

Manufactura Inteligente,
Mecatrónica y Elementos Tecnológicos
de la Industria 4.0

Volumen 1



Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos en la Industria 4.0

Memorias del IV Congreso Internacional MIMETI 4.0
23-25 de Septiembre 2025, Querétaro, México
Instalaciones de la Universidad Tecnológica de Querétaro

Editorial
CIDESI

Automatización Del Dosificado De Soluciones Con Ayuda De Un Robot Colaborativo

Manuel Jesus Heredia Rios^{1*}, Isaí Jesús Rios Rosas², Francisco Domingo Calvo López², Enrique Pérez Gutiérrez¹, David Pinto Avendaño³, Humberto Salazar Ibargüen⁴, María Judith Percino Zacarías¹

¹ Unidad de Polímeros y Electrónica Orgánica, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

² Facultad de Electrónica, Decanato de Ingeniería Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México.

³ Dirección de Innovación y Transferencia del conocimiento, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

⁴ Centro Interdisciplinario de Investigación y Enseñanza de la Ciencia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

*col539773@colaborador.buap.mx

Resumen: En el presente trabajo se programó e implementó una rutina utilizando un robot colaborativo Yumi IRB 14000 de la compañía ABB para la manipulación de una micropipeta con el objetivo de automatizar procesos de dosificación de soluciones en un laboratorio de química. Para evaluar su desempeño, se llevaron a cabo pruebas utilizando diferentes disolventes, así como rutinas a distintas velocidades de operación. Esto permitió analizar tanto la precisión como la reproducibilidad del sistema bajo diferentes condiciones de trabajo. Los resultados demostraron que el robot es capaz de dispensar volúmenes de manera continua, estable y con un margen de error reducido, lo que valida su eficacia como herramienta de automatización en entornos experimentales. La implementación de este tipo de sistemas colaborativos no solo optimiza tareas rutinarias, sino que también reduce la variabilidad asociada al factor humano y aumenta la seguridad en la manipulación de reactivos.

Palabras Clave: automatización, dosificación, robot colaborativo.

1. Introducción

El creciente desarrollo de la Industria 4.0, también conocida como la cuarta revolución industrial (Masconi, 2015; Sommer, 2015; Díaz et al., 2017), ha impulsado la adopción de tecnologías avanzadas, entre las cuales destacan los robots colaborativos o Cobots (García Ortega, 2021). Estos dispositivos, diseñados para interactuar de manera segura y eficiente con humanos y otras máquinas, han demostrado ser herramientas versátiles en diversos procesos industriales y de investigación (Liu et al., 2024; Taesi et al., 2023). Su capacidad para realizar tareas de colaboración hombre-máquina y máquina-máquina ha abierto nuevas posibilidades en la automatización inteligente.

Courtney y Gudipati (2024) y Jiang et al. (2024) describen diversas aplicaciones de la robótica, la automatización y la inteligencia artificial con proyecciones a corto, mediano y largo plazo, tanto en el ámbito de la investigación como en la industria. A medida que estas tecnologías evolucionan, las tareas que deberán desempeñar los sistemas robóticos serán cada vez más complejas, incluyendo actividades críticas como la dispensación precisa de medicamentos (Shashiashvili, N, 2025), la fabricación de dispositivos que requieren condiciones de baja contaminación (Musa et al., 2025) o en la experimentación como lo es, la celda de procesos experimentales para el crecimiento de nano cristales (NC) RAINBOW diseñada por Xu et al. (2025).

En este contexto, resulta esencial que los robots sean capaces de manipular una amplia variedad de herramientas y adaptarse a distintos entornos de implementación. Por lo que, en el presente artículo se centra en el uso del robot colaborativo Yumi IRB 14000 de ABB, un sistema compuesto por dos brazos robóticos, cada uno con 7 grados de libertad lo que permite movimientos controlados y altamente precisos (ABB, s.f.).

