

Comparative evaluation in quality control environment between a robotic arm used for measurement versus a manual instrument

Evaluación comparativa en ambiente de control de calidad entre un brazo robótico utilizado para medición frente a un instrumento manual

Jonathan Vladimir Gómez-Montoya^{1*}, Cristhian Iván Riaño-Jaimes², Bladimir Azdrubal Ramón-Valencia³, Francisco Raúl Arencibia-Pardo⁴, César Augusto Peña-Cortés⁵.

¹Ingeniero industrial, jonathan.gomez2@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1978-360X>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

²Doctor en sistemas mecánicos, cristhian.riano@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3883-9779>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

³Doctor en ingeniería de materiales, hbladimir@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2638-0633>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

⁴Doctor en proyectos, francisco.arencibia@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-6012-2577>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

⁵Doctor en automática y robótica, cesarapc@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-4148-2168>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Cómo citar: J. V. Gómez-Montoya, C. I. Riaño-Jaimes, B. A. Ramón -Valencia, F. R. Arencibia-Pardo, y C. A. Peña-Cortés, "Evaluación comparativa en ambiente de control de calidad entre un brazo robótico utilizado para medición frente a un instrumento manual", *Respuestas*, vol. 29, n.º 2, pp. 6–19, May. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4425>

Received on December 24, 2023 - Approved on April 13 2024.

ABSTRACT

Keywords:

Organic fluid, Industrial engine ORC, Waste heat recovery system, World overview.

Over time, measuring instruments have had an important role in quality control processes in the manufacturing industry, for this reason; this article portrays the research work carried out where they are determined through the application of Statistical Quality Control and Time Study; the advantages and disadvantages of a robotic arm used to make measurements versus a portable instrument designed for the same purpose, such as the Vernier Caliper; it is also determined whether the processes are under control and in turn, the possible assignable variables that positively and negatively affect the two operations; for this, an experimental environment is initially established where the additive manufacturing process of a three-dimensional geometric piece is taken into account, which once made is subjected to quality control where the two tools are used to measure the different selected sides; following this and having collected the different data from each of the instruments, reliability parameters are established and the respective analyzes and statistical studies are carried out to determine the advantages and disadvantages that one process has over the other, considerations to take into account and suggestions.

RESUMEN

Palabras clave:

Fluido orgánico, Motor industrial ORC, Sistemas de recuperación de calor residual, Visión mundial.

A través del tiempo, los instrumentos de medición han tenido un papel importante en los procesos de control de calidad en la industria manufacturera, por esta razón; el presente artículo retrata el trabajo de investigación realizado donde se determinan mediante la aplicación del Control Estadístico de Calidad y el Estudio de Tiempos; las ventajas y desventajas de un brazo robótico utilizado para realizar mediciones frente a un instrumento portátil diseñado para el mismo fin, como lo es el Calibre Vernier; también se determina si los procesos se encuentran bajo control y a su vez, las posibles variables asignables que afectan positiva y negativamente las dos operaciones; para ello, se establece inicialmente un entorno experimental donde se tiene en cuenta el proceso de fabricación aditiva de una pieza geométrica tridimensional, la cual una vez fabricada se somete a un control de calidad donde se utilizan las dos herramientas para medir las diferentes caras seleccionadas; a continuación y habiendo recogido los diferentes datos de cada uno de los instrumentos, se establecen parámetros de fiabilidad y se realizan los respectivos análisis y estudios estadísticos para determinar las ventajas y desventajas que tiene un proceso sobre el otro, consideraciones a tener en cuenta y sugerencias.

*Corresponding author.

E-mail Address: jonathan.gomez2@unipamplona.edu.co (Jonathan Vladimir Gómez-Montoya)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.



This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

Diferentes investigaciones realizadas en torno a la industria 4.0 ayudan a comprender el impacto mayormente positivo que ha generado el avance e inclusión de la misma aportando de manera significativa al potenciamiento, crecimiento, control y desarrollo de los diferentes sectores no solo industriales sino también en áreas como la química, el medio ambiente, la agricultura, entre otras [1, 2, 3]. Parte de este impacto se debe a la utilización de instrumentos robóticos los cuales son capaces de realizar tareas más complejas con mayor precisión [4, 5]; también es importante destacar que en operaciones en donde se requiere mayor eficiencia no solo en la ejecución de las diferentes tareas sino asimismo en la recolección, ordenamiento, análisis y difusión de datos; este tipo de mecanismos generan un aporte sustancial y en un menor tiempo [6, 7].

