

Implementación de la metodología V como eje de desarrollo de un tribómetro de perno en disco

Implementation of the V methodology as the focal point of the development of a pin-on-disk tribometer

J. C. Sosa-Savedra ^{a,*}, M. A. Trejo-Estrella ^a, A. L. García-García ^a, J. D. O. Barceina-Sanchez ^a,
R. S. Velazquez-Gonzalez ^a, R. Hernández-Tovar ^b

^a Departamento de Investigación e Innovación Científica y Tecnológica del CICATA-Qro., del Instituto Politécnico Nacional. Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatarío, 76090 Santiago de Querétaro, Qro., México.

^b Departamento de Tecnologías Avanzadas de la UPIITA, del Instituto Politécnico Nacional. Av Instituto Politécnico Nacional 2580, La Laguna Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, México.

Resumen

El diseño, como todo proceso, involucra la ejecución de una serie de procedimientos y la toma de decisiones asociada con las actividades llevadas a cabo en dicha ejecución. Un método permite conseguir la mayor eficiencia posible durante un proceso. En estos días, cuando es fundamental el tiempo de producción para sacar al mercado sistemas cada vez más complejos, los graduados de las carreras de ingeniería mecatrónica o áreas afines deben aprender a diseñar productos eficientemente: es decir, con el mínimo de tiempo y costo, incorporando al proceso de diseño los cambios tecnológicos que aceleran la obtención de los resultados de la ejecución de los procedimientos. En este artículo, se presenta la metodología V, modificada y actualizada en las etapas de documentación y análisis de resultados. Se utilizará la elaboración del Tribómetro de Perno en Disco, empleado en el Laboratorio de Análisis de Superficies y Tribología, del CICATA-QRO, para ejemplificar la implementación de la metodología V. En este diseño se incorporaron nuevas herramientas y técnicas de evaluación, utilizadas pocas veces, como la impresión 3D, el diseño auxiliado por computadora y la automatización del diseño electrónico; el sistema emplea una Raspberry Pi 3 B+ y Python, como lenguaje de desarrollo. Actualmente, el sistema está en proceso de registro, habiendo superado el examen de forma evaluado por el IMPI mediante la gestión del IPN.

Palabras Clave: Diseño, Metodología V, Tribómetro, Perno en Disco.

Abstract

The process of design involves a series of procedures and decision-making activities. A method is necessary to achieve the highest possible efficiency during this process. Graduates of mechatronic engineering or related fields must learn to design products efficiently to bring increasingly complex systems to the market in minimum time and cost. They must incorporate technological changes into the design process to speed up the results of procedure execution. This article presents the modified and updated V methodology in the documentation and results analysis stages. The Pin-on-Disk Tribometer, created for the Surface Analysis and Tribology Laboratory of the IPN-CICATA Querétaro, serves as an example of the implementation of the V methodology. New evaluation tools and techniques such as 3D printing, computer-aided design, and electronic design automation were incorporated into the design. The system uses a Raspberry Pi 3 B+ and Python development language. Currently, the system is in the registration process, having passed the formal examination evaluated by IMPI through the management of the IPN.

Keywords: Design, V-Methodology, Tribometer, Pin-on-Disc.

1. Introducción

Desde mediados del siglo pasado el desarrollo microelectrónico ha evolucionado a un ritmo vertiginoso. Este

*Autor para la correspondencia: jcsosa@ipn.mx

Correo electrónico: jcsosa@ipn.mx (Julio C. Sosa-Savedra), marton_95@hotmail.com (M. A. Trejo-Estrella), agarciag@ipn.mx (A. L. García-García), obarceinas@ipn.mx (J. D. O. Barceina-Sanchez), roberto.sostrand86@gmail.com (R. S. Velazquez-Gonzalez), rhtovar@ipn.mx (R. Hernández-Tovar).

desarrollo ha tenido dos vertientes: el diseño y la fabricación de sistemas cada vez más complejos (Sosa et al., 2020).

La creciente complejidad de los productos desarrollados, la multidisciplinariedad de los proyectos, el menor tiempo para introducir el producto al mercado y la reducción de costos, son factores claves para las empresas. De esta manera, es necesario enfrentar los desafíos tanto de la práctica industrial como en los métodos científicos básicos (Graessler et al., 2018).

Así, la naturaleza cambiante del diseño por el uso de nuevas tecnologías obliga a revisar los conocimientos que se internalizan en el proceso, de manera cotidiana, y revisar los métodos que ordenan la práctica de la disciplina (Sahagún, 2012).

Por otro lado, el diseño de hardware tiene como principal problema, respecto a una producción software, el alto costo del ciclo diseño-prototipado-prueba-inicio (Pardo, 2011). Este hecho acarrea mayores costos y esa es la necesidad de contar con la metodología más adecuada para reducirlos. Con ese propósito, se incorporan: herramientas CAD (de Diseño Asistido por Computadora), para la Automatización del Diseño Electrónico (EDA). Estas herramientas juegan un papel importante, pues facilitan el desarrollo de sistemas que involucran bloques electrónicos. Las herramientas CAD-EDA están constituidas por el software y hardware necesarios para lograr dicho fin (Sosa et al., 2014 Universidad).

En los últimos años se han presentado trabajos con el fin de perfeccionar y encontrar una metodología de diseño óptima, que permita agilizar el desarrollo de sistemas para el ingreso al mercado de manera más pronta, además de su enseñanza (Vazquez-Santacruz et al., 2023), (Ferreira et al., 2023), (Graessler et al., 2018) y (Pietruszewicz, 2019).