Este robot fue programado para realizar tareas reproducibles en entornos de laboratorio, específicamente en la dosificación (depósito) de sustancias. Para ello, se utilizaron diferentes disolventes (agua destilada, agua/etanol 1:2, acetona) con el objetivo de evaluar la reproducibilidad del proceso de dosificación. Se analizaron parámetros clave, como la velocidad de desplazamiento, la cantidad de solución succionada y depositada (en gramos), así como la ejecución de la rutina por un tiempo prolongado.

2. Materiales y método

2.1 Materiales

El principal objeto de estudio, es analizar la viabilidad de la aplicación del robot colaborativo para la dosificación de soluciones, por lo que este será el sistema central del estudio realizado. El robot Yumi IRB 14000 (Figura 1), está equipado con dos brazos y grippers programables, lo que permite la manipulación precisa de herramientas e instrumentos de laboratorio, esto lo convierte en una herramienta versátil para tareas de automatización.



Figura 1. Robot ABB YuMi IRB 14000.

Para el depósito de las soluciones se utilizaron micropipetas con capacidad de 100-1000 μL . Para verificar la masa del volumen dosificado, se empleó una balanza analítica (OHAUS, s.f.). Previamente, se calibró el peso en gramos para los volúmenes dosificados (Krishnan, 2019; CENAM, 2016). En la Tabla 1 se presentan el valor de la masa obtenida (en μg) para cada volumen (en μL).

Tabla 1. Equivalencia entre microlitros de solución y microgramos.

Solución	MI	µg
Agua destilada	100	100
Agua destilada/etanol 1:2	100	93
Acetona	100	84

2.2 Programación del robot colaborativo

La programación del robot colaborativo puede realizarse de tres formas: mediante el proceso de guiado, a través del FlexPendant o utilizando el software Robot Studio (ABB Operating manual, s.f.). Dado que la sincronización y la precisión son aspectos críticos para garantizar la eficiencia del proceso de depósito, en este caso la programación se llevó a cabo utilizando el FlexPendant y el software Robot Studio. La programación se hace de forma secuencial, guardando cada punto de posición en la que sea desea definir las trayectorias del robot con ayuda del FlexPendant, mientras que en RobotStudio se lleva a cabo la modificación de parámetros (velocidad, desplazamiento, fuerza, etc.) e instrucciones específicas directamente en el código fuente, lo que brinda un control preciso y detallado sobre cada etapa de la programación del robot (ABB Robotics, 2018).

En la Figura 2 se muestra un diagrama simplificado del programa desarrollado para el robot, el cual describe el flujo de operaciones en el proceso de depósito de soluciones. El diagrama ilustra las rutinas programadas para cada brazo del robot. El programa fue desarrollado de manera secuencial, asignando al brazo derecho —encargado de sostener la micropipeta— la mayoría de las operaciones. Una vez que este brazo se posiciona al final de una trayectoria, envía una señal para activar la rutina del brazo izquierdo. Este último ejecuta movimientos a baja velocidad y con aproximación fina, destinados principalmente a presionar el émbolo de la micropipeta. Cuando alcanza la posición en la que cesa la presión sobre el émbolo, el brazo izquierdo envía una señal que permite reanudar la rutina del brazo derecho. Esta estrategia de programación asegura la correcta coordinación de ambos brazos, posibilitando tanto la aspiración de la solución como el depósito controlado, lo que a su vez permite evaluar el error de dosificación con ayuda de la balanza analítica.

2.3 Definición del espacio de trabajo

La definición del espacio de trabajo es un aspecto fundamental en los procesos automatizados, ya que el objetivo de la automatización es reducir la dependencia de un operador o supervisor durante períodos prolongados. En su lugar, sensores, actuadores y robots deben realizar las tareas de producción de manera autónoma dentro de un área delimitada, lo que además contribuye a la prevención de accidentes (FEMEVAL, s.f.).