Los procesos realizados para el control de calidad implementados en las diferentes áreas, buscan dar garantías en la fiabilidad, cumplimiento y consistencia de estándares en la producción de bienes o servicios [8], para asegurar su correcta ejecución es importante no solo establecer los procedimientos a aplicar, sino también que las herramientas a utilizar permitan obtener información precisa y de manera rápida [9]. Uno de los procedimientos fundamentales dentro de este proceso en referencia a la industria manufacturera es la medición, mediante la cual se identifica si los productos cumplen con las especificaciones longitudinales o de forma [10, 11], pero en industrias en pro de desarrollo, donde hay producción en masa y cuentan con altos estándares de calidad, se ha hecho necesario la implementación de instrumentos robóticos capaces de procesar al instante la mayor cantidad de artículos e identificar cuáles de estos no cumplen con los parámetros establecidos para luego ser descartados [12].

Múltiples estudios cuya temática principal es la creación o modificación de brazos robóticos, dejan ver la versatilidad de esta herramienta debido a que la mayoría de veces se puede adaptar o modificar según sea la necesidad, para que así pueda lograr realizar la tarea en específico [13, 14], y que de incluirse en los diferentes procesos, ayuda a la automatización de los mismos aumentando de manera directa su productividad siempre y cuando se cumpla con las condiciones de uso [15, 16], aun así, se debe tener en cuenta la relevancia que han tenido a lo largo del tiempo los instrumentos o herramientas manuales que en la actualidad siguen jugando un papel importante en la industria, la investigación y las diferentes áreas [17, 18].

La presente investigación determina las ventajas y desventajas que tiene un brazo robótico utilizado para la medición como control de calidad en la fabricación de piezas tridimensionales, frente a un instrumento operado de manera manual preciso utilizado mayormente en la industria como lo es el calibrador pie de rey. Inicialmente se diseñó un experimento en donde seguido de la fabricación de un sólido paralelepípedo compuesto, hecho por una máquina de impresión 3d, se establecen puntos de medición en el mismo con una serie de repeticiones las cuales se ejecutaron con las dos herramientas, en donde se recolectaron datos no solo de las operaciones hechas, sino también de los tiempos que tardó cada una en ejecutar las mediciones.

Con la información se realiza un análisis fundamentado en el Control Estadístico del Proceso, metodología desarrollada a lo largo del tiempo e implementada en innumerables estudios debido a que permite relacionar la información, conocer características cuantificables como la variabilidad, repetibilidad, entre otras, y también si estos se encuentran bajo control estadístico o si por el contrario hay variables asignables que afectan el proceso [19, 20, 21]; asimismo se lleva a cabo un Estudio Estándar de Tiempos donde se

determinan variables ajustadas de la duración particular y total del proceso de medición para cada uno de los instrumentos[22, 23].

Los resultados obtenidos posibilitan hacer una comparativa en donde se observan las fortalezas y debilidades que tiene un procedimiento frente al otro, que a su vez puede servir de fundamento para la futura inmersión de la herramienta robótica en procesos de medición de calidad como alternativa de remplazo de procesos manuales con el mismo fin.

Materiales y Métodos

A. Descripción de herramientas.

Para la toma de datos y realización del presente estudio, se estableció un entorno que está compuesto de un brazo robótico de referencia UR5e fabricado por la empresa Universal Robot, el cual cuenta con una pinza eléctrica de dos dedos de referencia RG2, elaborada por On-Robot; un calibrador pie de rey de uso profesional con capacidad de medición de 0.01 mm hecho por la compañía Ubermann; una impresora 3D Ender-3 Pro de la firma Creality; un cronómetro convencional y un operario.

En las especificaciones del Robot UR5e se encuentra que posee un alcance de 850 mm, 6 grados de libertad, carga útil de 5 Kg, huella de 149 mm, precisión de 0.03 mm y un peso total de 13,5 Kg; además de contar con certificaciones como robot colaborativo debido a que cuenta con 17 funciones de seguridad configurables.

La pinza RG2 cuenta con características de toma de objetos hasta de 110 mm de espesor, fuerza de agarre ajustable de entre 3 a 40 N, resolución de posición de las pinzas de 0.1 mm, velocidad de agarre de entre 38 a 127 mm/s, con la capacidad de levantar objetos de hasta 5 Kg, y un peso total de 0,78 Kg.

El calibrador pie de rey tiene un rango de medición de hasta 150 mm, precisión de medición de hasta 0,01 mm y es un instrumento utilizado mayormente en la industrial para el control de calidad.

El cronómetro es estándar, capaz de tomar hasta centésimas de segundo y el operador es una persona que cuenta con practicidad en la utilización de los instrumentos de medición.

La máquina utilizada para la fabricación de la pieza objeto de estudio es la impresora 3D Ender-5 PRO y el diseño seleccionado está compuesto por un cilindro en la parte superior y dos paralelepípedos, con medidas las cuales están en el rango de alcance de los instrumentos y les permite un mejor agarre para mayor facilidad al momento de la recolección de los datos, ver Figura 1.

