



2. Metodología

2.1. Rediseño del equipo

El objetivo principal de este trabajo, fue el rediseño y automatización del tribómetro rueda de caucho y arena seca regido por la norma ASTM G65, que se encuentra ubicado en el laboratorio de tribología de la Universidad del Atlántico (Figura 14). Adicional a esto, se analizó la viabilidad de implementar la norma G105 para evaluar la resistencia al desgaste en condiciones húmedas. Como actividades para el cumplimiento de este objetivo están:

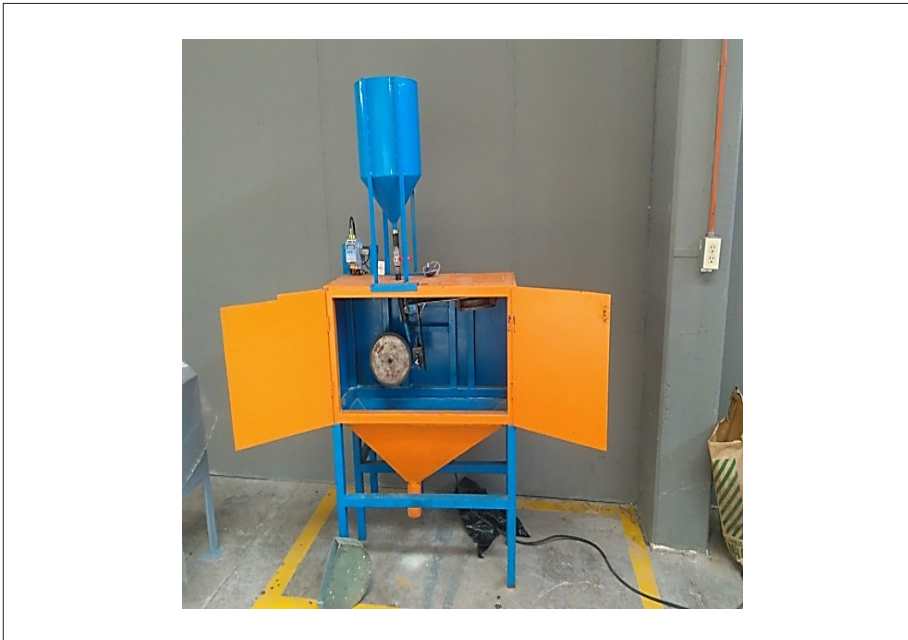


Figura 14. Tribómetro rueda de caucho y arena seca según norma ASTM G65.

2.1.1. Caracterización del equipo

Se tomaron las medidas generales del equipo, se inspeccionó cada uno de sus elementos para verificar su estado actual, se analizaron los componentes eléctricos para determinar el tipo de corriente necesaria para su accionamiento.

2.1.2. Pruebas experimentales preliminares

Se ejecutaron pruebas siguiendo las indicaciones de la normativa ASTM G-65, con las cuales se detectaron fallas en el diseño y se identificaron las mejoras necesarias para la implementación de la norma ASTM G105; además, se determinaron los elementos principales para convertir el proceso de accionamiento de forma automatizada (Figura 15a).