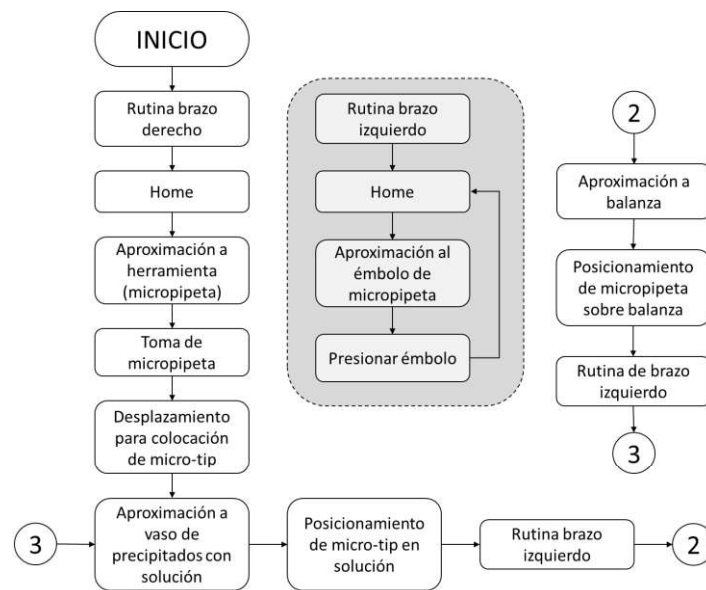


Figura 2. Diagrama del algoritmo de control implementado en el robot YUMI IRB 14000.

En la Figura 3 se muestra el espacio de trabajo definido para el robot IRB 14000, donde las herramientas e instrumentos de laboratorio están colocados sobre una mesa de trabajo.

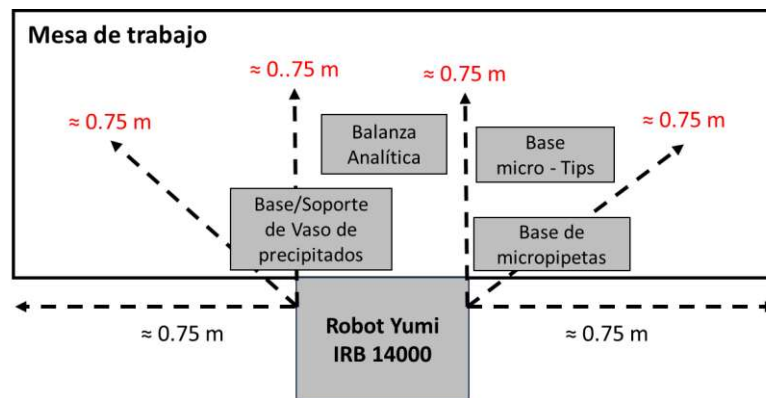


Figura 3. Definición del espacio de trabajo.

Para una definición precisa del espacio de trabajo es indispensable considerar los límites mecánicos de los actuadores que controlan los movimientos del robot, a fin de evitar sobreesfuerzos que puedan comprometer su integridad. Como se muestra en la figura 3, la distancia máxima de operación segura para cada brazo es de 0.75 m , por lo que el espacio de trabajo se encuentra delimitado dentro de este rango. Esta restricción asegura que el robot pueda operar de manera continua durante periodos prolongados, sin riesgo de fallos mecánicos ni de activación de los protocolos de protección que interrumpen la ejecución de la rutina programada (ABB, s.f.; ABB Robotics, 2018).

3 Resultados

Para la recolección de la solución depositada se empleó una cápsula de porcelana con una masa inicial de 32.89 g, considerada como valor de tara. Este valor de referencia permitió determinar con precisión la masa neta correspondiente al volumen dispensado en cada prueba de depósito automatizado.

Con el fin de validar la capacidad de aspiración de la micropipeta, se realizaron inicialmente ensayos de succión manual (Tabla 2), registrando la masa del volumen succionado. Posteriormente, se ejecutó el proceso de succión y depósito de manera automatizada (Depósito, Tabla2), lo que permitió comparar el volumen succionado de forma manual y el realizado por el robot Yumi. Con ello fue posible evaluar la precisión, consistencia y repetibilidad del sistema automatizado, para esta primera parte se utiliza agua destilada.