En este trabajo se presenta una propuesta de metodología partiendo del modelo V, incorporando nuevas etapas y técnicas para la evaluación del producto. El empleo de esta metodología está directamente relacionado con la metodología de diseño estructural, modelado y su simulación, así como la implementación práctica de sistemas físicos totalmente integrados. Esta metodología se presenta en un caso práctico que fue el diseño, implementación y puesta a punto de un tribómetro de perno en disco, respetando la norma ASTM G99 y G133. Se explica cada etapa del procedimiento, los criterios y resultados de cada una de las etapas, así como el diseño final, que incluye las partes: mecánica, electrónica y del sistema de software. En su diseño se empleó una computadora de placa única, Raspberry Pi 3 B+, y Python como lenguaje de desarrollo. El sistema desarrollado ya superó el proceso de registro y el examen de forma evaluado por el IMPI mediante la gestión del IPN.

2. Estado del Arte

Todo proceso de diseño involucra aplicar una serie de procedimientos y la toma de decisiones durante el proceso. Los métodos tienen un papel fundamental dando sentido y orden en el desarrollo de un producto y puede ser útil para conseguir la mayor eficiencia posible. Así, el método de diseño es seguir un orden específico y de acuerdo con la naturaleza del diseño se define el más adecuado. Se puede afirmar que en la actividad científica los resultados obtenidos están estrechamente relacionados con el método empleado. Así, un método riguroso nos conduce a obtener resultados precisos a diferencia de si se

usara un método vago o ambiguo que podría conducir a obtener resultados confusos (Pelta, 2013).

La metodología es parte del análisis y cuestiona los métodos de investigación. Es posible definirla como el estudio de los métodos, es decir, es la forma de organizar el proceso de investigación, de cómo presentar las posibles soluciones al problema y del control de los resultados.

Se plantea revisar la metodología de diseño y la naturaleza del diseño, para el desarrollo de un tribómetro de perno en disco.

2.1. Metodología en V

La metodología en V (*model V*) no es nueva, en 1998 Kevin Forsberg (Forsberg, 1998) presentó una propuesta denominándola ciclo de proyecto V (*The Vee*). En 2004, la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI de *Verein Deutscher Ingenieure*), publicó la VDI Guidelines 2206 (VDI 2206, 2004) y después otros trabajos como (Bathelt et al., 2005), (Graessler et al., 2018) y (Graessler et al., 2020). En (Zheng, 2014) se presenta una recopilación de los métodos de diseño y modelos de productos aplicados a la ingeniería mecatrónica. Más recientemente, en (Vazquez-Santacruz, 2023), se presenta una metodología de diseño integrado para sistemas mecatrónicos denominada diseño de sistemas mecatrónicos V-cubo (*V-cube for mechatronic systems design*).

En todos los trabajos mencionados, el punto de partida de sus metodologías, son los requerimientos del sistema y el resultado final es el producto esperado (Blanco et al., 2018) y (Graessler et al., 2018). En la V, un brazo se enfoca al diseño del sistema y el otro a la integración del sistema. En la parte central de la V se realiza el diseño específico del área de la ingeniería a desarrollar, que puede ser mecánica, electrónica o de la información, como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1: Diagrama a bloques del Modelo V (VDI 2206, 2004).

Otros trabajos, como (Perez et al., 2006), proponen un diagrama más detallado como muestra en la Figura 2. En este diagrama se puede observar una metodología que consiste en 7 fases o etapas, bien definidas.

La primera fase, de la Figura 2, consiste en definir las especificaciones del sistema a desarrollar, la documentación de los diferentes requisitos e identificar los valores que recibirá el sistema. La segunda fase consiste en la elaboración del diseño global del sistema, también conocido como diseño de alto nivel. La tercera fase consiste en el diseño a detalle, en donde

cada módulo, propuesto en la etapa anterior, se diseña y presenta para la siguiente fase, la implementación. En esta cuarta fase se materializa el diseño a detalle de cada uno de los módulos que está conformado el sistema. De la quinta fase a la séptima, se realizan las distintas pruebas, es decir, en la quinta fase se realizan las pruebas unitarias validándose cada etapa o módulo del sistema de manera individual. En la sexta fase se realizan las pruebas de integración, en donde el conjunto de módulos se interconecta para evaluar el funcionamiento del sistema integrado.

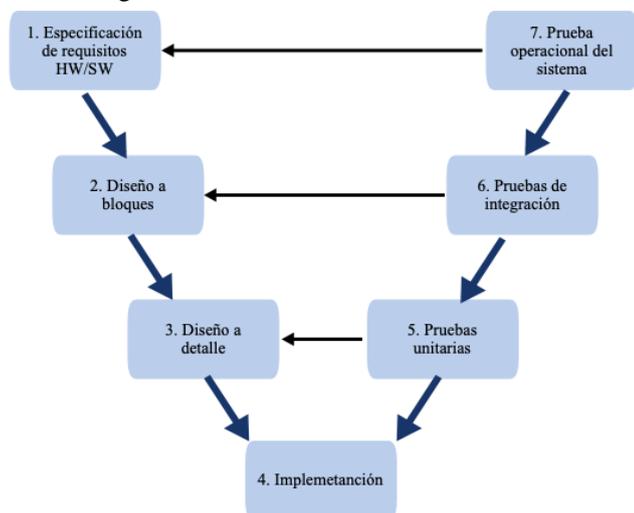


Figura 2: Diagrama a bloques del Modelo V, a detalle (Perez et al., 2006).

En la séptima y última fase se realizan las pruebas finales del sistema sobre un escenario real, es decir, en el campo de trabajo (Perez et al., 2006).

2.2. Tribómetro de perno en disco

El tribómetro de perno en disco es un aparato diseñado para proporcionar información relacionada con el frotamiento entre dos superficies; principalmente, la fuerza de fricción entre éstas, usando un arreglo característico que le da su nombre: el deslizamiento circular de un perno sobre la superficie de un disco, conocido como par tribológico (Figura 3).

Esta prueba se utiliza ampliamente en la industria bajo la norma ASTM G99-17, que cubre un ensayo de laboratorio para medir directamente el coeficiente de fricción entre las superficies de las muestras e, indirectamente, el desgaste de los materiales durante el deslizamiento (ASTM G99-17, 2016).