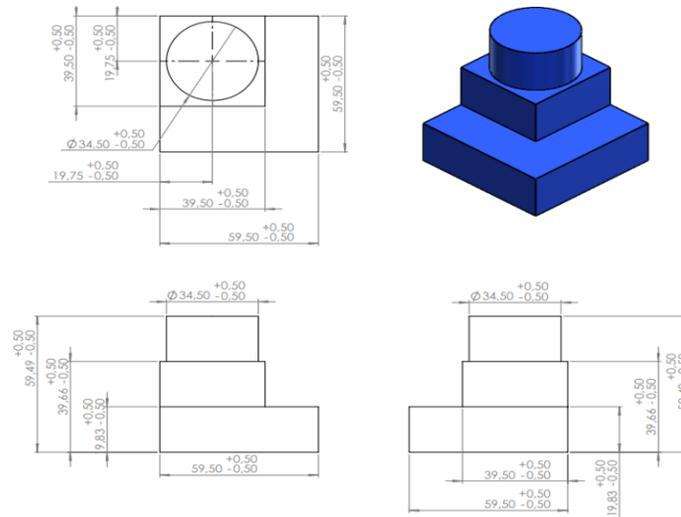


Figura 1. Diseño de pieza geométrica tridimensional.

B. Diseño de experimento.

Inicialmente, se busca recrear un ambiente de control de calidad en piezas hechas por fabricación aditiva o sustractiva, es por este motivo que los instrumentos a evaluar se posicionaron de manera cuidadosa y estratégica inmediatamente al lado de la máquina fabricadora seleccionada.

Se realiza la comparación entre estos dos instrumentos debido a que tienen en común que necesitan de dos extremidades para poder ejecutar las mediciones.

Con el fin de reunir una cantidad de datos los cuales permitan realizar un análisis de suma precisión con resultados confiables, se seleccionaron 13 lados de la pieza que comprenden diámetro y altura, los cuales se les hizo la medición 13 veces a cada uno en un proceso ininterrumpido con las dos herramientas.

Las partes seleccionadas son las siguientes (ver Figura 2):

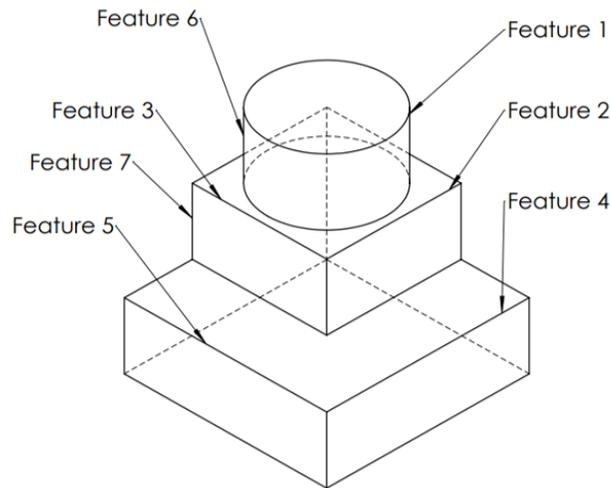


Figura 2. Partes seleccionadas de la pieza.

Los datos a obtener son las dimensiones en milímetros de los diferentes lados y los tiempos que toman las dos herramientas en realizar cada una de las mediciones. La recolección y el análisis de esta información permite conocer la precisión y la rapidez de cada uno de los procesos.

Cabe aclarar que en el estudio de tiempos no se tendrá en cuenta el alistamiento del brazo robótico ni el periodo de aprendizaje del operario para el desarrollo de la practicidad y la correcta manipulación del calibrador pie de rey, esto debido a que el enfoque está en la ejecución, teniendo en cuenta la esencia del experimento que es un proceso de control de calidad a una pieza tridimensional; con base en esto si se tendrá en cuenta lo que tardan no solo en realizar la acción sino también en la recolección de los datos ya sea en un software o librito.

C. Ejecución.

a) Brazo Robótico.

En un principio se estipula el código de desplazamiento y funciones, escrito bajo el lenguaje URscript con el que opera el robot; para su desarrollo se tuvo en cuenta las coordenadas de ubicación de la máquina de fabricación aditiva y la zona dentro de la misma en donde se localiza el producto terminado; también el diseño de la pieza, seguido se establecieron parámetros para solventar los posibles errores que se puedan presentar por la deformidad y localización de esta última; con esa finalidad para lograr un agarre preciso y evitar desplazamientos no deseados al manipular objetos con la pinza robótica, es necesario centrar el sólido en relación con el eje medio, con este fin se debe prevenir el toque inicial de una de las dos extremidades en un lado de la pieza, lo cual podría resultar en su posterior centralización respecto al eje de la pinza, teniendo en cuenta lo anterior se agregan tres grados de libertad a la pieza lo que permite una ubicación precisa de la pinza en la parte superior; estos grados de libertad se obtienen liberando la cama de impresión, permitiéndole desplazarse y girar en ejes específicos; además, dado que la pieza puede tener errores dimensionales, se realiza una medición inicial del diámetro del cilindro. Este enfoque garantiza una correcta ubicación de la pieza respecto al robot, contribuyendo a evitar desviaciones indeseadas en el proceso de manipulación. Este

tipo consideraciones deben tenerse en cuenta para los diferentes tipos de estructuras que quieran medirse, ver Figura 3.