En las tablas 2-6, se muestran los resultados obtenidos al dosificar 800 μl , 600 μl , 400 μl , 200 μl y 100 μl . Vale la pena mencionar que las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, lo cual debe tomarse en cuenta ya que, debido a la presión de vapor del etanol y la acetona puede evaporarse rápidamente y cambiar el volumen (y la masa) depositada, en un lapso de tiempo corto (Manzur & Cardoso, 2015; Universidad Veracruzana, 2022; UNAM, s.f.).

Tabla 2. Depósito automatizado de agua destilada (~800 μl)

No. De muestra	Succión (μl)	Depósito (μl)	Dif (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	797.12	788.25	1.12	25.8
2	797.12	788.65	1.07	25.8
3	797.12	788.76	1.05	25.8
4	797.12	788.74	1.06	25.8
5	797.12	788.61	1.07	25.8
Error promedio (%)			1.07	

Tabla 3. Depósito automatizado de agua destilada (~600 μl)

No. De muestra	Succión (μl)	Depósito (μl)	Dif (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	598.65	591.84	1.14	25.8
2	598.65	591.81	1.15	25.8
3	598.65	591.88	1.14	25.8
4	598.65	591.91	1.13	25.8
5	598.65	591.85	1.14	25.8
Error promedio (%)			1.14	

Tabla 4. Depósito automatizado de agua destilada (~400 µl)

No. De muestra	Succión (µl)	Depósito (µl)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	398.47	393.85	1.17	25.8
2	398.47	393.92	1.15	25.8
3	398.47	393.87	1.16	25.8
4	398.47	393.9	1.15	25.8
5	398.47	393.89	1.16	25.8
Error promedio (%)			1.16	

Tabla 5. Depósito automatizado de agua destilada (~200µl)

No. De muestra	Succión (µl)	Depósito (µl)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	198.16	193.25	2.51	25.8
2	198.16	193.26	2.50	25.8
3	198.16	193.37	2.45	25.8
4	198.16	193.54	2.36	25.8
5	198.16	193.28	2.49	25.8
Error promedio (%)			2.46	

Tabla 6. Depósito automatizado de agua destilada (~100µl)

No. De muestra	Succión (µl)	Depósito (µl)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	98.8	95.8	3.08	25.8
2	98.8	95.4	3.50	25.8
3	98.8	95.65	3.24	25.8
4	98.8	95.54	3.35	25.8
5	98.8	95.37	3.53	25.8
Error promedio (%)			3.34	

La Figura 4 muestra de forma gráfica las variaciones observadas entre el volumen succionado y el volumen depositado durante el proceso automatizado, tomando en cuenta el porcentaje de error promedio (EP), obtenido después de 5 depósitos consecutivos.