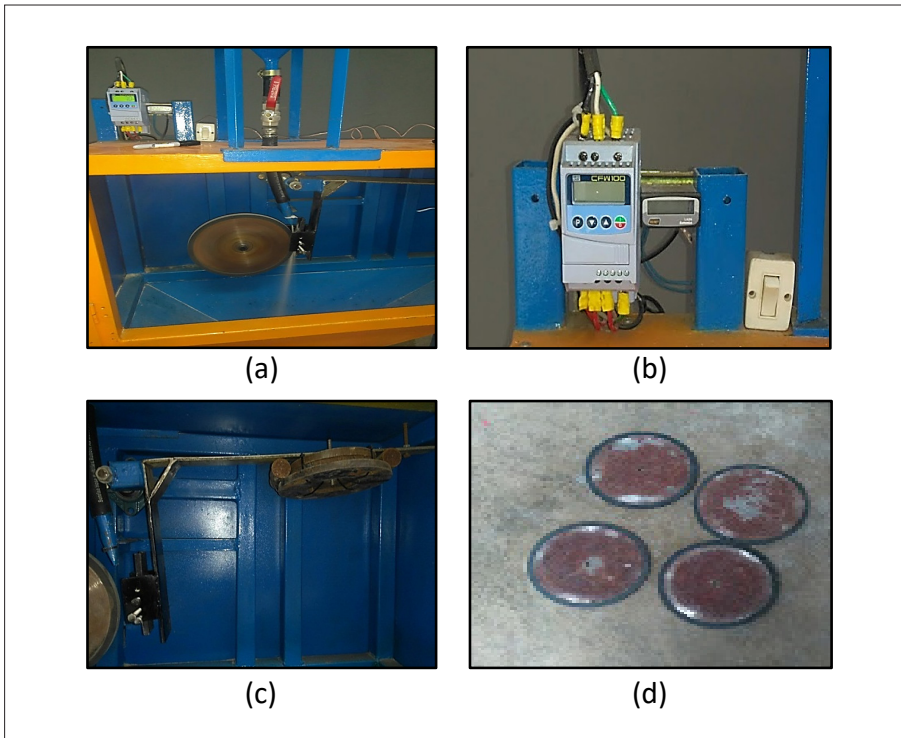


Figura 15. (a) Tribómetro en funcionamiento; (b) Variador de velocidad y contador de vueltas de tribómetro; (c) Brazo y contrapeso del tribómetro rueda de caucho y arena seca; (d) Discos de caucho del tribómetro.

Se determinó que el equipo cumplía con las condiciones mínimas para su funcionamiento. Se aplicaron los principios de la norma ASTM G65 de forma adecuada, pero, algunos de sus elementos presentaron anomalías que dificultaban el accionamiento y control del proceso.

- **Estructura:** Cuando se llevó el motor a su potencia máxima, la estructura tendió a vibrar, ya que no tenía planchuelas de estabilización en el



piso. Para corregir este detalle, se decidió cambiar la tubería cuadrada de 38 mm a 50 mm, determinación respaldada con cálculos estructurales y simulación de esfuerzos en el software SolidWorks.

- **Puerta y cubierta metálica:** La puerta no contaba con manijas para su apertura y el cerrojo no era el adecuado. No había manera de apreciar el proceso en ejecución, razón por la que se decide cambiar la puerta y la cubierta por láminas galvanizadas con espacio para láminas de acrílicos, unidas mediante tornillos.
- **Tolva de arena:** Su material era de acero al carbono calibre 16, se encontraba sujeta a la cubierta por dos pestañas en lámina de acero, se cambia el diseño y el sistema de sujeción, además de agregar un cofre en láminas de acrílico para la protección de las válvulas.
- **Variador de velocidad:** El variador que trabaja con el motor seleccionado es un modelo WEG CFW100, el cual tenía un modo vectorial (VVW), donde la operación era optimizada para el motor en uso, obteniendo en su momento, un mejor desempeño en términos de torque de regulación de velocidad, este elemento no era compatible con el PLC, por ende, se retiró del equipo (Figura 15b).
- **Contador de vueltas:** Estaba conectado a un sensor inductivo Autronics PR12-4DN, dicho sensor, era alimentado con una fuente de 24 voltios, y se encontraba en un lazo de control con el contador Autronics LA8N-BN, este brindaba la posibilidad de medir la cantidad de vueltas que se producían en el momento de la prueba. El elemento se encontró en buen estado, pero su configuración no era compatible con el PLC, razón por la que no se utiliza (Figura 15b).
- **Brazo y contrapeso:** A pesar de que el brazo cumplía con las dimensiones según la norma, no sucedía lo mismo con el contrapeso, ya que estaba compuesto de materiales de diferentes dimensiones las cuales no estaban clasificadas ni marcadas con su verdadero peso; además, lo más crítico, se evidenciaba en la forma de sujeción, ya que era con amarres plásticos y tornillos, lo que generaba una sensación de inseguridad en el agarre. Así las cosas, se determinó cambiar este mecanismo por un cilindro neumático, el cual estaría directamente conectado al sistema automatizado (Figura 15(c)).

- **Discos:** Se encontraron 5 discos con iguales dimensiones y recubrimiento, por lo que se decidió utilizar 2 para la norma ASTM G65 y modificar 3 para la norma ASTM G105, dentro de las modificaciones que se implementaron está: reducir el diámetro, cambiar el recubrimiento y agregar las aletas de agitación, todos estos cambios requeridos por la norma (Figura 15(d)).