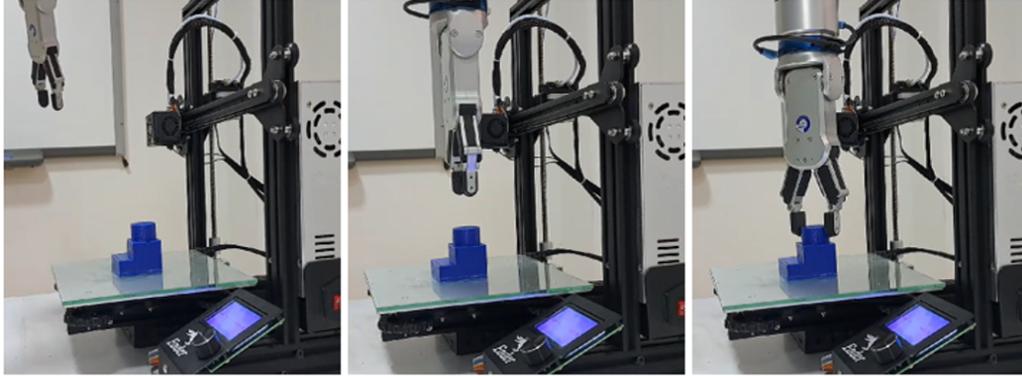


Figura 3. Centralización de la pieza.

También se contemplan dentro del código la cantidad de movimientos a ejecutar para realizar las mediciones en las partes seleccionadas del sólido, la fuerza del cierre de las pizas que es de 20 N y además, la información recolectada automáticamente sea decodificada en una tabla en el software Excel.

Una vez ensamblado, calibrado, posicionado el brazo robótico y habiendo estipulado el código de funcionamiento, se hizo una prueba con el fin de corroborar el correcto desempeño; habiendo confirmado que todo está en óptimas condiciones se procede a la ejecución del experimento para la toma de datos.

b) Calibrador Pie de Rey.

Al ser un instrumento adquirido nuevo específicamente para la realización del experimento, se verifica que cuente con la suficiente energía para llevar a cabo las diferentes actividades, para ello se recarga con pilas nuevas; seguido de esto se verifica la funcionalidad del mismo realizando diferentes pruebas y una vez se confirma su óptimo estado, se procede luego al adiestramiento y preparación del operario quien lo va a manipular con el fin de generar la experticia necesaria al momento de la toma de las medidas a la pieza, recreando un entorno lo más realista posible.

Por último, se tiene a mano la libreta y el lápiz con el cual se apuntarán las diferentes medidas que tome el operador al momento de desarrollar la actividad (ver figura 4).



Figura 4. Alistamiento experimento hecho con calibrador pie de rey.

Resultados y Discusión.

1. Brazo Robótico

1.1. Control estadístico del proceso.

1.1.1. Variabilidad y repetibilidad.

En el análisis realizado a los datos obtenidos de las mediciones hechas a las diferentes partes seleccionadas la cantidad de veces establecidas se obtiene lo siguiente (ver Tabla I):

Tabla I. Análisis estadístico de las mediciones hechas con el brazo robótico.

Ubicación	Muestra	Rango	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación (%)
Ancho del cilindro	Medición 1 a	0,20000000	34,56921538	0,075099954	0,217245179
	Medición 2 b	0,01000000	34,59923077	0,002773501	0,008016077
	Medición 3 c	0,20000000	34,32307692	0,101273937	0,295060775
Ancho 1 paralelepípedo intermedio	Medición 4 a	0,00000000	39,90000000	0	0
	Medición 5 b	0,10000000	39,93076923	0,048038446	0,120304334
	Medición 6 c	0,00000000	39,90000000	0	0
Ancho 2 paralelepípedo intermedio	Medición 7 a	0,00000000	39,90000000	0	0
	Medición 8 b	0,10000000	39,90769231	0,02773501	0,069497904
	Medición 9 c	0,10000000	39,97692308	0,043852901	0,109695538
Altura total	Medición 10	0,21100000	101,69915385	0,068629253	0,067482619
Altura 1 paralelepípedo bajo	Medición 11 a	0,28400000	61,54884615	0,084849716	0,137857526
Altura 2 paralelepípedo bajo	Medición 12 b	0,37100000	61,42253846	0,108801513	0,177136139
Altura 3 paralelepípedo bajo	Medición 13 c	0,37000000	61,95907692	0,127965139	0,206531707

El porcentaje de repetibilidad para el brazo robótico es de 0,3090 y el porcentaje de coeficiente de variación promedio es de 0,1083 y un porcentaje de precisión de 99,91.

