

**Análisis comparativo de controles Neumáticos y Electroneumáticos en diferentes tipos de Secuencias
(Comparative analysis of Pneumatic and Electropneumatic controls in different types of Sequences)**

Reyes Macías Carlos Bryan; MSc. Johnatan Israel Corrales Bonilla

**INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**Julio - diciembre, V°4-N°2;
2023

- ✓ **Recibido:** 08/12/2023
- ✓ **Aceptado:** 19/12/2023
- ✓ **Publicado:** 30/12/2023

PAÍS

- Pa La Maná, Ecuador
- Pa La Maná, Ecuador

INSTITUCIÓN

- Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador
- Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador

CORREO:

- M carlos.reyes3875@utc.edu.ec
- M johnatan.corrales5518@utc.edu.ec

ORCID:

- ORCID <https://orcid.org/0009-0006-7487-6736>
- ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0843-8704>

FORMATO DE CITA APA.

Reyes, C. Corrales, J. (2023). *Análisis comparativo de controles Neumáticos y Electroneumáticos en diferentes tipos de Secuencias*. Revista G-ner@ndo, V°4 (N°2). 883 – 902.

Resumen

El presente trabajo aborda una comparación exhaustiva entre sistemas de control neumático y electroneumático, centrándose en tres métodos de secuencia: intuitivo, paso a paso y en cascada. Utilizando el módulo didáctico de control de la Universidad Técnica de Cotopaxi, se realizaron ensayos bajo las secuencias A+B+C+A-B-C- y A+B+A-C+B-C-. Se llevaron a cabo tres ensayos para validar los datos, utilizando instrumentos como cronómetros y pinzas amperimétricas para medir tiempo y consumo eléctrico, respectivamente. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA y pruebas de Tukey. Los resultados destacan diferencias significativas en costo, eficiencia energética y velocidad de respuesta entre los sistemas. Este estudio proporciona una visión integral y detallada de las prestaciones de ambos sistemas, contribuyendo a la comprensión y toma de decisiones en entornos industriales.

Palabras clave: control neumático, electroneumática, secuencias de control, análisis comparativo.

Abstract:

The present work deals with a comprehensive comparison between pneumatic and electro-pneumatic control systems, focusing on three sequence methods: intuitive, step-by-step and cascade. Using the didactic control module of the Universidad Técnica de Cotopaxi, tests were conducted under the sequences A+B+C+A-B-C- and A+B+A-C+B-C+B-C-. Three trials were carried out to validate the data, using instruments such as stopwatches and ammeter clamps to measure time and electrical consumption, respectively. Statistical analysis was performed using ANOVA and Tukey tests. The results highlight significant differences in cost, energy efficiency and speed of response between the systems. This study provides a comprehensive and detailed view of the performance of both systems, contributing to the understanding and decision making in industrial environments.

Keywords: pneumatic control, electro-pneumatics, control sequences, comparative analysis.

Introducción

En el contexto de la automatización industrial, la elección entre sistemas de control neumático y electroneumático desempeña un papel crucial en el rendimiento y eficiencia de los procesos B. (Oladapo, et al. 2017). La continua evolución de la tecnología ha generado un debate constante sobre cuál de estos sistemas ofrece mayores ventajas en términos de costo, eficiencia energética, velocidad de respuesta y capacidad de automatización compleja, (Liu and, 2021). Esta dicotomía ha impulsado la necesidad de realizar análisis comparativos detallados para respaldar decisiones informadas en entornos industriales, (Oladapo, et al. 2017). El presente estudio se enfoca en explorar estas diferencias, centrándose en tres métodos de secuencia (intuitivo, paso a paso y en cascada) y utilizando la secuencia A+B+C+A-B-C-. El análisis se basa en datos recopilados mediante ensayos en un módulo didáctico de control neumático y electroneumático, tomando en cuenta variables críticas como costo, consumo eléctrico, tiempo de respuesta y consumo de aire. Con este enfoque, buscamos proporcionar una visión integral que contribuya a la toma de decisiones informadas en la implementación de sistemas de control en entornos industriales. Además, este artículo presenta los resultados del análisis estadístico y las comparaciones con la literatura existente, ofreciendo una contribución significativa al entendimiento de las ventajas y desventajas de los sistemas de control neumático y electroneumático.

Los controles neumáticos y electroneumáticos son sistemas de control ampliamente utilizados en una amplia gama de aplicaciones industriales, desde la automatización de procesos hasta la maquinaria de fabricación, Ambos sistemas tienen sus propias ventajas y desventajas, y la elección del sistema adecuado depende de las necesidades específicas de la aplicación. El análisis de diferentes métodos de secuencia, como intuitivo, paso a paso y cascada, es fundamental para la solución de problemas y el diseño de sistemas neumáticos y electroneumáticos, (Guerrero, 2018). Estos métodos permiten estructurar el mando o control

adecuado para cada caso, garantizando una solución óptima tanto en términos económicos como en resolución, (Muriel, 2009).