El instrumento objeto del presente trabajo, se desarrolló considerando los lineamientos de funcionamiento que dicta la mencionada norma:

1. El aparato debe acomodar un perno con punta redondeada o plana, perpendicular a un disco horizontal plano. El diámetro del perno puede ser de 1 cm o menor, mientras que el diámetro máximo del disco se limita a 10 cm.
2. Debe aplicar una carga mecánica de manera controlada.
3. El disco debe girar a una velocidad angular fija.
4. Debe contener elementos para medir la fuerza de fricción entre el perno y el disco.

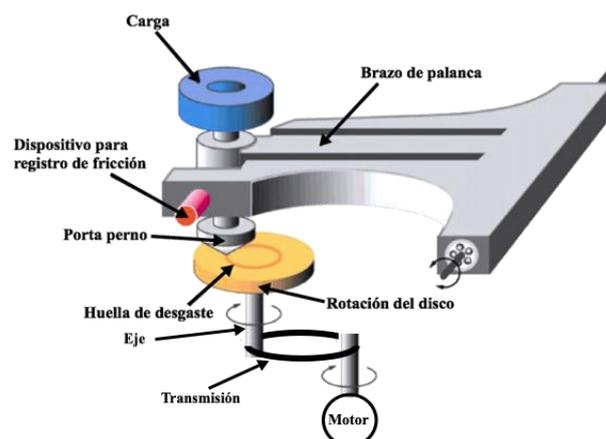


Figura 3: Esquema de funcionamiento de un tribómetro de perno en disco.

La Figura 3, muestra un dibujo esquemático de un sistema típico de prueba de desgaste *pin-on-disk* basado en la norma ASTM G99-17. El sistema consta de un eje en posición vertical, accionado por una banda desde el motor principal; éste tiene adaptado un mandril para sujetar los discos de prueba; el perno va sujeto a un brazo de palanca equipado para aplicar una carga vertical fija. La huella de desgaste en el disco es un círculo que se forma después de múltiples pasadas del perno sobre la misma pista. El aparato cuenta con un sistema para medir fuerza de fricción por medio de una celda de carga, lo que permite determinar el coeficiente de fricción.

La Tabla 1, sintetiza los parámetros funcionales que se utilizaron para el diseño e implementación del aparato, típicos de una prueba tribológica del tipo que se discute.

Tabla 1. Parámetros funcionales del Tribómetro de perno en disco (TPD) (ASTM G99-17, 2016)

Fuerza Normal	Acorde al par tribológico
Rango de fuerza de fricción	Acorde al par tribológico
Velocidad angular	De 60 hasta 600 rpm
Diámetro del perno	De 2 hasta 10mm
Diámetro del disco	De 30 hasta 100 mm
Torque máximo del motor	Acorde al par tribológico
Temperatura Ambiente	Temperatura ambiente
Medición del desgaste	Aire, Argón, Lubricante, etc. Pruebas Gravimétricas

Según la norma ASTM G99-17, los componentes deben cumplir con los requerimientos siguientes:

- Motor de velocidad variable. El aparato requiere de un motor capaz de mantener velocidad constante bajo carga, $\pm 1\%$ de la velocidad nominal del motor a carga plena. El montaje del motor debe quedar libre de vibraciones que afecten la prueba. La velocidad angular suele estar en el rango de 0.3 a 3 rad/s (60 a 600 rpm).
- Contador de revoluciones. La máquina debe estar equipada con un cuentavuelts o su equivalente, que registre el número de revoluciones del disco y, preferentemente, tener la capacidad de apagar la máquina después de un número preseleccionado de revoluciones.

- Porta muestras con perno y brazo de palanca. En un sistema típico, el porta muestras estacionario está unido a una palanca que tiene un pivote. Al agregar pesos, como una opción de carga, se produce una fuerza de prueba proporcional a la masa de los pesos aplicados. Idealmente, el pivote del brazo debe estar ubicado en el plano del contacto de desgaste para evitar fuerzas de carga extrañas debido a la fricción por deslizamiento. El soporte del perno y el brazo deben ser suficientemente rígidos como para reducir el movimiento vibratorio durante el ensayo.

La misma norma, contempla el registro de la información específica de la prueba, lo cual se logró con una interfaz máquina-humano que controla el ensayo y que registra la siguiente información:

- Materiales de prueba. Este método puede utilizarse con muchos materiales; el único requisito es que las probetas tengan las dimensiones especificadas y que soporten los esfuerzos propios a los que los sujeta el ensayo, sin que estos fallen o que se flexionen excesivamente interfiriendo en los resultados de la prueba. Debe registrarse la información de las probetas: tipo de material, dimensiones geométricas y acabado superficial; en caso necesario, también debe registrarse características como composición, microestructura, tratamientos de procesamiento y dureza.
- Probetas. El perno típico es un cilindro con punta plana o esférica, con diámetro entre 2 y 10 mm. En el caso del disco, los diámetros de las muestras oscilan entre 30 y 100 mm y tienen espesor de 2 a 10 mm.
- Acabado superficial. Para las superficies se recomienda una rugosidad de la superficie rectificada con un promedio aritmético de $0.8 \mu\text{m}$ o menor, Como las superficies ásperas dificultan la medición de la huella de desgaste, la preparación debe hacerse con cuidado para no dañar la subsuperficie y alterar las propiedades del material que afecten las mediciones tribológicas. Debe registrarse el tipo de superficie y su preparación.

Los parámetros de prueba que deben registrarse por medio de la interfaz son:

Carga. Valores de la fuerza aplicada sobre el contacto en Newtons (N).

Velocidad. La velocidad de deslizamiento entre las superficies en metros por segundo (m/s).

Distancia. La distancia de deslizamiento acumulada en metros (m).

Temperatura. La temperatura de uno o ambos especímenes en lugares cercanos al contacto (K).

Atmósfera. El medio que rodea el área de contacto (gas, humedad relativa, lubricante, etc.).

