

<https://doi.org/10.23913/reci.v13i25.113>

Artículos científicos

Estudio Gage R&R para la validación de un prototipo de sistema de medición de ángulos de contacto

Gage R&R study for the validation of a contact angle measurement system prototype

Estudo Gage R&R para a validação de um protótipo de sistema de medição de ângulo de contato

Francisco Fabián Tobias Macías

Instituto Tecnológico de Piedras Negras, Tecnológico Nacional de México, México

fabian_z_zz@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2639-5341>

Félix Fernando de Hoyos Vázquez

Instituto Tecnológico de Piedras Negras, Tecnológico Nacional de México, México

felixdehoyos@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7876-8026>

Diego de Jesús Losoya Sifuentes

Instituto Tecnológico de Piedras Negras, Tecnológico Nacional de México México

diegojlosi@live.com.mx

<https://orcid.org/0009-0006-6885-416X>

Carlos Patiño Chávez

Instituto Tecnológico de Piedras Negras, Tecnológico Nacional de México, México

patino_c@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-2058-0181>

Paula Graciela Vázquez de la Garza

Instituto Tecnológico de Piedras Negras, Tecnológico Nacional de México México

paulaitpn@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-0446-8030>



Resumen

En el proceso de desarrollo de un nanorecubrimiento o un recubrimiento hidrofóbico, se debe medir y verificar distintivos parámetros para asegurar su eficacia y funcionamiento adecuado. Este procedimiento adquiere una importancia significativa, ya que determinará el éxito o fracaso del producto en comparación con sus competidores. Entre los parámetros relevantes se encuentra el ángulo de contacto entre el fluido y la superficie, el cual proporcionará información acerca de la capacidad de repeler el líquido por parte de la fórmula desarrollada por la empresa, lo cual sirve para determinar su calidad o la necesidad de perfeccionamiento. Por eso, la presente investigación tiene como objetivo proponer una alternativa de solución que sea mediante un estudio Gage R&R para que luego sea estandarizada para generar mejoras económicas. Para ello, se diseñó una investigación mixta de carácter explicativo y correlacional, con enfoque cuantitativo. A pesar de la existencia de un amplio campo de investigación y oportunidades de aplicación en el estudio de los ángulos de contacto en la actualidad, se observa una carencia de herramientas o soluciones específicas para estudiar y medir este principio, lo cual debe ser atendido para abordar el estudio y la evaluación de dicho fenómeno.

Palabras clave: ángulo de contacto, estudio Gage R&R, alternativa, recubrimientos hidrofóbicos.

Abstract

When developing a Nanocoating or a Hydrophobic Coating, the measurement and verification of different parameters is required to ensure its operation and efficiency, because this will mark the success or failure of the product compared to its competitors, one of them is the contact angle between the fluid and the surface, which will let us know how much the formula developed by the company repels the liquid, defining whether it is good or needs to be improved. This research seeks to propose an alternative solution validated through a Gage R&R study that can later be standardized and represents an economic improvement. It is a mixed investigation of an explanatory and correlational nature, and with a quantitative approach.

At present there is still a wide field of research and application opportunities in the study of contact angles. However, there are few tools or solutions to study and measure this principle, leaving gaps when studying and evaluating it.

Keywords: contact angle, Gage R&R study, alternative, hydrophobic coatings.

Resumo

Ao desenvolver um Nanocoating ou um Coating Hidrofóbico, é necessária a medição e verificação de diversos parâmetros para garantir seu funcionamento e eficiência, pois isso marcará o sucesso ou o fracasso do produto em relação aos seus concorrentes, um deles é o ângulo de contato entre o fluido e a superfície, que nos informará o quanto a fórmula desenvolvida pela empresa repele o líquido, definindo se está bom ou precisa ser melhorado. Esta pesquisa busca propor uma solução alternativa validada por meio de um estudo Gage R&R que posteriormente pode ser padronizada e representa uma melhoria econômica. É uma investigação mista de natureza explicativa e correlacional, e com abordagem quantitativa. Atualmente ainda existe um amplo campo de pesquisa e oportunidades de aplicação no estudo dos ângulos de contato. No entanto, existem poucas ferramentas ou soluções para estudar e mensurar esse princípio, deixando lacunas na hora de estudá-lo e avaliá-lo.

Palavras-chave: ângulo de contato, estudo de medidor r&r, alternativa, revestimentos hidrofóbicos.

Fecha recepción: Agosto 2023

Fecha aceptación: Enero 2024

Introducción

Muchas investigaciones se han enfocado en la obtención de recubrimientos superhidrofóbicos, los cuales presentan una elevada capacidad de repelencia al agua. Este interés se sustenta en las consecuencias que puede acarrear el contacto del agua con la superficie de determinados materiales, así como en las diversas aplicaciones que han surgido para este tipo de recubrimiento. Los recubrimientos superhidrofóbicos son materiales con la habilidad de repeler agua que se caracterizan por alcanzar valores de ángulos de contacto iguales o superiores a los 150° , entre distintos parámetros (Adak *et al.*, 2019; Bayer, 2020; Lin *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2020). Esta combinación de propiedades permite que al depositar una gota de agua sobre la superficie recubierta mantenga una forma esférica, ya que su estabilidad depende del grado de hidrofobicidad para permitir un deslizamiento relativamente fluido sobre la superficie al inclinarla.