2.1.3. Realización de inventario de los elementos del equipo: Se creó una lista de chequeo con los elementos del equipo de desgaste abrasivo “rueda de caucho y arena seca”, en la Tabla 3., se clasificaron los elementos a eliminar, cambiar o efectuar mantenimiento, esto se hizo para que el nuevo tribómetro cumpliera con las normas ASTM G65 y ASTM G105 a cabalidad, contando con la aplicación de un control de proceso automatizado.

2.1.4. Selección de los componentes para la automatización del equipo de desgaste abrasivo: En la Tabla 4 se detalla la selección de los componentes y elementos de control, acorde con la tecnología actualizada en la automatización de sistema de control.

2.1.5. Realización de un modelo CAD del equipo: A partir del software SolidWorks, se llevó a cabo el levantamiento del plano del equipo con sus materiales metalmecánicos, elementos de control y su posterior ensamble.

2.1.6. Simulaciones: Mediante el software SolidWorks, se utilizó el módulo de simulaciones estáticas de las cuales se llevaron al cabo varias. Esto con el fin de verificar en los componentes más críticos de la máquina sus cargas permisibles, y validar las deformaciones, las cargas, energía de distorsión y cuánto es el factor de seguridad de los componentes más críticos del equipo.

Tabla 3. Lista de chequeo del tribómetro arena seca y rueda de caucho.

ELEMENTOS DEL EQUIPO	¿SIRVE PARA EL NUEVO TRIBÓMETRO AUTOMATIZADO?		OBSERVACIÓN
	SÍ	NO	
Estructura metálica en tubería cuadrada de 40 mm		X	Se cambió por una nueva estructura en tubería de 50 mm.



Cubierta metálica		X	Se cambió por una nueva cubierta metálica y acrílica.
Puertas		X	Se cambió por una nueva puerta metálica y acrílica.
Tolva de arena		X	Se cambió por una tolva nueva, con un diseño diferente.
Motor trifásico y ventilador	X		Buen estado.
Variador de Velocidad		X	No es compatible con el PLC.
Contador de vueltas	X		Es compatible con el PLC.
Sensor de proximidad	X		Es compatible con el PLC.
Chumaceras		X	Se cambiaron por unas nuevas.
Eje para ruedas de caucho	X		Buen estado.
Boquilla para arena		X	Se cambió por una boquilla nueva con un diseño diferente.
Brazo		X	No es compatible con el PLC.
Contrapeso		X	No es compatible con el PLC.
Porta probeta		X	No es compatible con el PLC.
Ruedas de caucho (5)	X		Se modificaron 3 ruedas en el diámetro y recubrimiento para que fueran compatible con la norma ASTM G105.

Tabla 4. Lista de elementos del sistema de control.

ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL	OBSERVACIÓN
Pantalla HMI integrada con PLC	Permite controlar y visualizar todos los elementos de control que están ligados al sistema.
Variador de velocidad	Permite un control preciso y eficaz del motor, desde la interfaz del HMI integrado con el PLC.
Fuente de voltaje	Suministra un voltaje constante a todo el circuito del sistema de control.
Cilindro neumático	Reemplaza la función del brazo y del contrapeso del equipo anterior. Usa la fuerza del aire comprimido para extenderse y presionar la probeta contra la rueda de caucho.
Actuadores neumáticos y válvulas electroneumáticas.	Permiten la apertura y cierre del agente abrasivo para el caso de la norma ASTM G-65 y del agua para el caso ASTM G105 respectivamente.
Unidad de mantenimiento /Filtro	Realiza tres funciones básicas: regular la presión, filtrar y lubricar el aire.
Convertidor I/P	Transforma la señal eléctrica en señal neumática para usar con equipos neumáticos o accionadores de válvula.
Compresor	Permite obtener la presión necesaria, para que el cilindro neumático mantenga la probeta en el disco durante el proceso de desgaste, así como también, brinda el aire necesario para accionar los actuadores rotativos.

2.1.7. Realización de los cálculos de diseño

Se efectuaron cálculos para determinar la potencia requerida para los diferentes ensayos, con base a los resultados, se estableció que el motor existente cumplía con todas las características necesarias para la ejecución de las pruebas, además se realizaron cálculos de diseño para conocer el tamaño y forma adecuada para las tolvas de arena y agua, así como el contenedor de la norma ASTM G105.