3. Diseño del sistema

3.1. Metodología propuesta

La metodología de diseño propuesta, parte del modelo V presentado en VDI Guidelines 2206 (VDI 2206, 2004) y de la metodología V, presentada en (Perez et al., 2006), pero con modificaciones y/o adaptaciones, para el diseño de sistemas mecatrónicos, como se muestra en la Figura 4.

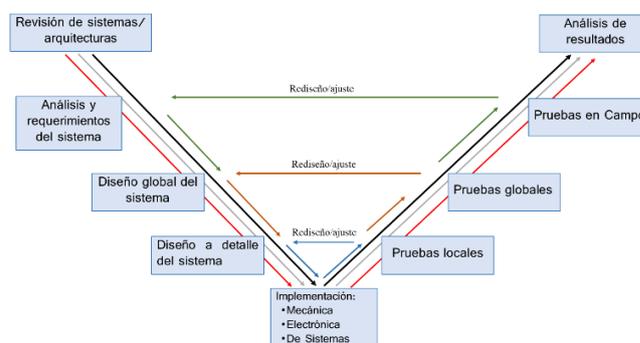


Figura 4: Metodología en V para sistemas mecatrónicos.

Esta propuesta consta de 9 fases:

Fase 1. Consiste en realizar una revisión del estado del arte. Es decir, se hace una revisión de patentes existentes, de sistemas similares o que realicen alguna función cercana a dicho proceso, como resuelven actualmente el proceso a automatizar, así como el estudio de normas o conocer las restricciones del proceso, si fuera el caso.

Fase 2. Análisis y requerimientos del sistema. Consiste en hacer un análisis del fenómeno o fenómenos que se deben investigar, controlar, así como determinar los requerimientos necesarios para el funcionamiento del sistema. En este punto se requiere conocer lo que el usuario final espera del sistema, e incluso es recomendable obtener una carta firmada por el usuario donde se acuerdan los requerimientos y restricciones, como: que información debe presentar la interfaz gráfica, características del dispositivo, entre otros accesorios.

Fase 3. El diseño global consiste en la estrategia de divide y vencerás, es decir, el diseño se divide en varios subsistemas o problemas menos complejos para así atacar uno a uno. De manera natural se dividen en la parte mecánica, electrónica y de sistemas, pero a su vez es posible dividir el problema electrónico en varios subcircuitos, el problema mecánico en varias partes y la programación en varios subprogramas. En esta etapa, es importante definir las características de las variables de cada bloque, de esta manera si se trabaja en equipo cada persona sabrá las variables, protocolos o tipos de datos y señales con los que van a interconectarse.

Fase 4. Diseño a detalle. Una vez que se tienen los bloques, módulos, subcircuitos o subprogramas se procede a diseñar cada uno de estos. Las herramientas CAD-EDA utilizadas en esta etapa son muy variadas, según la necesidad del proyecto. Para diseño con dispositivos lógicos programables (PLD), como una FPGA, es necesario software especializado para el análisis y síntesis de hardware, como el Vivado, Chipscope para la captura de datos, Quartus® Prime Design, DSP Builder, Nios® II Embedded Design Suite, además de la tarjeta de desarrollo (Intel.com). Si se plantea diseñar una placa de circuito impreso (PCB de *printed circuit board*), se emplean herramientas como EAGLE software, Altium Designer, aunque existen herramientas que incluyen varios productos, como OrCAD, que permite diseñar PCB, simular circuitos analógicos y digitales, análisis temporales y de frecuencia. Otro ejemplo es el Proteus, permite el diseño de PCB, circuitos

electrónicos y simulación de código en VHDL. Una herramienta para el diseño de maquinaria, piezas mecánicas e incluso piezas para impresoras 3D, es SolidWorks. El diseño de piezas de plástico permite evaluar la funcionalidad correcta, para después, fabricar la pieza final.

Fase 5. Implementación. En esta etapa se implementa cada uno de los módulos que constituyen el proyecto completo, además se simulan y fabrican piezas en 3D que permitan evaluar la funcionalidad de la pieza o piezas.

Fase 6. Pruebas locales. En esta etapa se verifica cada módulo diseñado, por separado, sea mecánico, electrónico o de software. Se revisan los tipos de entrada y salida, se preparan vectores de prueba. En el caso del diseño mecánico se fabricaron las piezas y se probó su funcionamiento, es decir, sólo la parte funcional y no la de resistencia. En el caso del diseño de software se probó el prototipo de la interfaz, su funcionalidad y lo intuitivo del sistema. En caso de que no funcionara alguno de los módulos se procede a realizar un reajuste del módulo.

Fase 7. Pruebas globales. En esta fase se integran o unen los distintos módulos probados anteriormente. Se revisa el correcto funcionamiento del sistema y que al integrar cada uno de los módulos realice la función para la que fue diseñada. Los módulos y pruebas se pueden hacer de manera incremental, es decir, si el sistema se dividió en 4 módulos se pueden probar primero dos módulos y después agregar otro, hasta integrar el total de los módulos.

Fase 8. Pruebas en campo. Se preparan los experimentos a realizar y se hacen pruebas funcionales y estructurales. Además, se evalúa el rendimiento y precisión del sistema.

Fase 9. Análisis de resultados. Se revisan los resultados obtenidos y se comparan con los obtenidos de otros sistemas comerciales para validar de esta manera el sistema. Se procede a registrar derecho de autor, modelo de utilidad o patente, si fuera el caso.

3.2. Revisión de arquitecturas y sistemas

Esta primera etapa es la más importante, permite conocer el fenómeno que se desea trabajar, los instrumentos que se usan y las problemáticas que existen, en este caso un Tribómetro de Perno en Disco (TPD).