La investigación de este fenómeno se inició en la década de los setenta, y en la década de los noventa Wilhelm Barthlott patentó el principio del “efecto loto” utilizando nanotecnología. El interés por emular este efecto natural fue motivado por la búsqueda de



superficies que no se mojan y la capacidad de autolimpieza, aunque cabe mencionar la necesidad de perfeccionar aún más las características de estos recubrimientos, incluyendo el ángulo de hidrofobicidad o de contacto (Conantec, 2018).

Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo proponer una alternativa de solución, la cual será validada mediante un estudio Gage R&R y posteriormente estandarizada para representar una mejora económica. Para ello, son cruciales la correcta definición del sistema y su debida interpretación, respaldada por un completo entendimiento de los objetivos y necesidades del estudio, ya que una redacción inadecuada del sistema o una interpretación equivocada pueden resultar en problemas y afectar la definición de los elementos que representan las entradas en el sistema. Esto, a su vez, afecta su participación y relación en el proceso, e influir en la obtención de una salida como resultado de la transformación o uso de los elementos seleccionados, junto con la metodología aplicada.

Además, la realización del muestreo o estudio puede resultar incorrecta, lo que afectaría la calidad de la información para su análisis y presentación posterior. En el caso específico abordado en esta investigación, se destaca la importancia de definir, mediante una metodología de sistema, los elementos necesarios que se relacionarán y permitirán la transformación de la información a muestrear. Esto es crucial para llevar a cabo un estudio Gage R&R, ya que la ausencia de medios adecuados para medir y controlar las especificaciones en un proceso puede resultar en fallas en las mediciones de posibles variables, lo que comprometería el aprovechamiento de los recursos disponibles.

El sistema de medición, por tanto, representan los ojos a través de los cuales se observa la calidad, de ahí que sea esencial para evaluar el comportamiento de los procesos. En tal sentido, los instrumentos de medición deben llevar a cabo mediciones confiables que no generen falsas alarmas en relación con la calidad de producción. En otras palabras, sin un sistema de medición confiable, es imposible determinar si se está logrando una producción de buena calidad (Vinasco Isaza, s. f.).

Sin embargo, realizar este estudio no se limita únicamente a contar con los recursos materiales necesarios, pues también implica poseer conocimientos específicos que faciliten la comprensión de la interrelación entre las diversas variables o factores que definen el estudio. En este contexto, la repetibilidad y reproducibilidad son conceptos clave, y se definen de la siguiente manera:

- **Repetibilidad:** Indica en qué medida la variabilidad en el sistema de medición es causada por el dispositivo de medición en sí.

- **Reproducibilidad:** Se refiere a en qué medida la variabilidad en el sistema de medición es atribuible a las diferencias entre los operadores involucrados en el proceso (Minitab, 2021).

Una vez se ha alcanzado una comprensión de la relación entre los factores involucrados y su presencia en el estudio, así como de sus responsabilidades es posible identificar las fuentes de variación presentes en el prototipo del sistema de medición de ángulos de contacto. Este paso es fundamental para llevar a cabo correcciones necesarias, lograr su validación y utilizarlo efectivamente en la medición de ángulos de contacto en el desarrollo de recubrimientos.

En concreto, con esta investigación se procura desarrollar un sistema de medición de ángulos de contacto de un líquido sobre una superficie. Para ello, se busca obtener resultados en el estudio de medición Gage R&R con un porcentaje de variación inferior al 10 % con el propósito de proponer una alternativa para aquellos que necesiten realizar estudios de ángulos de contacto en situaciones específicas.

Ahora bien, para plantear posibles soluciones se formularon las siguientes preguntas:

1. ¿Qué elementos tienen una participación directa en el proceso de desarrollo del sistema?
2. ¿Qué factores se toman en cuenta en el estudio Gage R&R?
3. ¿Cómo se relacionan las variables con los factores considerados en el estudio y cómo contribuyen a su validación?

Objetivo

Desarrollar un sistema de medición de ángulos de contacto entre un líquido y una superficie sólida, con resultados en el estudio de medición Gage R&R menores al 10 % de variación.

Metodología

Inicialmente se optó por un enfoque de investigación mixta, ya que esta aborda tanto problemas teóricos como prácticos. Asimismo, se recurrió a la investigación documental y experimental para efectuar una revisión inicial de información validada que sirviera como sustento teórico. Posteriormente, con base en el conocimiento adquirido, se procedió a definir los cambios necesarios y a implementarlos mediante experimentación.