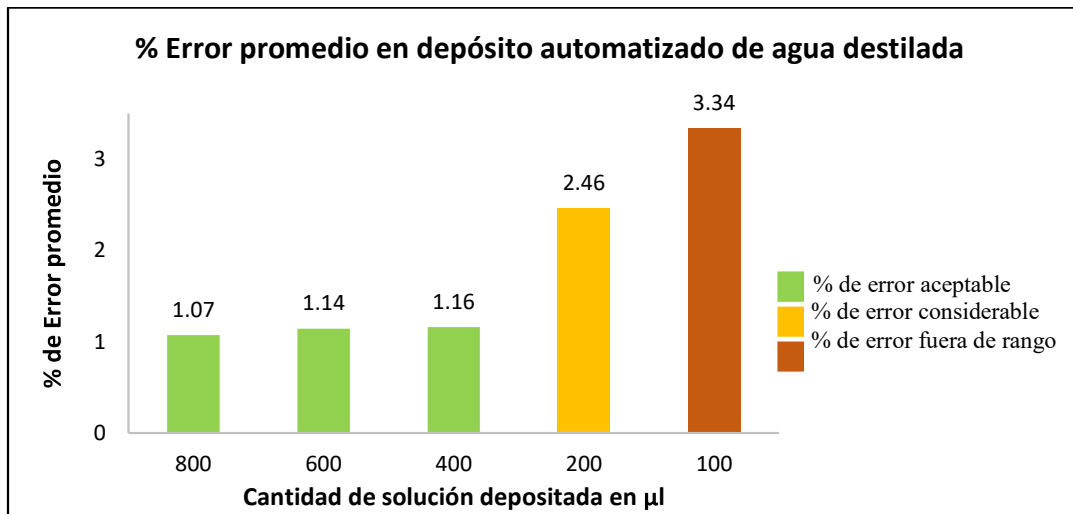


Figura 4. Gráfica de porcentaje de error promedio en el depósito automatizado de agua destilada.

En la gráfica mostrada en la figura 4, se aprecia que el porcentaje de error promedio (EP), incrementa de 1.07% para 800 µl, hasta un 3.34% para 100 µl, esto puede deberse a que para volúmenes pequeños la precisión de la micropipeta tiene mayor variación. Además, se observó que debido al volumen tan pequeño fue evidente la evaporación del agua (Manzur & Cardoso, 2015).

Para esta primera prueba, se estableció una velocidad del punto central de la herramienta (tool center point, TCP) para cada desplazamiento del brazo derecho a 1000 mm/s, para el brazo izquierdo, la velocidad de aproximación a la micropipeta también fue fijada a 1000 mm/s, mientras que al hacer contacto con el émbolo se fijó una velocidad lineal de 20 mm/s, tanto para la presión como para la liberación del émbolo. En los depósitos subsecuentes, se aumentó la velocidad a 5000 mm/s, la velocidad para presionar el émbolo, se conservó en 20 mm/s, en la gráfica mostrada en la figura 5 se muestra el EP, para el depósito de agua destilada a mayor velocidad.

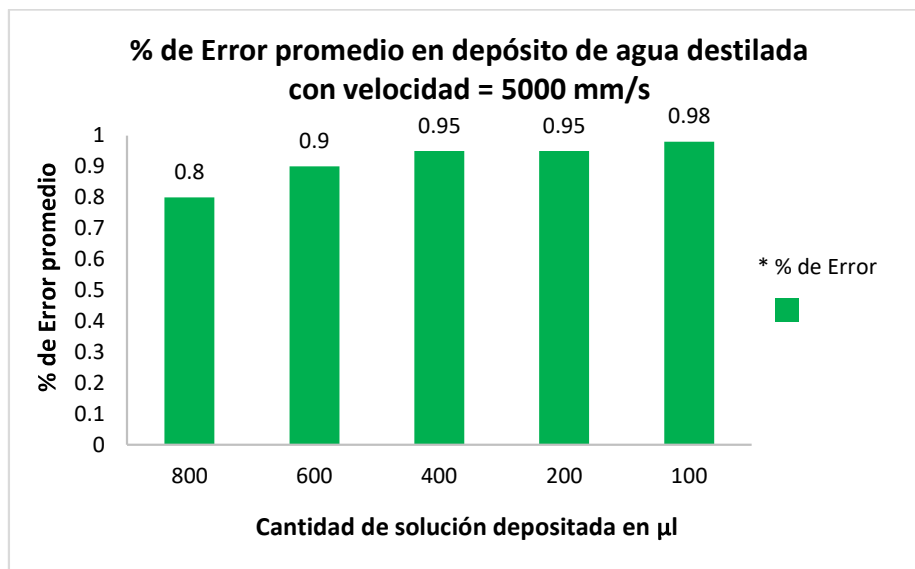


Figura 5. Porcentaje de EP, para el depósito de agua con aumento de velocidad.

La gráfica anterior muestra que, con el aumento de velocidad, el EP disminuye considerablemente, estando por debajo del 1%, incluso para volúmenes de 200 μl y 100 μl , donde el error parece ser más grande en comparación con los volúmenes de 800 μl , 600 μl y 400 μl , sin embargo, esto es aceptable ya que no se pierde una cantidad considerable de solución.