Se revisaron varias patentes y productos del mercado, como son: Patente estadounidense 4,966,030, titulada: "Dispositivo para prueba de desgaste tipo perno en disco". Describe un aparato para prueba de desgaste tipo *pin-on-disk* que tiene un sensor de desplazamiento sin contacto que se mueve simultáneamente con el primer espécimen de prueba, un perno, deslizándose contra el otro espécimen de prueba, un disco. Patente Rumana RO127849, titulada; "*Pin-on-disc micro-tribometer*". Describe un micro-tribómetro de configuración perno en disco, que permite determinar el coeficiente de fricción en deslizamiento, bajo una carga normal pequeña. Consiste en un disco montado en un eje, el cual está ensamblado a un cojinete, un perno vertical soportado por un brazo que mide la carga mediante una galga extensiométrica. La carga normal se aplica de manera manual colocando pesas.

Otra patente estadounidense es la 10,151,684, de nombre: "Tribómetro de mano". Esta, describe un aparato que estima el coeficiente de fricción entre dos muestras, incluye una carcasa, una punta de medición que se extiende desde la carcasa,

también incluye un sensor de carga multi-eje dispuesto dentro del alojamiento para medir las componentes de carga que actúan sobre la punta de medición. La patente francesa FR1500941A, titulada: "Tribómetro". Esta patente se destaca por sus inconvenientes, como son: las muestras que utiliza pueden ser costosas debido a su forma compleja, algunas de forma cilíndrica con una cuña; la puesta en operación puede resultar costosa; las condiciones de prueba pueden ser insuficientes para probar materiales con una resistencia al desgaste alta, tales como cerámicos o ciertos aceros.

La patente ES2335961, titulada: "Tribómetro lineal", describe un tribómetro usado para realizar pruebas de fricción y desgaste causado por el contacto entre dos materiales con superficies sujetas a movimiento lineal. Posee un cabezal móvil y un soporte fijo. El cabezal está provisto de medios para realizar el movimiento y guiado vertical de un sensor de fuerza y el soporte está provisto de medios para realizar el movimiento y guiado horizontal del cabezal, además de un elemento de soporte paralela a la dirección de movimiento del cabezal, esto para el control del material usado.

El tribómetro TRB3 (Anton Paar, 2018), desarrollado por la compañía *Anton Paar*, se basa en un sistema TPD y lo interesante de su diseño es que el sistema mecánico tiene la función de trasladar la fuerza que genera la fricción al elemento elástico conectado al sensor LDVT y cuenta con una mesa deslizante capaz de posicionar el perno en distintos radios. Además, el sistema de posicionamiento se hace a través de guías y rodamientos axiales, un tornillo ACME mueve la mesa deslizante y cuenta con una manivela acotada con la cual se conoce exactamente el diámetro de la huella de desgaste que se va a generar.

Otro dispositivo comercial es el tribómetro T30M-HT. Es un tribómetro modular para pruebas de desgaste, fricción y lubricación, desarrollado por UTS Company (UTS Company, 2018). También se encuentra el tribómetro de la Universidad Autónoma de Nuevo León, llamado POD, que funciona bajo la norma ASTM G99 y consiste en un banco de pruebas con un brazo de palanca montado en un pivote con rodamientos de bolas, permitiendo que el brazo se mueva sin fricción (Lozano et al., 2015).

En resumen, todos los equipos presentan algún tipo de dificultad para que el usuario prepare las pruebas, además de la complejidad en la operación se presenta cuando el usuario debe realizar varias acciones previas para poner el equipo a punto y ejecutar el ensayo. De esta manera resulta interesante desarrollar un equipo que se configure y se opere de manera intuitiva y cómoda. Además, que el software desarrollado permita actualizaciones sin costo, es decir, un software de código abierto para futuras adecuaciones.

Finalmente, una fuente de información útil fue consultar al usuario final de los tribómetros y preguntar sobre las posibles adecuaciones y restricciones que existe en los equipos comerciales que utiliza para realizar su trabajo. De esta manera, se recibe una carta donde se especifican todas y cada una de las cualidades que el dispositivo debería cumplir, entre las que destacó la necesidad de aplicar una carga variable.

3.3. Análisis y requerimientos del sistema

Dentro de los requerimientos tenemos aquellos que son generales y particulares, es decir, de cada una de las etapas de ingeniería (mecánica, electrónica y de sistemas).

Los requerimientos generales se pueden resumir en:

- Cumplir la norma ASTM G99-17.
- Medir fuerza de fricción durante las pruebas.
- Contar con un software para el control de parámetros de prueba y mostrar datos durante la prueba.
- Integración mecánica de un dispositivo para el análisis del transitorio inicial de desgaste mediante luz láser esparcida.

Los requerimientos mecánicos son:

- Sistema de sujeción de perno, de diámetros: 3, 5 y 10 mm.
- Sistema de sujeción para discos de hasta 100 mm.
- Brazo de palanca para cuantificación de fuerza de fricción.
- Sistema para aplicación de la carga.

Requerimientos electrónicos:

- Sensor para la adquisición de fuerza de fricción.
- Sensor de temperatura ambiental.
- Sensor de humedad ambiental.
- Actuador para posicionamiento del brazo.
- Actuador para movimiento angular del disco.
- Sensor para cuantificar la velocidad angular del disco.
- Actuadores para posicionamiento del láser.

Requerimientos de software (interfaz y control):

- Establecer parámetros de prueba.
- Monitoreo de datos durante la prueba.
- Generar gráficas de coeficiente de fricción.
- Crear y guardar reportes de resultados.
- Realizar ciclos de calibración de la fuerza de fricción.

Con el análisis y requerimientos del sistema podemos conocer las variables a considerar, parámetros a ingresar por el usuario, velocidades de trabajo, tiempos de procesamiento y elementos a utilizar. Es importante mencionar que esta etapa es crucial en el tiempo de desarrollo. Parámetros y/o restricciones incorrectas producen mayores ajustes o rediseños del sistema.

3.4. Diseño global

Se propone el diseño global del sistema, que consiste en 3 bloques bien definidos: mecánico, electrónico y el de sistema de software, como se muestra en la figura 5.