Por otra parte, el enfoque de investigación explicativa fue elegido debido a que el objetivo no se limita a describir o aproximarse al problema, sino que se busca identificar sus causas subyacentes para dar cuenta del porqué del objeto de estudio. Además, se empeló la investigación correlacional, ya que se buscaba medir el grado de relación existente entre dos o más conceptos o variables. En este caso, se investigaba cómo funcionaba la repetibilidad y reproducibilidad, analizando su interrelación y su impacto en el estudio Gage R&R.

Finalmente, como pilar fundamental de los experimentos, y especialmente en lo que respecta a su diseño, se adoptó un enfoque de investigación cuantitativa, respaldado por los diseños experimentales implementados.

En la toma de decisiones sobre el tamaño de muestra con el cual se trabajaría, y ante la falta de variables suficientes para realizar un cálculo exacto, se basó en la recomendación proporcionada por el soporte web de la herramienta estadística utilizada, que en este caso fue Minitab. Para el estudio Gage R&R, Minitab 2021 sugiere lo siguiente:

Utilice un sistema cruzado de R&R del equipo de medición para evaluar la variación en el sistema de medición cuando todos los operadores miden cada parte del estudio. Para realizar este estudio, debe tener un diseño equilibrado con factores aleatorios. Selecciona 10 partes como mínimo que representan el rango esperado de la variación del proceso. Para el estudio, tres operadores miden las 10 partes, tres veces por parte, en orden aleatorio (párr. 1).

Con base en lo expuesto anteriormente, se tomó la decisión de mantener la misma configuración del experimento, pues se consideró que solo se contaba con 3 operadores, así como restricciones de tiempo.

En este contexto, se llevaron a cabo diversos diseños de experimentos utilizando Minitab. El objetivo era realizar muestreos con distintas corridas, aplicar estudios de medición Gage R&R y evaluar los resultados con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos. Como se mencionó previamente, en el diseño de experimentos participaron 3 operadores, cada uno midiendo 10 piezas en 3 ocasiones. Con este diseño, se llevaron a cabo los estudios correspondientes.

Aplicando un enfoque basado en sistemas, la formulación del problema y su resolución se planteó de la siguiente manera:

Entradas

- Materiales (sustrato y fluido)
 - Sustrato: Cristal
 - Fluido: Agua desionizada
- Componentes de laboratorio
 - Gotero
 - Medidores de pH y ppm
- Softwares
 - Aplicación de la cámara por defecto en Windows
 - Microsoft Power Point
 - ImageJ
 - Minitab
- Estructura de medición
 - Base de acrílico
 - Soportes para sustrato
 - Cámara
 - Caja oscura con su “plataforma”
 - Soportes reguladores para la caja oscura
- Características de los materiales
 - pH del agua
 - ppm del agua

Proceso

- Procedimiento de caracterización del agua
- Preparación de los materiales
- Diseño y fabricación de estructura de medición
- Prueba de funcionamiento de estructura, cámara y softwares
- Deposición del fluido
- Toma de fotografías
- Edición de fotografías
- Medición de ángulos de contacto
- Diseño de hoja de trabajo en Minitab
- Tratamiento de los datos



- Validación del sistema de medición

Salidas

- Proceso y sistema disponible para su mejora y/o estandarización

Marco teórico

Sistemas de medición

El término *sistema* se refiere a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes que son necesarios para llevar a cabo una o varias funciones. En el caso de los sistemas de medida, la función principal es la asignación objetiva y empírica de un número a las propiedades o cualidades de un objeto o evento, de manera que estas puedan ser descritas. En otras palabras, el resultado de la medida debe cumplir con tres características clave: ser independiente del observador (objetivo), basarse en la experimentación (empírica) y establecer una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas.

Los objetivos de la medida pueden abarcar desde la vigilancia o seguimiento de procesos hasta el control de un proceso, como en el caso de un depósito. También puede responder a necesidades específicas de la ingeniería experimental (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

En el ámbito de los sistemas de medición, se debe tener en cuenta todo lo que influye en la medición de una parte, lo cual incluye dispositivos de medición, procedimientos de medición y operadores (Minitab, 2021).

Calidad de los datos de medición

La calidad de los datos de medición se define mediante las propiedades estadísticas de múltiples mediciones obtenidas de un sistema de medición que opera en condiciones estables. Supongamos, por ejemplo, que un sistema de medición, operando bajo condiciones estables, se utiliza para obtener varias medidas de una característica específica. Si todas las mediciones están “cerca” del valor maestro para dicha característica, se considera que la calidad de los datos es “alta”. De manera análoga, si algunas o todas las mediciones están “muy lejos” del valor maestro, se dice que la calidad de los datos es “baja”. Las propiedades estadísticas más comúnmente empleadas para caracterizar la calidad de los datos son el sesgo y la varianza del sistema de medición.