Para el caso de las soluciones agua/etanol 1:2, y de la acetona, los resultados se muestran la gráfica de la figura 6, se aumentó la velocidad a 6000 mm/s, y se analizaron hasta 10 ciclos de succión-depósito, para volúmenes de 500 μl y 100 μl

La figura 6, muestra que, para la solución agua/etanol (línea verde), hay una variación en el EP del 0.51% a 0.63% esto porque, al disminuir el volumen, la evaporación de la solución es mucho más rápida, la temperatura ambiente para el depósito de esta solución se registró en 23.7 °C, sin embargo, se aprecia que es posible realizar hasta 10 depósitos continuos sin variaciones significativas o un aumento en el EP, manteniéndose por debajo del 1%.

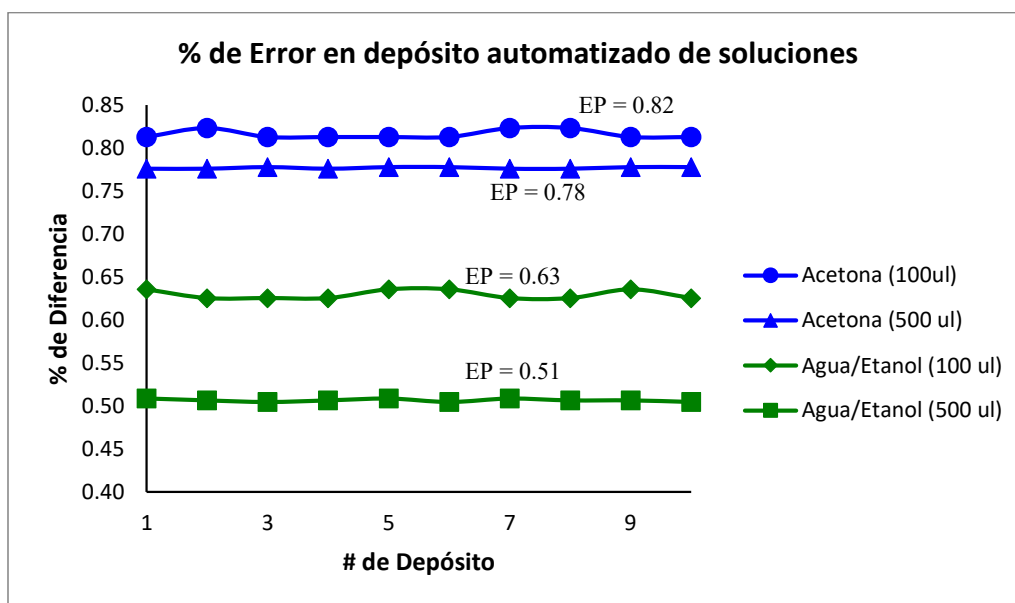


Figura 6. Porcentaje de error para el depósito automatizado de soluciones.

Para el caso de la acetona, en la figura 6 se presenta que el EP, es más grande en comparación de la mezcla agua/etanol 1:2, esto debido a la presión de vapor de la acetona, que es mayor que la del agua y el etanol (UNAM, s.f.), haciendo que se evapore mucho más rápido, sin embargo, para los 10 depósitos que se estudiaron, no se presentan cambios significativos ni aumento en el error.

Al tener un $EP < 1\%$, con disoluciones que presentan evaporaciones mucho más rápidas, con respecto al agua destilada, se considera viable la aplicación del robot colaborativo para su incorporación en procesos más complejos.

4 Conclusiones

En el presente estudio se incorporó un robot colaborativo con la finalidad de automatizar la manipulación de instrumentos de laboratorio, utilizando como caso de prueba una micropipeta. El propósito principal fue

analizar su precisión y repetibilidad durante la entrega controlada de disolventes. Para ello, se emplearon líquidos con distintos puntos de ebullición y se programaron rutinas de operación a velocidades variables, buscando reducir las desviaciones asociadas al proceso de dispensación. Los resultados mostraron que el sistema robótico puede realizar la transferencia de volúmenes de manera continua y estable, manteniendo un error promedio mínimo, lo que confirma su viabilidad para tareas experimentales de mayor complejidad. Entre las aplicaciones potenciales se encuentran la síntesis automatizada de materiales orgánicos y la deposición de capas funcionales, etapas clave en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, tales como celdas solares (OSCs) y diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs).