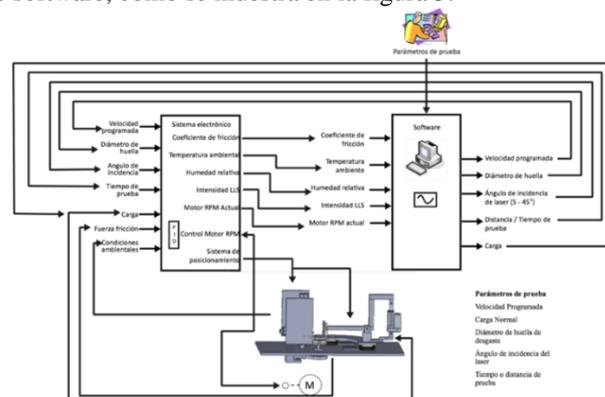


Figura 5: Diseño a bloques del sistema.

Además de la división del sistema, que de manera natural fueron tres bloques, es posible subdividir cada uno de éstos. En este caso, la parte mecánica se puede subdividir en el sistema de sujeción, el sistema de brazo de palanca y los porta pernos. La parte electrónica se divide en el sistema de procesamiento, los sensores y la etapa de potencia. Finalmente, la parte del desarrollo del sistema de software se divide en: programación de los protocolos de comunicación de los sensores, la interfaz gráfica y las rutinas de cada una de las pruebas.

3.5. Diseño a detalle

Esta fase parte del diseño global, en donde de los tres bloques mencionados anteriormente se plantearon los siguientes módulos: interfaz gráfica, de control, de condiciones ambientales, de posicionamiento, de aplicación de carga, control de servomotor, de celda de carga y de sujeción del disco. Para cada uno de estos módulos, se proponen diferentes soluciones y se evalúan considerando: requerimientos, restricciones, costos y complejidad de la implementación. Después se elige la más conveniente y se inicia con el diseño de cada una de las piezas mecánicas, circuitos electrónicos y diagramas de flujo de los programas y/o rutinas que se van a ejecutar. Ejemplos de esto son: el diagrama de flujo de la interfaz gráfica, diseño del eje de transmisión para el servomotor, el sistema de transmisión de potencia, el módulo de aplicación de la carga, el módulo de posicionamiento, el diseño de programas para la conexión del Puente H y la celda de carga, como se muestra en la Figura 6 a) y b), donde se muestra el sistema de transmisión de potencia y el módulo de aplicación de carga, respectivamente. Para realizar las piezas mecánicas y circuitos impresos (PCBs), se utilizó el software SolidWorks, para la programación el lenguaje Python y para procesar la información la computadora de placa única o SBC, Raspberry Pi.

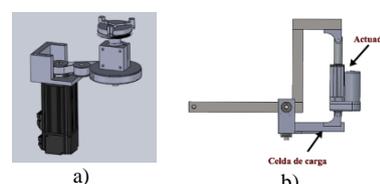


Figura 6: a) Sistema de transmisión de potencia y b) Módulo de aplicación de carga.

El módulo de aplicación de la carga consta de un actuador lineal de 12 V que realimenta la carga aplicada mediante una celda de carga. Este se simuló empleando el software MATLAB y mediante el *System Identification Toolbox* se estimó la dinámica del arreglo para la implementación del control PID (MATLAB, 2021).

3.6. Implementación

La implementación consiste en materializar en un modelo físico el dispositivo, es decir, la fabricación las piezas mecánicas, los circuitos electrónicos y la programación del sistema. Por ejemplo, algunas de las piezas mecánicas diseñadas en SolidWorks, se fabricaron primero con una impresora 3D utilizando filamento PLA, para así evaluar su funcionalidad y posteriormente fabricarlas con el material definitivo (Figura 7).



Figura 7: a) Piezas del mandril porta discos y b) Porta disco armado.

Por su parte, los módulos del servomotor (Figura 8 a)), brazo para la aplicación de carga, módulo de posición (Figura 8 b)) y celda de carga, diseñados en SolidWorks, se fabricaron con un sistema modular de perfiles de aluminio tipo Bosch.

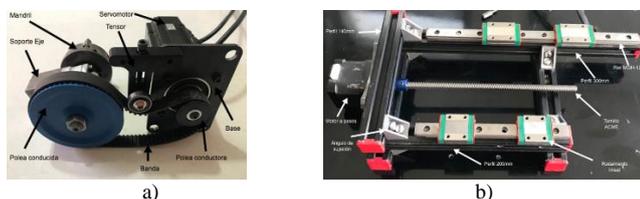


Figura 8: a) Módulo de servo motor y b) Módulo de posición.

Para la implementación de la interfaz gráfica se usó PyQt5, con el software de diseño llamado Qt Designer, como se muestra en la Figura 9. La interfaz se comunica con cada subprograma para el control y lectura de los sensores.

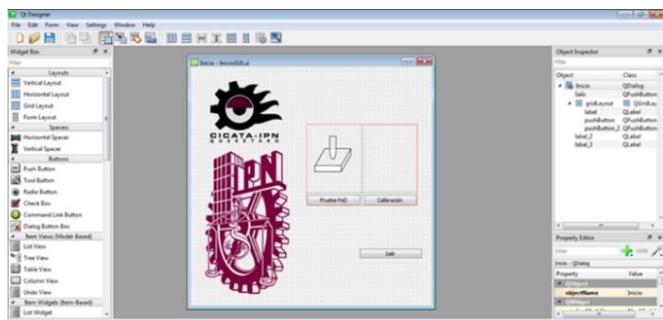


Figura 9: Interfaz gráfica usando Qt Designer.

3.7. Pruebas locales

Estas consisten en probar cada uno de los módulos por separado, es decir, se implementa un programa que sensa la temperatura y la despliega vía consola del sistema operativo, sin usar la interfaz gráfica. Otro ejemplo de esto fue la comunicación de la Raspberry Pi - *servodrive*, a través del

protocolo de comunicación Modbus RTU, esto con la finalidad de probar el módulo de servomotor. En este caso, se empleó un convertidor de RS-232 a USB, conectándose a la Raspberry Pi a través uno de sus puertos USB.