El sesgo se refiere a la ubicación de los datos en relación con un valor de referencia (maestro), mientras que la varianza tiene que ver con la dispersión de los datos. Gran parte de la variación en un conjunto de mediciones puede deberse a la interacción entre el sistema de medición y su entorno, lo que dificulta la interpretación de los datos y hace que el sistema de medición sea menos deseable. Si la interacción genera demasiada variación, la calidad de los datos puede ser tan baja que estos resulten inútiles. La gestión de un sistema de medición implica en gran medida el monitoreo y control de la variación. Entre otras cosas, esto implica enfocarse en comprender cómo el sistema de medición interactúa con su entorno para garantizar la generación de datos de calidad aceptable (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

Análisis del sistema de medición

El análisis del sistema de medición constituye un método para determinar la aceptabilidad de un sistema de medición, de ahí que sea un componente crítico en cualquier proceso orientado a mejorar la calidad. Para una variable de respuesta continua, se emplea el análisis del sistema de medición con el fin de determinar la proporción de la variación total que proviene del propio sistema de medición. En el caso de una variable de respuesta de atributo, este análisis se utiliza para evaluar la consistencia y exactitud de los evaluadores.

En tal sentido, es esencial llevar a cabo la evaluación del sistema de medición antes de recurrir a herramientas como gráficos de control, análisis de capacidad u otros análisis. Esto se realiza con el propósito de verificar que el sistema de medición sea preciso y preciso, y que los datos generados sean confiables (Minitab, 2021).

Exactitud y precisión

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) define la exactitud de la medida como la proximidad existente entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando. Así pues, una medición se considera más exacta cuanto menor sea el error de medida. Si bien se suele afirmar que una medida es más exacta cuando presenta una incertidumbre de medida más pequeña, no siempre es el caso, como se mencionó anteriormente.

Por otra parte, el VIM define la precisión de medida como la proximidad existente entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones específicas. Estas condiciones se denominan principalmente *condiciones de repetibilidad* o *de reproducibilidad*. En muchas ocasiones, el término *precisión* se asocia específicamente a la repetibilidad, es decir, está vinculado a la

dispersión de las mediciones repetidas. Esta dispersión se expresa comúnmente mediante medidas estadísticas como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

La exactitud y la precisión son dos características fundamentales de un sistema de medición aceptable.

Exactitud

La exactitud se refiere a qué tan cerca están del valor real las mediciones de un sistema de medición.

Precisión

La precisión en el contexto de un sistema de medición se refiere a qué tan cercanas están las mediciones entre sí. Es importante destacar que un sistema de medición puede exhibir cualquier combinación de exactitud y precisión. La exactitud de un sistema de medición consta de tres componentes principales: sesgo, linealidad y estabilidad. Por otro lado, la precisión de un sistema de medición incluye dos componentes clave: repetibilidad y reproducibilidad. Estos componentes pueden ser analizados exhaustivamente a través de diversos estudios del sistema de medición.

La integridad de los datos está intrínsecamente vinculada a la integridad del sistema de medición. En caso de identificar problemas relacionados con la exactitud y precisión, es crucial mejorar el sistema de medición para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos (Minitab, 2021).

Estudio Gage R&R

Si una empresa no dispone de los medios adecuados para medir y controlar las especificaciones requeridas, es posible que incurra en fallas en las mediciones relacionadas con variables como cantidad, diámetro, peso, resistencia, humedad, dureza, entre otras. Estas deficiencias pueden tener un impacto directo en la satisfacción del cliente y en sus intereses, así como generar errores que afectarán las utilidades de la empresa.

El sistema de medición en una empresa representa los ojos a través de los cuales se evalúa la calidad, de ahí que los instrumentos de medición deban realizar mediciones confiables que no den lugar a falsas alarmas en relación con el comportamiento de los procesos. La carencia de un sistema de medición confiable impide determinar si la producción se lleva a cabo con buena calidad, (Vinasco Isaza, s. f.).

Un método de análisis del sistema de medición (MSA) que resulta valioso en la evaluación de la precisión del sistema de medición y en la estimación de la repetibilidad y reproducibilidad es el estudio de R & R de Gage. Este ayuda a responder preguntas fundamentales, tales como si la variabilidad del sistema de medición es pequeña en comparación con la variabilidad del proceso, cuánta variabilidad en el sistema de medición se atribuye a las diferencias entre operadores y si el sistema de medición es capaz de discriminar entre distintas partes (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

Un estudio R&R del sistema de medición ayuda a investigar lo siguiente:

- Repetibilidad: Qué tanto de la variabilidad en el sistema de medición es causada por el dispositivo de medición.
- Reproducibilidad: Qué tanto de la variabilidad en el sistema de medición es causada por las diferencias entre los operadores.
- Si la variabilidad del sistema de medición es pequeña en comparación con la variabilidad del proceso.
- Si el sistema de medición es capaz de distinguir entre partes diferentes (Minitab, 2021).

Los estudios de Gauge proporcionan información valiosa sobre el rendimiento de los procesos y son herramientas fundamentales en el control de calidad, así como en la identificación de fuentes de variación. Por tanto, esos estudios constituyen una herramienta esencial para adquirir conocimiento acerca del desempeño de los procesos. El objetivo central de un estudio Gauge R&R es comprender las fuentes de variabilidad presentes en un proceso de medición, lo cual representa la base para diversas aplicaciones, incluyendo la operación eficiente de procesos, la compensación de variabilidad, la evaluación del desempeño de los procesos, el control de calidad y el aislamiento de productos defectuosos, especialmente en entornos de manufactura (Castañeda Hernández *et al.*, 2021).