En términos generales, teniendo en cuenta los resultados de las variables calculadas para cada una de las muestras, se puede inferir que el proceso cuenta con un alto grado de homogeneidad; su variabilidad y variabilidad relativa son muy bajas o casi inexistentes, lo que sugiere que la operación ejecutada por el instrumento es precisa, consistente y por consiguiente confiable.

1.1.2. Gráfica R.

Para identificar si el proceso se ve afectado o no de manera positiva o negativa por situaciones externas o internas, y de ser así, las posibles causas asignables, se realiza una gráfica R la cual permite visualizar la dispersión de los datos y detectar patrones o señales de falta de control (ver figura 5):

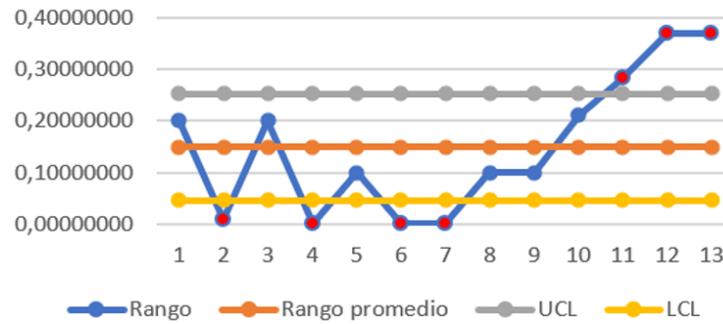


Figura 5. Grafica R para el proceso de medición ejecutado por el Brazo Robótico.

Se observa de los trece puntos que representan los rangos de cada una de las muestras, cuatro se encuentran por debajo del límite inferior, que corresponden a la medición hecha al diámetro de las formas que componen el paralelepípedo, en donde las pinzas se abren y cercan, para luego cerrarse y así tomar el dato, cuya causa asignable se identifica como la poca o nula variabilidad que tuvo el procedimiento, siendo esto un aspecto positivo que aporta a la calidad del proceso; también se encuentran tres puntos por encima del límite superior que corresponden a los rangos de las muestras hechas a la medición de la altura de la pieza en diferentes puntos, en donde según el análisis llevado a cabo se pudo deducir que esto se debe a la deformidad del objeto lo cual afecta la precisión debido a que, las dos pinzas se unen para seguido de esto descender y al momento en que tocan la superficie, si esta no se encuentra totalmente lisa provocará un conflicto entre los sensores, repercutiendo en datos con cierto grado de variabilidad, lo que afecta de manera negativa la calidad proceso.

1.2. Estudio estándar de tiempos.

El factor de tolerancia asignado para el análisis es de 5%; el factor de calificación es de 95%, estas dos teniendo en cuenta el alto grado de repetibilidad que tiene el brazo robótico y que la actividad se realiza en un entorno experimental controlado; la unidad de medida es en segundos con centésimas de segundos.

Los datos recolectados del tiempo que toma la máquina en ejecutar cada movimiento al medir son los siguientes (ver Tabla II):

Tabla II. Datos de tiempos recolectados de la medición hecha por el brazo robótico.

Ubicación	Muestra	Tiempo (s,cs)
Ancho del cilindro	Medición 1 a	34,08
	Medición 2 b	5,02
	Medición 3 c	13
Ancho 1 paralelepípedo intermedio	Medición 4 a	7,36
	Medición 5 b	2,96
	Medición 6 c	2,82
Ancho 2 paralelepípedo intermedio	Medición 7 a	10,71
	Medición 8 b	3,35
	Medición 9 c	3,2
Altura total	Medición 10	20,82
Altura 1 paralelepípedo bajo	Medición 11 a	17,97
Altura 2 paralelepípedo bajo	Medición 12 b	15,54

Altura 3 paralelepípedo bajo	Medición 13 c	13,72
------------------------------	---------------	-------

Es esencial realizar un estudio estándar de tiempos debido a que este permite hacer una evaluación global del rendimiento del brazo robótico y su desempeño típico; para ello, con los datos anteriores se calcularon las siguientes variables (ver tabla 3); es de resaltar que no se tuvo en cuenta el tiempo de alistamiento de la máquina debido a que el objetivo central es evaluar netamente el proceso de medición en condiciones óptimas.

Tabla III. Estudio estándar de tiempos del proceso de medición del brazo robótico.