En la prueba del módulo de posicionamiento se utilizó un micrómetro con resolución de 0.01 mm, con la finalidad de verificar la posición y conocer la precisión del sistema.

Así, se realizaron las pruebas individuales a cada módulo y cuando el resultado de algún módulo no correspondía con lo esperado, siguiendo con la ruta de la metodología, se hacía un rediseño o ajuste necesario hasta alcanzar un funcionamiento correcto de cada uno de los módulos.

3.8. Pruebas globales

Estas pruebas consisten en incorporar distintos módulos hasta tener todos los módulos del sistema interconectados. Por ejemplo, suponiendo un diseño de 4 módulos donde es posible integrar los módulos de manera incremental. Es decir, unir el módulo 1 y 2, después incorporar el módulo 3, se hacen pruebas, y después se integra el módulo 4, así hasta el último módulo. En otros casos, se puede integrar el módulo 1 y 2, y de manera separada el módulo 3 y 4, para finalmente integrar los cuatro.

En este caso, la interfaz gráfica se usa como primer módulo y se van incorporando los programas que monitorean las variables y realizan el control de cada uno de los módulos hasta concluir con la prueba final de todo el sistema. Cada vez que se incorpora un módulo se realizan las pruebas necesarias que permitan comprobar el correcto funcionamiento.

La prueba global se muestra en la Figura 10. En ella se presenta la ventana de prueba de la interfaz gráfica, en donde: 1) Habilita el motor para la prueba; 2) Inicia prueba y aplica la carga; 3) Muestra los datos de la prueba que se está ejecutando; y 4) Traza las gráficas con los datos de la prueba.

En estas pruebas, se revisa la funcionalidad, y la correcta interacción de cada uno de los módulos. Las velocidades angulares de las pruebas fueron 100, 200 y 300 rpm y cargas aplicadas de 1.5×10^{-1} , 2.6×10^{-2} , 3×10^{-2} N, respectivamente, graficándose la respuesta del motor.



Figura 10: Ventana de prueba.

3.9. Pruebas de campo

Para realizar las pruebas de campo se prepararon las probetas y materiales necesarios para que la experimentación se realizara bajo condiciones reales de operación. La prueba de la Tabla 2 tiene la finalidad de conocer la precisión del dispositivo para medir la fuerza de fricción. Utilizando pesos ya conocidos, y mediante un análisis de incertidumbres, los

resultados muestran una incertidumbre absoluta máxima de las mediciones de 0.04 N.

Tabla 2. Resultados de la celda de carga.

Valor Nominal (N)	Media (N)	Incertidumbre Max (N)	DE	Fuerza (N)
0.69	0.69	0.03	0.02	0.69 ± 0.03
1.23	1.23	0.03	0.02	1.23 ± 0.03
2.75	2.74	0.03	0.02	2.74 ± 0.03
15.20	15.20	0.04	0.02	15.20 ± 0.04

La información que se presentan en la Tabla 3 muestra los parámetros de prueba a las que fueron sometidos dos discos, uno de PLA y otro acero endurecido. Con la finalidad de corroborar correcto funcionamiento y la integración de todos los módulos que componen el tribómetro.

Tabla 3. Pruebas con discos de PLA y acero endurecido.

Disco	Perno	Diam. de huella (mm)	V del motor (rpm)	Carga normal (N)	Dist. de prueba (m)
PLA impresión 3D	Balín *	20	300	15	1000
Acero endurecido	Balín *	20	150	15	1000

* Balines de 5 mm de diámetro utilizados en rodamientos.

4. Resultados

Se diseñó y construyó un tribómetro de perno en disco utilizando la metodología V propuesta, el cual se muestra en la Figura 11. El tribómetro posee los sensores y actuadores necesarios para lograr un sistema completo y funcional que cumple con la norma ASTM G99-17. durante la etapa de pruebas, además de verificar la funcionalidad e integración de cada uno de los módulos, fue posible conocer la incertidumbre de las mediciones que realiza el Tribómetro, que además de ser parte de la metodología fue de gran ayuda para validar los requerimientos planteados.

El tribómetro está en proceso de registro como modelo de utilidad, habiendo superado el examen de forma en el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial (IMPI) con expediente: MX/u/2022/000563 mediante la gestión del IPN, además el software de la interfaz gráfica ya está registrado con el certificado no. 03-2022-030812085400-01.

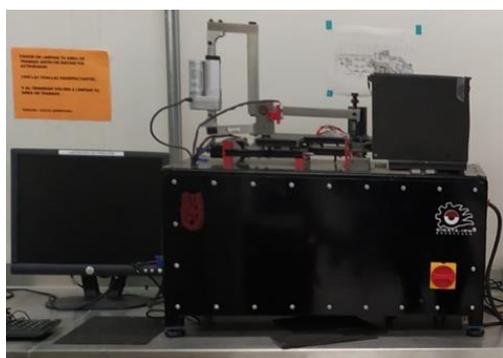


Figura 11: Tribómetro de perno en disco desarrollado

El tribómetro cumplió con los requerimientos metrológicos como: una resolución de 0.01 N, para la cuantificación de

fuerza de fricción, 0.1 N para la aplicación de la carga y $\pm 1\%$ de error máximo para la velocidad del disco.

5. Conclusiones

La metodología utilizada permitió optimizar tiempo y recursos del proceso de desarrollo del tribómetro ya que se cumplió en forma con los objetivos establecidos para el proyecto. Las pruebas unitarias permitieron evaluar cada módulo y detectar un posible fallo, previo su integración total, es decir, detectar los defectos en una etapa temprana evitando el flujo descendente de los mismos.