Relación señal a ruido

El número de categorías distintas es una métrica utilizada en los estudios R&R del sistema de medición para evaluar la capacidad de dicho sistema para detectar diferencias en la característica medida. Así, puede entenderse como la cantidad de grupos dentro de los datos del proceso que el sistema de medición puede discernir, lo cual representa el número de distintas categorías que realmente puede distinguir.

Para tales efectos, se recomienda un valor de 5 o superior, ya que un valor inferior a 2 indica que el sistema de medición no está monitoreando adecuadamente el proceso (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

Por otro lado, la relación señal a ruido mide cómo varía la respuesta en relación con el valor nominal u objetivo bajo condiciones de ruido diferentes (Minitab, 2021).

Variación del sistema de medición

Como cualquier otro proceso, un sistema de medición está sujeto a la variación, que puede ser de causa común o especial. Para controlar la variación en el sistema de medición, es necesario identificar las fuentes de variación y luego eliminar o reducir estas diversas causas asociadas con el proceso de medición. Las posibles fuentes de variación abarcan instrumentos de medición, estándares, procedimientos, *software*, componentes ambientales, entre otros (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

La variación del sistema de medición es la variación que se produce al medir algo. Específicamente, esta variación es la suma de la variación causada por la repetibilidad y la reproducibilidad del sistema de medición. Cualquier componente del sistema de medición, como un dispositivo de medición, un procedimiento o un *software*, puede ser una fuente de variación (Minitab, 2021).

Estabilidad

La estabilidad de las mediciones se refiere al cambio del sesgo a lo largo del tiempo, lo cual representa la variación total de las mediciones de la misma parte realizadas en distintos momentos. Esta variación en el tiempo se conoce como *cambio gradual*.

Para monitorear la estabilidad de un proceso de medición, se puede utilizar una gráfica de control, lo cual implica medir una parte principal o de control con el mismo sistema a lo largo del tiempo. Al tomar las mediciones, los puntos que permanecen dentro de los límites indican que el proceso no ha experimentado cambios significativos, mientras que los puntos fuera de los límites sugieren un cambio en el proceso.

El conocimiento del equipo y las condiciones de medición es esencial para identificar posibles causas especiales cuando el sistema muestra inestabilidad (Minitab, 2021).

Repetibilidad

La repetibilidad se refiere a la variación en las mediciones obtenidas con un instrumento de medida cuando se utiliza varias veces por un evaluador mientras mide la misma característica en la misma parte. Esta variación representa la capacidad intrínseca del equipo en sí. Aunque comúnmente se denomina *variación del equipo*, esto puede resultar engañoso. La repetibilidad, de hecho, es la variación de la causa común en sucesivas pruebas bajo condiciones definidas de medición. Por tanto, el término más preciso para describir la repetibilidad es la variación dentro del sistema cuando las condiciones de medición están establecidas y definidas con la parte fija, instrumento, estándar, método, operador, medio ambiente y suposiciones.

Además de la variación dentro del equipo, la repetibilidad también abarcará cualquier variación proveniente de cualquier condición en el modelo de error (Tapia Esquivias *et al.*, 2019). La repetibilidad es la variación causada por el dispositivo de medición, y se manifiesta cuando el mismo operador mide la misma parte en repetidas ocasiones, utilizando el mismo sistema de medición y en condiciones idénticas.

Para estimar la repetibilidad de una medición A, el operador 1 realiza 20 mediciones de una sola pieza con el sistema de medición A. De manera similar, para estimar la repetibilidad de una medición B, el operador 1 realiza 20 mediciones de una sola pieza con el sistema de medición B. Al comparar los resultados, se puede determinar que el sistema de medición A exhibe una menor variación, lo que indica que es más repetible en comparación con el sistema de medición B (Minitab, 2021).

Reproducibilidad

La reproducibilidad se refiere a la variación causada por el sistema de medición. Esta variación es evidente cuando diferentes operadores realizan mediciones repetidas de la misma parte, utilizando el mismo sistema de medición y bajo condiciones idénticas.