Tiempo total (s,cs)	Tiempo promedio (s,cs)	Tiempo normal (s,cs)	Tiempo estándar (s,cs)
150,55	11,58	11,00	11,55

Este estudio nos brinda un panorama general en cuanto a tiempos de ejecución del brazo robótico y el desarrollo de cada una de sus tareas contempladas en el experimento.

2. Calibrador Pie de Rey.

2.1. Control estadístico del proceso.

2.1.1. Variabilidad y repetibilidad.

Después de examinar los datos recopilados de las mediciones efectuadas en las distintas partes seleccionadas según las frecuencias predefinidas, se llega a la siguiente conclusión (ver Tabla IV):

Tabla IV. Análisis estadístico realizado a las mediciones hechas con el calibrador pie de rey.

Ubicación	Muestra	Rango	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación (%)
Ancho del cilindro	Medición 1 a	0,08	32,04642857	0,026017745	0,08118766
	Medición 2 b	0,04	32,025	0,014500221	0,045277817
	Medición 3 c	0,07	32,01357143	0,025318484	0,079086722
Ancho 1 paralelepípedo intermedio	Medición 4 a	0,03	36,72428571	0,012506409	0,034054872
	Medición 5 b	0,05	36,73285714	0,016132464	0,043918349
	Medición 6 c	0,06	36,725	0,019414507	0,052864552
Ancho 2 paralelepípedo intermedio	Medición 7 a	0,03	36,79714286	0,010500305	0,028535654
	Medición 8 b	0,04	36,78	0,012608503	0,034280869
	Medición 9 c	0,04	36,79142857	0,013445045	0,03654396
Altura total	Medición 10	0,14	54,10857143	0,035355339	0,065341476
Altura 1 paralelepípedo bajo	Medición 11 a	0,03	17,265	0,01037749	0,060107098
Altura 2 paralelepípedo bajo	Medición 12 b	0,03	17,22357143	0,009607689	0,055782213
Altura 3 paralelepípedo bajo	Medición 13 c	0,05	17,33142857	0,014411534	0,083152602

La tasa de repetibilidad obtenida para el calibrador pie de rey es del 0,1632, mientras que el promedio del coeficiente de variación se sitúa en el 0,0539, y el porcentaje de precisión es de 99,96.

En términos generales, al considerar los resultados de las variables calculadas para cada muestra, se puede deducir que el procedimiento exhibe un elevado nivel de uniformidad; la variabilidad y la variabilidad

relativa son mínimas o prácticamente nulas, indicando que la ejecución del instrumento es precisa, coherente y, por ende, confiable.

2.1.2. Gráfica R.

Con el fin de determinar si el proceso experimenta impactos positivos o negativos debido a factores internos o externos, y en caso afirmativo, identificar las posibles causas asignables, se emplea un gráfico R.

Este gráfico posibilita la observación de la dispersión de los datos, facilitando la detección de patrones o señales que indiquen falta de control (ver figura 6):

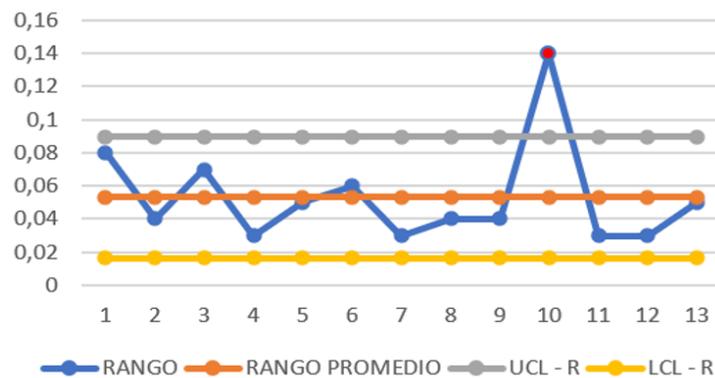


Figura 6. Gráfica R para el proceso de medición ejecutado por el Calibrador pie de rey.

Se observa solo un punto en total fuera de los límites de control establecidos, este se encuentra por encima del límite superior que cuya posible causa asignable podría atribuirse a error humano al momento de tomar la medida o el desgaste de la pieza que se genera al contacto en múltiples ocasiones con la herramienta, lo que afecta de manera negativa el proceso.

2.2. Estudio estándar de tiempos.

El análisis se realiza considerando un factor de tolerancia del 5% y un factor de calificación del 95%. Estos valores se establecen teniendo en cuenta la notable repetibilidad del calibrador pie de rey y la ejecución de la actividad en un entorno experimental controlado. La unidad de medida empleada es en segundos con centésimas de segundos. A continuación, se presentan los datos recopilados del tiempo que la máquina emplea en ejecutar cada movimiento al realizar las mediciones (ver tabla 5):

Tabla V. Datos de tiempos recolectados de la medición hecha con el calibrador pie de rey.