2.1.8. Selección de materiales

Con base al inventario del equipo anterior y a los resultados que se obtuvieron en la etapa de diseño y las simulaciones, se seleccionaron los materiales para construir un equipo de ensayos de desgaste abrasivo lo más confiable posible.

2.2. Construcción del equipo

2.2.1. Desarme del equipo

Se realizó el desarme del tribómetro antiguo para la reutilización de algunos de sus accesorios (Figura 16), los elementos para el nuevo tribómetro son:

- 1 motor trifásico de 1HP marca WEG W22.
- 1 eje mecanizado de acero 4140.
- Láminas de acero galvanizado.



Figura 16. Desarme del tribómetro rueda de caucho y arena seca [Autor].

2.2.2. Compra de materiales y equipos

Posterior a la selección de todos los materiales necesarios para la construcción del equipo, se cotizaron con los diferentes proveedores para conocer la disponibilidad, costos y se procedió a la compra de estos.

2.2.3. Fabricación de los elementos del equipo mediante maquinado

Para cumplir con el adecuado funcionamiento del equipo, algunos de los componentes se diseñaron con una variedad de forma y tamaño, los cuales no se encontraban en el mercado, razón por la cual, fue necesaria su fabricación mediante diferentes procesos de manufactura.

2.2.4. Ensamble del equipo

El montaje del equipo se hizo por medio de uniones rígidas y desmontables. Las uniones desmontables se utilizaron con el fin de que el equipo cuente con piezas intercambiables y pueda cumplir con los parámetros de las normas ASTM G65 y ASTM G105, adicional a esto, se realizó el montaje según las normativas el ensamble de los elementos de control y los elementos tribológicos.

2.3. Programación e implementación del ciclo de automatización del equipo

El sistema de control se enfocó hacia las diferentes variables que genera él mismo, dentro de estas se encuentran el flujo de arena y de agua (dependiendo de la norma), la velocidad de giro apropiado del motor, la carga aplicada en la probeta contra el disco durante el ensayo, entre otras nuevas características manejadas a través de un PLC debidamente posicionado en el equipo.

2.4. Verificación del funcionamiento del equipo

2.4.1. Preparación de probetas

Para adelantar las pruebas en el tribómetro de desgaste según las normas ASTM G65 y ASTM G105, se puede disponer de cualquier tipo de materiales metálicos que posean diferentes durezas. En este caso, para validar el equipo, se utilizaron tres materiales que fueron sometidos a diferentes procedimientos según su dureza y resistencia a la abrasión; así como también, se evaluó que los especímenes tuvieran las medidas correspondientes a su norma y que están soportados en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de las probetas utilizadas en este trabajo.

Material	Norma de desgaste	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)
Acero inoxidable	ASTM G-65	25.4	76.2	3.2 - 12.7
Aluminio	ASTM G-65	25.4	76.2	3.2 - 12.7
Acero 4140	ASTM G-105	25.4	57.2	6.4 - 15.9



Para la preparación de las probetas, se utilizaron máquinas convencionales y de control numérico computarizado (CNC) para desbastar el material y darle el acabado superficial requerido (Figura 17).

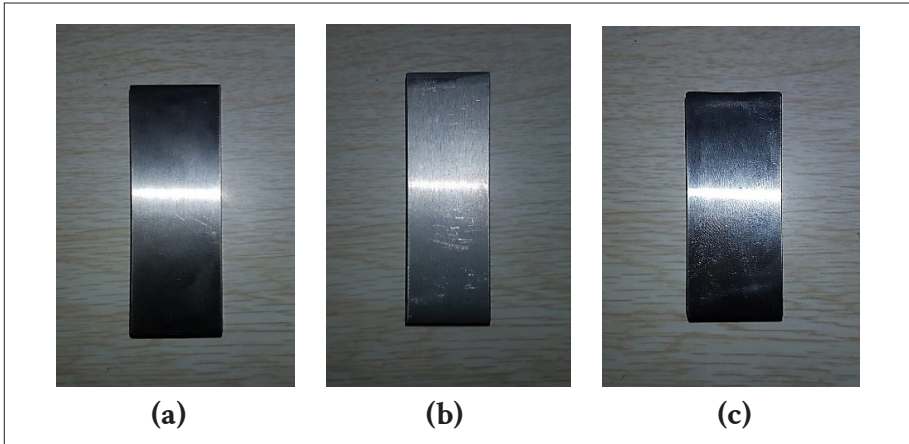


Figura 17. (a) Probeta de acero inoxidable martensítico AISI 403; (b) Probeta de aluminio; (c) Acero AISI 4140.