Referencias

- Mosconi, F. (2015). *The new European industrial policy: Global competitiveness and the manufacturing renaissance*. Routledge.
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution—Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512–1532. <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>
- Díaz, R. B., Francolí, J. F., & Martínez, C. P. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía Industrial*, 406, 151–164.
- García Ortega, B. (2021). Industria 4.0. La cuarta revolución industrial. [Libro en línea]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/353437543_Industria_40_La_cuarta_revolucion_industrial
- Liu, L., Guo, F., Zou, Z., & Duffy, V. G. (2024). Application, development and future opportunities of collaborative robots (cobots) in manufacturing: A literature review. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(4), 915–932. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2236823>
- Taesi, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT applications—Recent advances and challenges. *Robotics*, 12(3), 79. <https://doi.org/10.3390/robotics12030079>
- Courtney, P., & Gudipati, R. (2024). Automating discovery: Laboratory automation, high-throughput experimentation, diagnostics and laboratory robotics/AI. euRobotics. <https://eu-robotics.net/wp-content/uploads/ONLINE-v6-2024.06-laboratory-robotics-paper.pdf>
- Jiang, J., et al. (2024). Artificial intelligence and automation to power the future of chemistry. *Cell Reports Physical Science*, 5(6), 102049. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102049>
- Shashiashvili, N. (2025). Precise drug dosing technologies and robotization in clinical pharmacy. *Sociopolitologos*, 2(18). <https://doi.org/10.52340/splogos.2025.02.18>
- Musa, Y., Tantawi, K., Mikhail, M., Ma, J., Alharthi, D., Flatt, L., & Potter, L. (2025). Semiconductor manufacturing industry: Assessment, challenges, and future trends. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35222.05449>
- Xu, J., Moran, C.H.J., Ghorai, A. et al. (2025). Autonomous multi-robot synthesis and optimization of metal halide perovskite nanocrystals. *Nat Commun* **16**, 7841 <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63209-4>
- ABB. (s. f.). Product manual — IRB 14000 YuMi [PDF]. ABB AB. <https://library.e.abb.com/public/fc0d5c31604f48ed998229f626f72036/3HAC052983%20PM%20IRB%2014000-es.pdf>
- OHAUS. (s. f.). Explorer® semi-micro balances [PDF]. Recuperado de <https://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=28112>
- Krishnan, K. U., Adishes, M., Navaneethakrishnan, L., & Manjunathan, R. (2019). Calibration of micropipettes through gravimetric solution and its beneficial impact on research. *BioTechnology: An Indian Journal*, 15(5), 115.
- CENAM. (2016). Guía técnica sobre trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en los servicios de calibración de recipientes volumétricos por el método gravimétrico. CENAM. https://ada.educatic.unam.mx/pluginfile.php/8005/mod_assign/intro/7.%20Guia%20CENAM%20volumen%202016.pdf

ABB. (s. f.). Operating manual – IRB 14000 YuMi [PDF]. ABB AB. <https://cdn.pennair.com/media/2023/11/3HAC052986-OM-IRB-14000-en.pdf>

ABB Robotics. (2018). Manual de referencia técnica: Instrucciones, funciones y tipos de datos de RAPID. RobotWare 6.

FEMEVAL. (s. f.). Guía de seguridad en el uso de robots industriales [PDF]. Recuperado de https://www.femeval.es/dam/jcr:fd091e5f-3c97-42fd-9981-680e8232a645/Guia_Robots.pdf

Manzur, A., & Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. Revista Mexicana de Física, 61(1), 31–34. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Universidad Veracruzana. (2022). Acetona [PDF]. <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2022/04/2.-Acetona.pdf>

UNAM. (s. f.). Etanol [PDF]. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/12etanol.pdf>