Ubicación	Muestra	Tiempo (s,cs)
Ancho del cilindro	Medición 1 a	19,01
	Medición 2 b	16,97
	Medición 3 c	17,25
Ancho 1 paralelepípedo intermedio	Medición 4 a	16,03
	Medición 5 b	15,89
	Medición 6 c	19,56

Ancho 2 paralelepípedo intermedio	Medición 7 a	17,11
	Medición 8 b	16,87
	Medición 9 c	17,08
Altura total	Medición 10	27,85
Altura 1 paralelepípedo bajo	Medición 11 a	16,42
Altura 2 paralelepípedo bajo	Medición 12 b	15,08
Altura 3 paralelepípedo bajo	Medición 13 c	16,92

Con esta información se lleva a cabo un estudio estándar de tiempos con el fin de tener un panorama global del rendimiento del proceso realizado con el calibrador pie de rey (ver Tabla VI), Es importante destacar que el tiempo de entrenamiento para el desarrollo de la experticia del operario al momento de realizar las mediciones no se tuvo en cuenta, dado que el enfoque principal reside en evaluar exclusivamente el proceso de medición en condiciones óptimas.

Tabla VI. Estudio estándar de tiempos del proceso de medición con el calibrador pie de rey.

Tiempo total (s,cs)	Tiempo promedio (s,cs)	Tiempo normal (s,cs)	Tiempo estándar (s,cs)
232,04	17,85	16,96	17,81

Este estudio nos brinda un panorama general en cuanto a tiempos de ejecución del proceso realizado con el calibrador pie de rey y el desarrollo de cada una de sus tareas contempladas en el experimento.

Conclusiones

En la Tabla VII se puede observar las variables que se calcularon con el análisis realizado a la información obtenida para los dos procesos, esencial para realizar la comparativa:

Tabla VII. Variables calculadas para cada uno de los procesos.

Variables	Brazo robótico	Calibrador pie de rey
Repetibilidad (%)	0,3090	0,1632
Coefficiente de variación promedio (%)	0,1083	0,0539
Rango promedio (mm)	0,1497	0,0530
Precisión	99,91	99,96
Tiempo total (s,cs)	150,55	232,04
Tiempo promedio (s,cs)	11,58	17,85
Tiempo normal (s,cs)	11,00	16,96
Tiempo estándar (s,cs)	11,55	17,81

La comparativa detallada entre el brazo robótico y el calibrador pie de rey destaca diferencias clave en sus desempeños. El brazo robótico, a pesar de mostrar cierta variabilidad en repetibilidad y coeficiente de variación, muy cercana a la del otro instrumento; emerge como una posible alternativa más ágil y autónoma. Su capacidad para ejecutar mediciones de manera automatizada lo posiciona como una herramienta eficiente en situaciones donde la velocidad y la reducción de la intervención humana son prioritarias.

En contraparte, el calibrador pie de rey, aunque requiere más tiempo debido a su operación manual, presenta una mayor consistencia en las mediciones, reflejada en su menor coeficiente de variación y repetibilidad. Su enfoque meticuloso y precisa ejecución lo hace idóneo en contextos donde la uniformidad y la exactitud son cruciales.

El mantenimiento periódico del brazo es esencial para garantizar su óptimo funcionamiento, mientras que el calibrador depende más del operario y requiere menor inversión inicial.

También se comprueba que en óptimas condiciones el brazo robótico podría ser utilizado en procesos de calidad en la medición de piezas.

Es de resaltar que la elección entre ambos instrumentos dependerá de las necesidades específicas de medición y las prioridades del proceso. La automatización ofrecida por el brazo robótico puede ser invaluable en entornos que demandan eficiencia, análisis de gran cantidad de muestras y minimización de errores humanos, mientras que el calibrador pie de rey se destaca por su fiabilidad y precisión en aplicaciones donde la meticulosidad es esencial.