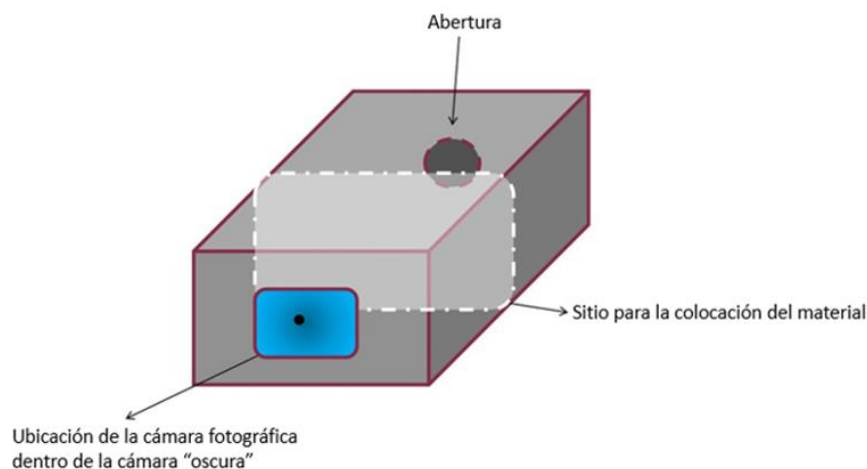
En un escenario donde los operadores 1, 2 y 3 miden 20 veces la misma parte con el mismo sistema de medición, se puede evaluar la reproducibilidad (Minitab, 2021). Tradicionalmente conocida como la variabilidad “entre evaluadores”, la reproducibilidad se define generalmente como la variación en el promedio de las mediciones realizadas por diferentes evaluadores utilizando el mismo instrumento de medición al medir la misma característica en la misma parte. Este concepto es especialmente aplicable a instrumentos manuales influenciados por la habilidad del operador. Sin embargo, en procesos de medición

automatizados, donde el operador no es una fuente significativa de variación, la reproducibilidad se considera como la variación promedio entre sistemas o entre condiciones de medición (Tapia Esquivias *et al.*, 2019).

Resultados

Se logró el desarrollo de un prototipo (figura 1) para un sistema de medición de ángulos de contacto, previamente validado mediante un estudio de repetibilidad y reproducibilidad. Este prototipo utiliza una cámara “oscura” especialmente diseñada para capturar imágenes de alta calidad. Con el respaldo de un *software* de medición, este sistema ofrece una opción más económica y práctica al momento de evaluar o medir el ángulo de contacto durante el desarrollo o uso de un recubrimiento hidrofóbico.

Figura 1. Primer diseño de la cámara “oscura”



Nota: Primer diseño que se realizó para el mejor entendimiento y visualización de la cámara “oscura” que se requería elaborar, donde se presentan los elementos empleados.

En relación con el análisis estadístico utilizado para la validación, se han obtenido resultados favorables que respaldan lo mencionado anteriormente. Se demostró un porcentaje de variabilidad que cumple con los estándares requeridos, logrando una cifra inferior al 10 % de variación, como se evidencia en las figuras 2 y 3.

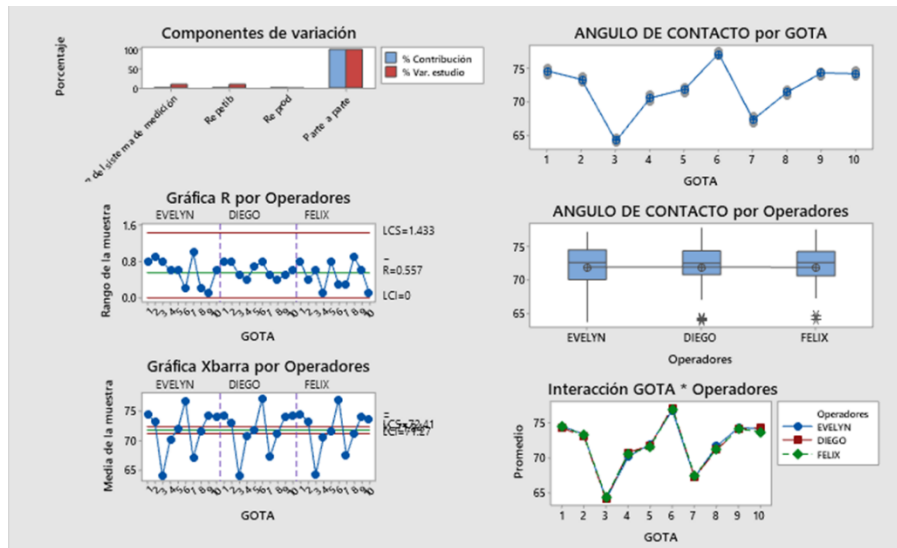
Figura 2. Evaluación del sistema de medición

Evaluación del sistema de medición

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.34109	2.0466	8.99
Repetibilidad	0.34109	2.0466	8.99
Reproducibilidad Operadores	0.00000	0.0000	0.00
Parte a parte	3.78026	22.6815	99.60
Variación total	3.79561	22.7737	100.00

Nota: Se aprecia un porcentaje de variación de 8.99 en el estudio, lo que demuestra que la estructura y sistema desarrollado es viable para utilizar en la medición del parámetro estudiado y analizado.

Figura 3. Informe de R&R del sistema de medición



Nota: Se logra apreciar visualmente los resultados del estudio en las distintas métricas obtenidas referentes a la variación del estudio. Software utilizado: Minitab.

Lo anterior demuestra un comportamiento favorable con baja variación y un excelente resultado en la comparación “parte a parte”, pues este último parámetro indica que el sistema permite diferenciar entre las diversas muestras analizadas. Además, se observa un comportamiento con baja variación y una alta correlación entre los diferentes operadores y la técnica empleada.