2.4.2. Parámetros de prueba

El desarrollo de las pruebas según la norma ASTM G-65, describe dos procedimientos de pruebas (B y E) y la norma ASTM G105, refiere un solo procedimiento, en donde se efectúan 4 ensayos con diferentes discos. Estos parámetros están descritos en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de prueba.

Procedimiento	Fuerza aplicada (N)	Revoluciones (rev)	Velocidad (RPM)	Abrasión lineal (m)
B	130	2000	200	1436
E	130	1000	200	718
Ensayos 1,2,3,4	222	1000	245	558

2.4.3 Preparación de la máquina

Se realizaron los ajustes para la preparación de la máquina con los elementos de desgaste pertenecientes a las normas ASTM G65 y ASTM G105. En el caso de la ASTM G65, se tiene en consideración un disco de

228.6 mm de diámetro y la porta probetas G65 para ajustar la muestra con las medidas de la norma y hacer el proceso con la arena seca (Figura 18a). Para la ASTM G105, se tienen configurados elementos como el disco de 177.8 mm de diámetro, la porta probetas G105 para asegurar la muestra durante el proceso y el contenedor de la mezcla para presentar el desgaste con la arena húmeda (Figura 18b).

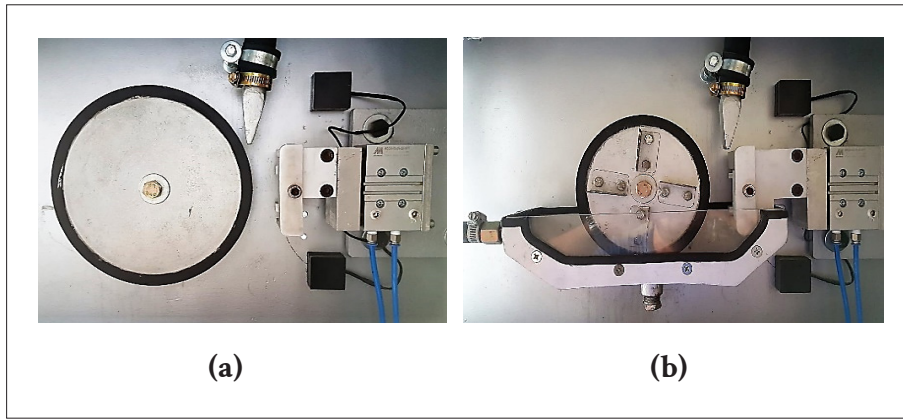


Figura 18. (a) Montaje completo de los elementos G65; (b) Montaje completo de los elementos G105.

2.4.4. Ajuste de programación

En la pantalla del PLC, se programó el tipo de norma y las respectivas variables del proceso de desgaste. La ASTM G65, posee 5 procedimientos, cada uno tiene sus parámetros establecidos y dictados por la norma (Figura 19a), se eligió el procedimiento correspondiente a el tipo de material que va a ser objeto de estudio, alineado a las características de los alcances de esta norma. La ASTM G105, tiene 4 ensayos, todos con los mismos parámetros establecidos y dictados por la norma, la diferencia es, que, en cada ensayo se utilizó un disco de dureza diferente, los dos primeros ensayos se adelantaron con el mismo disco de dureza Shore A50, el ensayo 3 se ejecutó con un disco de dureza Shore A60 y, finalmente, el ensayo 4 se realizó con un disco de dureza Shore A70 (Figura 19b).



Figura 19. (a) Pantalla de la norma G65; (b) Pantalla de la norma ASTM G105.

2.4.5. Ejecución de las pruebas experimentales

Se cumplieron diferentes pruebas técnicas mediante la verificación de las normas ASTM G65 y ASTM G105, para realizar la puesta en marcha involucrando todos los factores que se relacionaron de manera directa con el proyecto.