Referencias

- [1] M. Piron, J. Wu, A. Fedele, y A. Manzardo, “Industry 4.0 and life cycle assessment: Evaluation of the technology applications as an asset for the life cycle inventory”, *Sci Total Environ*, vol. 916, p. 170263, mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170263.
- [2] M. Malik, V. K. Gahlawat, R. Mor, K. Rahul, B. P. Singh, y S. Agnihotri, “Chapter 14 - Industry 4.0 technologies in postharvest operations: current trends and implications”, en *Postharvest Management of Fresh Produce*, B. P. Singh, S. Agnihotri, G. Singh, y V. K. Gupta, Eds., Academic Press, 2023, pp. 347-368. doi: 10.1016/B978-0-323-91132-0.00012-5.
- [3] D. A. Senna et al., “Industry 4.0 as a strategy to contribute to the water supply universalization in developing countries”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, n.o 6, p. 111198, dic. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.111198.
- [4] A. Martini et al., “Robot-assisted Radical Cystectomy with Orthotopic Neobladder Reconstruction: Techniques and Functional Outcomes in Males”, *European Urology*, vol. 84, pp. 484-490, abr. 2023, doi: 10.1016/j.eururo.2023.04.009.
- [5] S. Demirtas, T. Cankurt, y E. Samur, “An adjustable robotic tool for nut running operations”, *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 191-195, ene. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.032.
- [6] D. S. Paraforos, M. Reutemann, G. Sharipov, R. Werner, y H. W. Griepentrog, “Total station data assessment using an industrial robotic arm for dynamic 3D in-field positioning with sub-centimetre accuracy”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 136, pp. 166-175, abr. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.03.009.
- [7] D. Hu, V. J. L. Gan, T. Wang, y L. Ma, “Multi-agent robotic system (MARS) for UAV-UGV path planning and automatic sensory data collection in cluttered environments”, *Building and Environment*, vol. 221, p. 109349, ago. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109349.
- [8] C. Bai, P. Dallasega, G. Orzes, y J. Sarkis, “Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective”, *International Journal of Production Economics*, vol. 229, p. 107776, nov. 2020, doi:

10.1016/j.ijpe.2020.107776.

- [9] R. Hamzeh, L. Thomas, J. Polzer, X. W. Xu, y H. Heinzl, “A Sensor Based Monitoring System for Real-Time Quality Control: Semi-Automatic Arc Welding Case Study”, *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 201-206, ene. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.029.
- [10] W. P. Syam, R. Leach, K. Rybalcenko, A. Gaio, y J. Crabtree, “In-process measurement of the surface quality for a novel finishing process for polymer additive manufacturing”, *Procedia CIRP*, vol. 75, pp. 108-113, ene. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.04.088.
- [11] M. Grazia Guerra y F. Lavecchia, “Measurement of additively manufactured freeform artefacts: The influence of surface texture on measurements carried out with optical techniques”, *Measurement*, vol. 209, p. 112540, mar. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112540.
- [12] C. Latsou, M. Farsi, y J. A. Erkoyuncu, “Digital twin-enabled automated anomaly detection and bottleneck identification in complex manufacturing systems using a multi-agent approach”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 67, pp. 242-264, abr. 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.02.008.
- [13] Z. Ali et al., “Design and development of a low-cost 5-DOF robotic arm for lightweight material handling and sorting applications: A case study for small manufacturing industries of Pakistan”, *Results in Engineering*, vol. 19, p. 101315, sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101315.
- [14] F. Yang y J. E. Hein, “Training a robotic arm to estimate the weight of a suspended object”, *Device*, vol. 1, n.o 1, p. 100011, jul. 2023, doi: 10.1016/j.device.2023.100011.
- [15] Y.-T. Tsai et al., “Utilization of a reinforcement learning algorithm for the accurate alignment of a robotic arm in a complete soft fabric shoe tongues automation process”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, pp. 501-513, jul. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.07.001.
- [16] J. Chamberlin, Y. Zhong, y Y. Wang, “Robots for Pharmaceutical Production: A Benchtop Robotic Automation Approach for Manufacturing Prefilled Syringes”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, n.o 37, pp. 469-474, ene. 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.227.
- [17] D. Li, R. Wei, Y. Du, X. Guan, y M. Zhou, “Measurement methods of geometrical parameters and amount of corrosion of steel bar”, *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 921-927, nov. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.018.
- [18] T. Saiboh et al., “Visual detection of formalin in food samples by using a microfluidic thread-based analytical device”, *Microchemical Journal*, vol. 190, p. 108685, jul. 2023, doi: 10.1016/j.microc.2023.108685.
- [19] G. J. da Silva, A. C. Borges, M. C. Moreira, y A. P. Rosa, “Statistical process control in assessing water quality in the Doce river basin after the collapse of the Fundão dam (Mariana, Brazil)”, *Journal of Environmental Management*, vol. 317, p. 115402, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115402.

- [20] D. Sarkar, “Advanced materials management for Indian construction industry by application of statistical process control tools”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 6934-6939, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.082.
- [21] L.-T. Zhao, T. Yang, R. Yan, y H.-B. Zhao, “Anomaly detection of the blast furnace smelting process using an improved multivariate statistical process control model”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 166, pp. 617-627, oct. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.08.035.
- [22] S. Huang y W. Zhang, “A fast calculation method of rolling times in the GNSS real-time compaction quality supervisory system”, *Advances in Engineering Software*, vol. 128, pp. 20-33, feb. 2019, doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.11.008.
- [23] Y. Liu, J. Cheng, C. Zou, L. Lu, y H. Jing, “Ignition delay times of ethane under O₂/CO₂ atmosphere at different pressures by shock tube and simulation methods”, *Combustion and Flame*, vol. 204, pp. 380-390, jun. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.03.031.