Discusión

Inicialmente, se obtuvieron resultados desfavorables que requerían correcciones y mejoras, ya que no permitían la validación de la estructura y el sistema de medición. Sin embargo, se lograron realizar modificaciones en el sistema y en las técnicas de medición del ángulo de contacto para obtener mejores resultados y validar la estructura y el sistema de medición. Este proceso permitió comprender los diferentes factores que influían en la variación, entender por qué era necesario realizar correcciones y mejorar la comprensión del funcionamiento y la relación entre todos los elementos del sistema.

Después de varias correcciones, se logró validar el sistema de medición junto con su estructura, así como establecer diversos procesos estandarizados en una primera versión. También se realizó una primera prueba de entrenamiento para la medición de ángulos. En la actualidad, el sistema y la estructura de medición pueden emplearse para futuros estudios de ángulo de contacto de manera económica y accesible en cualquier lugar que cumpla con las especificaciones mencionadas. Además, se mantienen abiertos a mejoras y adaptaciones adicionales.

En el presente estudio, los resultados obtenidos en relación con los ángulos de contacto muestran similitudes notables con estudios anteriores, respaldando y fortaleciendo las observaciones previas en la literatura científica. A continuación, se discuten algunas de las similitudes más destacadas y las implicaciones asociadas:

Coherencia en Superficies Homogéneas e Heterogéneas:

Los resultados revelan una coherencia significativa con investigaciones anteriores en cuanto a la influencia del carácter de la superficie en el ángulo de contacto. Superficies homogéneas exhiben comportamientos consistentes con las expectativas teóricas, mientras que las heterogéneas presentan variaciones notables, respaldando la importancia de la composición superficial en la mojabilidad.

Efecto de la Energía Superficial:

La relación entre la energía superficial de la superficie y el ángulo de contacto se alinea con hallazgos previos, sugiriendo que las propiedades interfaciales juegan un papel clave en la interacción entre el sustrato y el líquido. Este patrón destaca la relevancia de considerar la energía superficial como un predictor significativo en el diseño de materiales.

Influencia de la Rugosidad Superficial:

La rugosidad superficial emerge como un factor determinante, corroborando resultados previos que indican una relación directa entre la rugosidad y la disminución del

ángulo de contacto. Este fenómeno se atribuye a la mayor área de contacto y los efectos capilares asociados, lo que tiene implicaciones importantes en aplicaciones que involucran interfaces rugosas.

Validación de Modelos Teóricos:

La comparación de nuestros resultados con modelos teóricos existentes respalda la validez de dichos modelos en la predicción de ángulos de contacto en diversas condiciones. Sin embargo, se observa que ciertas desviaciones podrían indicar la necesidad de ajustes específicos en contextos particulares.

Aplicaciones Tecnológicas:

Los hallazgos consistentes ofrecen oportunidades significativas para aplicaciones tecnológicas. La comprensión más profunda de los ángulos de contacto puede ser aprovechada en el diseño de superficies repelentes al agua, adhesivos eficientes y dispositivos microfluídicos, entre otros.

En conjunto, la convergencia de nuestros resultados con investigaciones previas refuerza la robustez y aplicabilidad de los conceptos relacionados con los ángulos de contacto. Estos resultados contribuyen al cuerpo existente de conocimiento y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Conclusiones

En conclusión, se puede indicar que existen oportunidades de mejoras en el sistema de entrenamiento para la medición de ángulos en el *software*, especialmente en la fundamentación del tema de los píxeles y su importancia y utilidad al seleccionar puntos en la imagen.

Asimismo, se sugiere perfeccionar la caja oscura incorporando una compuerta superior para facilitar la deposición de gotas sin necesidad de retirar toda la caja, lo cual haría más práctica la operación y proporcionaría mayor estabilidad a la caja. Además, se podría realizar un estudio para encontrar un material más resistente y duradero, adaptado para su uso cotidiano en entornos industriales o específicos.

Otra mejora potencial sería la incorporación de una lente o lupa que realice un aumento antes de tomar la fotografía para evitar la pérdida de calidad de la imagen al realizar zoom durante la edición, lo cual eliminaría la necesidad de recortar la imagen.

Futuras líneas de investigación

El ángulo de contacto, una medida de la interacción entre una gota de líquido y una superficie sólida, se ve influenciado por las propiedades físicas y químicas del líquido, el sólido y el medio intermedio. Este parámetro resulta crucial para analizar fenómenos como la humectación, adhesión, capilaridad, así como la transferencia de masa y calor. Aunque existen varios métodos para medir el ángulo de contacto, como el método de la gota colgante, el método de la gota sesgada, el método del anillo flotante y el método óptico, estos enfoques enfrentan limitaciones. Entre ellas se incluyen la necesidad de equipos especializados, dificultades para obtener imágenes nítidas, sensibilidad a perturbaciones externas y la complejidad asociada al análisis de datos.

