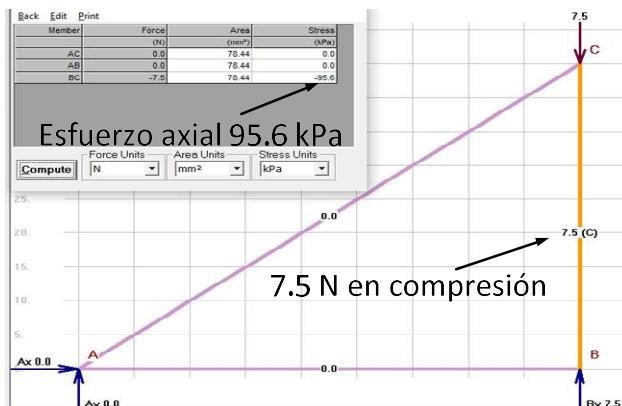


Fig. 6. Análisis de reacciones, tensiones y esfuerzo axial.

III. RESULTADOS

A. Cople de Eje

Se realizaron los análisis necesarios para el diseño de las piezas en SolidWorks. Las figuras 7 y 8 muestran los trazados de esfuerzo cortante torsional y factor de seguridad utilizando un torque de 0.06 Nm para el cople fabricado en Aluminio 1060.

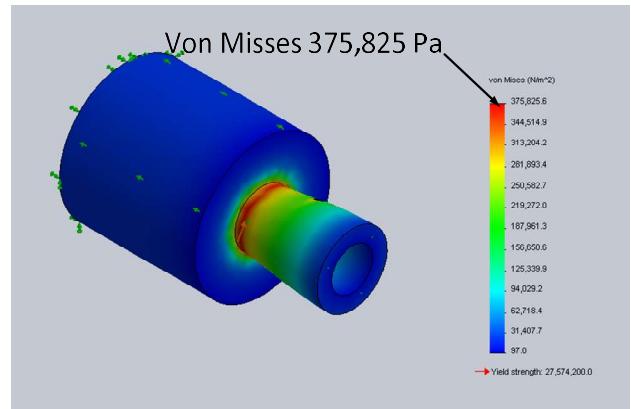


Fig. 7. Análisis de esfuerzo de Von Misses.

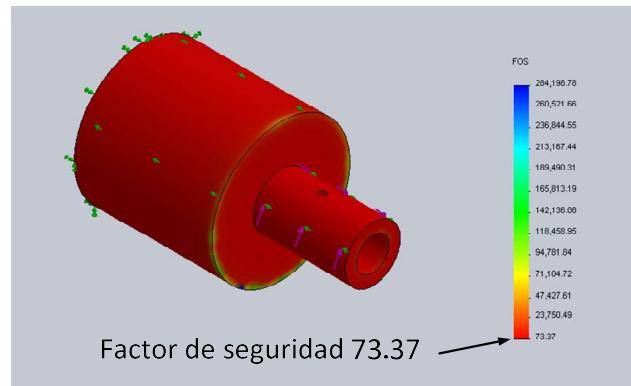


Fig. 8. Análisis de factor de seguridad.

Es de hacerse notar en la figura 7, que el esfuerzo obtenido coincide con el calculado en la expresión (7).

La teoría de la energía de distorsión, es la teoría más empleada para materiales dúctiles y se recomienda para los problemas de diseño, en donde el esfuerzo de Von Misses para esfuerzo plano (ver figura 9) se obtiene como en (11) [10].

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + \tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Para el caso de esfuerzo cortante puro τ_{xy} , donde el esfuerzo plano $\sigma_x = \sigma_y = 0$ se tiene que.

$$(3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} = S_y \quad (12)$$

Siendo S_y la resistencia a la cedencia.

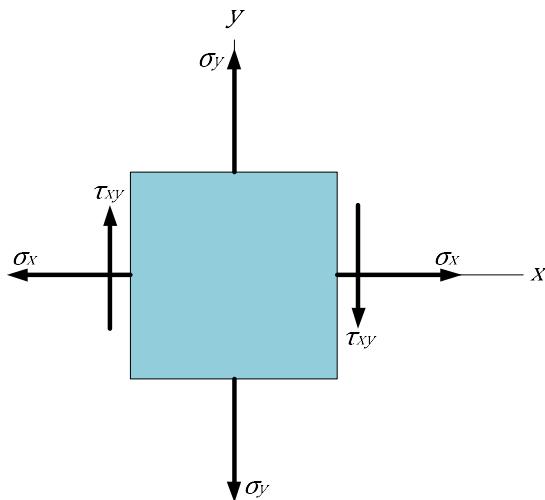


Fig. 9. Esfuerzo plano con cortante transversal.