En concordancia con lo mencionado en el párrafo anterior, la facilidad de comprender y emplear la metodología V la hace recomendable para el desarrollo de tesis de estudiantes de licenciatura y posgrado donde existe una limitación de tiempo y recursos. Sin embargo, esta metodología también es recomendable para el desarrollo de sistemas en grupos o equipos de trabajo. La razón es que, al definir cada uno de los módulos, del total del sistema, se determinan las entradas y salidas, junto al tipo de señales, parámetros y protocolos utilizados. De esta manera, cada equipo sabe los tipos de datos que va a recibir o debe entregar, para el siguiente módulo, y diseñar un banco de señales de prueba y estandarizar el proceso de diseño. De esta manera cada grupo puede realizar cada módulo en paralelo y optimizar los tiempos de desarrollo necesarios para introducir un producto al mercado, factores claves para las empresas actuales.

Una de las desventajas de este método es la ausencia de un primer prototipo, es decir, al optimizar los recursos el primer prototipo es, después de superar todas las fases de diseño, el equipo mismo. Esto se opone al principio del prototipado rápido que, sobre todo en la industria del desarrollo de software, es utilizado para vender un producto en fase de desarrollo. Esto no es compatible con la metodología propuesta que, aunque durante la etapa de implementación se realizan prototipos intermedios de los módulos diseñados, la naturaleza de la misma hace que el dispositivo completo no sea funcional hasta culminar todas las etapas del diseño.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, bajo el proyecto SIP: 20210655.

Referencias

- Anton Paar (2018). TRB3: Tribómetro pin-on-disk. disponible en: <https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/trb3-pin-on-disk-tribometer/>. [Revisado el: 28 de Junio de 2023]
- ASTM G 99-17 (2016). "Standard Test Method Wear Test. with a Pin-on-Disk Apparatus", PA Estados Unidos, American Society for Testing and Materials.
- Bathelt, Jens, Jönsson, Anders, Bacs, Christian, Dierssen, Stefan and Meier, Markus. (2005). Applying the new VDI design guideline 2206 on mechatronic systems controlled by a PLC. International Conference on Engineering Design. ICED 05 Melbourne. August 15-18, 2005.
- Blanco-Ortega, Andrés, Magadán, Andrea, Gómez, Fabio A., Guzmán, Cesar H., y Antúnez, Edgar. (2018). Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales. Pistas Educativas, No. 130, noviembre 2018, México. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/229040955.pdf>

- Ferreira, A., Cardoso, W., Contador, J. C. Fragomeni, M.A., Goncalves, R.F., Martens, M.L. and Pereira, F.H. (2023). The “V” model for decision analysis of additive manufacturing implementation. *Journal of Manufacturing Technology Management* Vol. 34 No. 3, 2023 pp. 414-434 DOI: 10.1108/JMTM-10-2022-0377.
- Forsberg, K. and Mooz, Harold (1998). *System Engineering for Faster, Cheaper, Better*. Vol 8, Issue 1. Vancouver, BC Canada. 26-30. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1998.tb00130.x>
- Graessler, I., Hentse, J., and Bruckmann, T., (2018). V-Model for Interdisciplinary Systems Engineering. 15th International Design Conference. Serie: Design, pp. 747-756.
- Graessler, I. and Bruckmann, T., (2020). The new V-Model of VDI 2206 and its validation. *at – Automatisierungstechnik* 2020; 68(5): 312–324. DOI: <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0333>
- Lozano E., Mercado-Solís, D., Juárez-Hernandez, A., Hernández-Rodríguez, M.A.L., Garza-Montes-de-Oca, F. (2015). Wear mechanisms experienced by an automotive grade Al-Si-Cu alloy under sliding conditions, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, Vol.5, No. 3, pp. 339-345, 2015.
- MATLAB (2021). *System Identification Toolbox*. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/sysid.html>. [Revisado el: 28 de junio de 2023].
- Pardo, F. y Boluda J. (2011). VHDL. *Lenguaje para síntesis y modelado de circuitos*. 3ª edición. Ra-ma, España.
- Pelta Resano, Raquel (2013). *Tendencias en la teoría y la metodología del diseño*. Universitat Oberta de Catalunya. <http://hdl.handle.net/10609/75946>.
- Perez, A., Berreteaga, O., Ruiz de Olano, A., Urkidi, Perez Ikerlan A. J. (2006) *Una metodología para el desarrollo de hardware y software embebidos en sistemas críticos de seguridad* Sistemas, cibernética e informática. Vol. 3. No 2. 2006. ISSN: 1690-8627.
- Pietrusewicz, Krzysztof. (2019). *Metamodelling for Design of Mechatronic and Cyber-Physical Systems*. *Applied Sciences*. MDPI. Appl. Sci. 2019, 9, 376; doi:10.3390/app9030376
- Sahagún-Angulo, Rubén. (2012). *Evolución de los métodos en el Diseño Industrial*. Taller Servicio 24 Horas, UAM. ISSN: 2007-8684. Vol. 8, núm. 16, pp. 41-54.
- Sosa-Savedra, Julio C., Ortega-González, Rubén., García-Ortega Víctor H., Hernández-Tovar Rubén, y García-García Adrián L. (2020). *Desarrollo de competencias en Diseño Digital*. XII Taller Internacional Pedagogía de la Educación Superior, Universidad 2020. 14 de febrero de 2020, La Habana, Cuba.
- UTS Company (2018). *Tribometer T30M-HT*. Disponible en: <http://www.uts-design.com/index.php?page=urundetay&uid=1>. [Revisado el: 28 de junio de 2023].
- Vazquez-Santacruz, J.A., Portillo-Velez, R., Torres-Figueroa, J. et al. *Towards an integrated design methodology for mechatronic systems*. *Res Eng Design* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4>
- VDI 2206 (2004). *Design methodology for mechatronic systems, 2206*, Beuth Verlag, 2004.
- Zheng, Chen, Bricogne, Matthieu, Le Duigou, Julien, Eynard, Benoît. (2014). *Survey on mechatronic engineering: A focus on design methods and product models*. *Advanced Engineering Informatics* 28 (2014) 241–257. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.0>