Por lo tanto, se propone desarrollar un sistema de medición de ángulos de contacto que sea simple, económico, preciso y robusto. En tal sentido, algunas líneas de investigación sugeridas para este proyecto incluyen lo siguiente:

- Diseñar y construir un dispositivo portátil capaz de generar gotas de diferentes tamaños y formas sobre una superficie sólida, utilizando materiales como jeringas, agujas, válvulas o bombas.
- Desarrollar un algoritmo que pueda procesar imágenes digitales de las gotas, extrayendo el valor del ángulo de contacto mediante técnicas como el filtrado, umbralizado, contorno, segmentación y regresión.
- Aplicar el sistema de medición a diversos tipos de líquidos y superficies sólidas, analizando la influencia de factores como temperatura, presión, composición química y rugosidad.
- Investigar las posibles aplicaciones del sistema de medición en áreas como ingeniería biomédica, nanotecnología, industria textil y agricultura.

Referencias

- Adak, D., Bhattacharyya, R., Saha, H. and Maiti, P. S. (2019). Sol-gel processed silica based highly transparent self-cleaning coatings for solar glass covers. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2429–2433. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.331>
- Bayer, I. S. (2020). Superhydrophobic Coatings from Ecofriendly Materials and Processes: A Review. *Advanced Materials Interfaces*, 7(13), 1–25. <https://doi.org/10.1002/admi.202000095>
- Castañeda Hernández, O., Caraballo Rodríguez, I., Bernad Bernad, M. J. and Melgoza Contreras, L. M. (2021). Diseño de estudios Gauge R&R cruzado y anidado para la validación de los modelos matemáticos de Heckel y Ryshkewitch-Duckworth. *Ars Pharmaceutica*, 62(2), 190-202.
- Conantec (13 de marzo de 2018). <https://www.co-nantec.com/post/recubrimientos-hidrofóbicos-y-sus-usos>
- Lin, W., Zhang, X., Cai, Q., Yang, W. and Chen, H. (2020). Dehydrogenation-driven assembly of transparent and durable superhydrophobic ORMOSIL coatings on cellulose-based substrates. *Cellulose*, 27(13), 7805–7821. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03288-2>
- MINITAB (2021). *Soporte técnico de Minitab 20*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/>
- Tapia Esquivias, M., Luna Gonzales, A., Jimenez Zarraga, G. S., Hernandez Ripalda, M. D. y Rios Lira, A. J. (2019). *Análisis de un sistema de medición con características multivariantes*. Tecnológico Nacional de México.
- Sharma, V., Goyat, M. S., Hooda, A., Pandey, J. K., Kumar, A., Gupta, R., Upadhyay, A. K., Prakash, R., Kirabira, J. B., Mandal, P. and Bhargav, P. K. (2020). Recent progress in nano-oxides and CNTs based corrosion resistant superhydrophobic coatings: A critical review. *Progress in Organic Coatings*, 140, 105512. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105512>
- Vinasco Isaza, L. E. (s. f.). *Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R Repeatability and Reproducibility Study of R & R*. <https://www.cicalidad.com/articulos/PAPER%20R&R.pdf>

Rol de Contribución	Autor (es)
Conceptualización	Diego de Jesús Losoya Sifuentes.
Metodología	Diego de Jesús Losoya Sifuentes.
Software	No aplica
Validación	Diego de Jesús Losoya Sifuentes (principal), Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo).
Análisis Formal	Diego de Jesús Losoya Sifuentes.
Investigación	Diego de Jesús Losoya Sifuentes (principal), Félix Fernando de Hoyos Vázquez (apoyo), Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo), Carlos Patiño Chávez (apoyo), Paula Graciela Vázquez de la Garza (apoyo).
Recursos	Diego de Jesús Losoya Sifuentes (principal), Félix Fernando de Hoyos Vázquez (apoyo), Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo), Carlos Patiño Chávez (apoyo), Paula Graciela Vázquez de la Garza (apoyo).
Curación de datos	Diego de Jesús Losoya Sifuentes.
Escritura - Preparación del borrador original	Diego de Jesús Losoya Sifuentes (principal), Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo).
Escritura - Revisión y edición	Diego de Jesús Losoya Sifuentes (principal), Félix Fernando de Hoyos Vázquez (apoyo), Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo), Carlos Patiño Chávez (apoyo), Paula Graciela Vázquez de la Garza (apoyo).
Visualización	Diego de Jesús Losoya Sifuentes.
Supervisión	Francisco Fabián Tobias Macías (principal), Félix Fernando de Hoyos Vázquez (apoyo), Diego de Jesús Losoya Sifuentes (apoyo), Carlos Patiño Chávez (apoyo), Paula Graciela Vázquez de la Garza (apoyo).
Administración de Proyectos	Diego de Jesús Losoya Sifuentes, Francisco Fabián Tobias Macías (apoyo).
Adquisición de fondos	Francisco Fabián Tobias Macías (principal), Félix Fernando de Hoyos Vázquez (apoyo), Carlos Patiño Chávez (apoyo), Paula Graciela Vázquez de la Garza (apoyo).