Entonces el factor de seguridad es como se expresa en (13).

$$FS = \frac{S_y}{\sigma} \quad (13)$$

Obteniéndose el valor de factor de seguridad que se presenta a continuación.

$$FS = \frac{27,574,200 Pa}{(346,410 Pa)} = 79.6$$

Después de obtener en los análisis correspondientes al factor de seguridad, con valores de 73.37 mediante SolidWorks y de 79.6 de forma analítica, los cuales son más elevados que los recomendados en la literatura de 1.3 – 3 [11], lo cual significa que no existe deformación plástica y que la resistencia del material es alta en relación a la carga aplicada de torque. Por último se procedió a maquinar el cople mostrado en la figura 10.



Fig. 10. Cople maquinado en aluminio.

B. Soporte

Por último se realizaron los análisis correspondientes al soporte, para ello se tomó el modelo simplificado en 2D considerando solo el peso del tacogenerador y no la operación

de este, la cual generaría vibraciones mecánicas. En la figura 11 se puede ver que el resultado coincide con el obtenido de forma analítica en la expresión (10) y la figura 12 muestra el trazado de factor de seguridad.

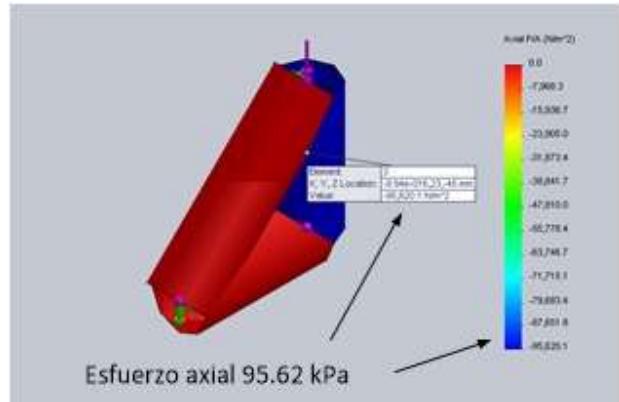


Fig. 11. Análisis de esfuerzo axial.

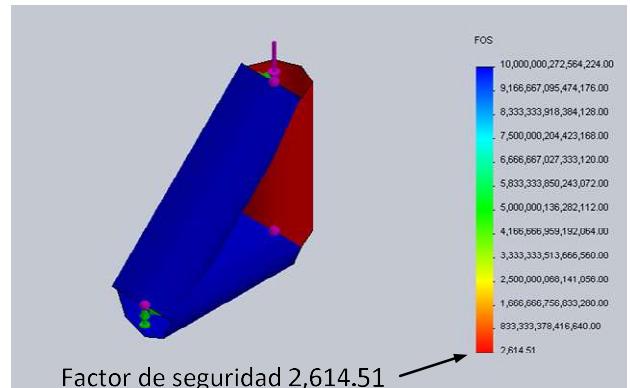


Fig. 12. Análisis de factor de seguridad.

En el análisis de factor de seguridad de la barra vertical indica que su valor es de 2,614.51, el cual es muy elevado con respecto a los recomendados con valores de 1.3 – 3 [11], lo que refleja que la carga aplicada es muy baja en relación a la resistencia del material, por lo cual no se deforma plásticamente y es apto para el montaje del dispositivo. Por último la figura 13 muestra el banco de pruebas experimentales con las piezas desarrolladas.

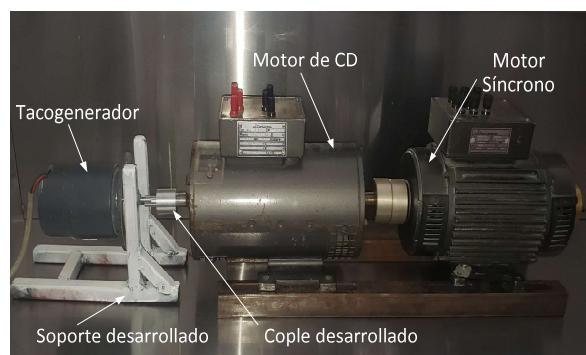


Fig. 13. Banco de pruebas experimentales.

IV. CONCLUSIÓN

El presente trabajo presenta un proceso de diseño de piezas que conforman un banco de pruebas experimentales. Con el desarrollo presentado, se logró obtener dos elementos clave para el funcionamiento de un banco de pruebas experimentales, el cual consta de un acoplamiento de ejes entre el par motor de CD - tacogenerador y el soporte para este último, en donde ambas máquinas se encuentran unidas por sus ejes a un motor síncrono como se vio en la figura 13, obteniéndose factores de seguridad de 73.37 y 2614.51, los cuales son valores mucho mayores que los recomendados en el diseño de este tipo de elementos, por lo que indica que la resistencia de los materiales es alta en comparación a las cargas aplicadas, con lo que se tiene la seguridad de que, bajo las condiciones de uso, estas piezas no fallarán, incluso si existiera una sobrecarga.

La intención de la realización del banco de pruebas experimentales es inducir fallas de forma artificial, con la finalidad de efectuar una detección temprana de las mismas, además estudiar el comportamiento de la máquina síncrona. Se aplicó análisis computacional, utilizando las herramientas de diseño mecánico MD Solids y SolidWorks, las cuales son herramientas muy utilizadas en la industria; dichas herramientas aplican el método de elemento finito para obtener los resultados de esfuerzo axial, esfuerzo torsional y factor de seguridad como se presentó en el desarrollo del trabajo de investigación. SolidWorks es una herramienta que permite realizar diferentes tipos de análisis, lo cual permitió los diferentes tipos de análisis, corroborando la matemática de la metodología utilizada. En el artículo no se consideró el análisis vibratorio, ya que este se realizará como trabajo a futuro.

REFERENCIAS

- [1] L. Barik, S. Samal, A. Behera, D. K. Rajak, C. I. Pruncu, "On the replacement of steel by NITINOL as coupling agent in automobile shaft," *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, Vol. 10, pp. 87-102, 2021, <https://doi.org/10.1007/s41683-021-00075-4>.
- [2] H. Kocabas. "Design and Analysis of a Spherical Constant Velocity Coupling Mechanism," *Journal of mechanical design*, vol. 129, issue 9, pp. 991-998, September 2007. <https://doi.org/10.1115/1.2748455>.
- [3] "U-Joints versus Constant Velocity Joints," Prairie Agricultural Machinery Institute, Saskatchewan, Canada, Research Update No. 743.I. 2000, ISSN 1188-4770.
- [4] S.K. Shoaib Nadeem, G. Giridhara and H.K. Rangavittal., "A review on the design and analysis of composite drive shaft," *Materials today: Proceedings*, ASME, Volume 5, Issue 1, Part 3, 2018, pp. 2738 – 2741, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.058>.
- [5] P. Kaššay, R. Grega, M. Urbanský, J. Krajňák, M. Kačíř, L. Žuf'ová. Novel Design of Variable Stiffness Pneumatic Flexible Shaft Coupling: Determining the Mathematical-Physical Model and Potential Benefits. *Machines* 2024, 12, 28. <https://doi.org/10.3390/machines12010028>.
- [6] B. Scheiner *et al.*, "Design of a Rotary Coupler for Data Transmission on Fast Rotating Mechanical Shafts and Roboter Arms," *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/RWS.2019.8714480.
- [7] S. Tschudi, A. Fragoso-Lopez, M. Amate, R. Rebolo, D. Mégevand, F. Zerbi, F. Pepe. (2014). Design of the opto-mechanical mounts of the ESPRESSO spectrograph. 915153. DOI:10.1117/12.2056952.
- [8] N. Mahawan, P. Panpang, N. Muangnun, C. J. Bourgenot, C. Atkins, R. M. Snell, M. Phlernjai, W. Wanajaroen, P. Sombatsatien, P. Chartsiriwattana "Optimization of flexible opto-mechanical mounts design in metallic mirror for space-based telescope using finite element analysis", Proc. SPIE 13100, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation VI, 131003Z (26 August 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3018676>
- [9] R. L. Mott. "Resistencia de Materiales." 5a Edición. México. 2009. Pearson Educación. ISBN: 978-607-442-047-0
- [10] R. G. Budynas and J. K. Nisbett. "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley," 9^a Edición. México. 2012. McGraw Hill.
- [11] R. L. Norton. "Diseño de máquinas." México. 1999. 1^a Edición. ISBN-10:9701702573. Pearson/Prentice Hall.