El análisis comparativo de los controles neumáticos y electroneumáticos en diferentes tipos de secuencia es un tema importante por varias razones. En primer lugar, ayuda a comprender las ventajas y desventajas de cada sistema en diferentes aplicaciones. Por ejemplo, los controles neumáticos son una buena opción para aplicaciones que requieren un alto grado de robustez y facilidad de mantenimiento, como las máquinas de producción, (Foit, et al. 2018) Los controles electroneumáticos son una buena opción para aplicaciones que requieren un alto grado de precisión y flexibilidad, como los sistemas de automatización de procesos. En segundo lugar, puede ayudar a los ingenieros a seleccionar el sistema de control adecuado para una aplicación específica, (Mark, et al. 2022) Al comparar las ventajas y desventajas de cada sistema, los ingenieros pueden tomar una decisión informada sobre el sistema que mejor se adapta a sus necesidades. En tercer lugar, puede ayudar a mejorar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de control, al comprender cómo funcionan los diferentes sistemas de control, los ingenieros pueden diseñar sistemas más eficientes y confiables, (Bristol, et al. 2022).

En el ámbito de la automatización industrial, previos estudios han abordado la comparación entre sistemas de control neumático y electroneumático, destacando diferencias sustanciales en aspectos como costo, eficiencia y velocidad de respuesta. Estos trabajos han contribuido significativamente al entendimiento de cada sistema, pero la diversidad de condiciones experimentales y métodos de secuencia utilizados en estudios anteriores genera la necesidad de una investigación más específica y detallada. Además, aunque algunos análisis han evaluado variables clave como costo y eficiencia energética, pocos se han aventurado a abordar la integración de sistemas complejos y su capacidad para adaptarse a diversas tareas.

A pesar de los avances previos, aún es necesario llevar a cabo un estudio que no solo profundice en la comparación estadística de variables específicas, sino que también examine la capacidad de automatización compleja y la adaptabilidad a diferentes tareas, (Foit, et al. 2018). Este estudio pretende cerrar esta brecha, proporcionando una evaluación más completa y específica de los sistemas de control neumático y electroneumático. Además, se busca identificar áreas de mejora y explorar posibles direcciones para investigaciones futuras, contribuyendo así a una comprensión más completa y actualizada en este campo en constante evolución.

La Tabla 1 de comparación destaca de manera concisa los beneficios inherentes a los sistemas neumáticos y electroneumáticos, consolidando la perspectiva de varios autores en el campo de la automatización industrial, extraída de diversas obras y estudios especializados, (Gazali, et al. 2022) Este compendio, derivado de investigaciones y análisis previos, ofrece una visión panorámica de las fortalezas distintivas de cada sistema en categorías clave, desde flexibilidad y precisión hasta eficiencia energética y capacidad para la automatización compleja. Al recopilar y sintetizar las contribuciones, esta tabla proporciona una valiosa referencia para aquellos involucrados en la toma de decisiones en la implementación de sistemas de control, permitiendo una evaluación informada de las ventajas y consideraciones asociadas tanto a los sistemas neumáticos como a los electroneumáticos, (Baralap, et al. 2014).

Tabla 1. Comparación de beneficios del uso de sistemas Neumáticos y Electroneumáticos, dividido por categorías, recopilación de [2],[8]-[11]

Categoría Beneficios	de	Tamaño	Sistemas Electroneumáticos
Flexibilidad y Presión	y	Alta flexibilidad en aplicaciones simples.	Mayor precisión en control y posicionamiento.
		Ideal para operaciones básicas. -	Adaptable a tareas más complejas.
Costo de Implementación	de	Generalmente menor costo inicial.	- Costos iniciales pueden ser más altos
		Menos costoso en mantenimiento.	Mayor durabilidad y menor mantenimiento.
Eficiencia Energética	de	Consumo de energía generalmente bajo.	Mayor eficiencia energética en algunas tareas.
		Adecuado para operaciones intermitentes. -	Mejor gestión de energía en aplicaciones continuas.
Velocidad de Respuesta	de	Respuesta rápida a cambios de presión.	Mayor velocidad y precisión en respuesta.
		Adecuado para aplicaciones de baja velocidad.	Ideal para aplicaciones de alta velocidad.
Ambiente Trabajo	de	Resistencia a ambientes adversos.	Menos sensible a condiciones ambientales.
		Menos afectado por temperaturas extremas.	Rendimiento estable en una variedad de condiciones.
Automatización Compleja	de	- Limitado en funciones de automatización compleja. Más simple en aplicaciones básicas. - Adaptable a sistemas de control avanzados.	- Capacidad para integrar funciones avanzadas y complejas.

Método y materiales

Este estudio se clasifica como un estudio experimental comparativo, ya que busca evaluar y comparar de manera sistemática los sistemas de control neumáticos y electroneumáticos bajo diferentes condiciones y métodos de secuencia. La investigación implica la manipulación de variables, como los métodos de secuencia y los tipos de circuitos, para analizar cómo afectan a las variables de interés, como el costo, el tiempo de respuesta, el consumo eléctrico y el consumo de aire, (Muriel, et al. 2009). La utilización de un diseño experimental y la aplicación de pruebas estadísticas como ANOVA y Tukey refuerzan la naturaleza experimental y comparativa de este estudio. Se propuso realizar un análisis comparativo exhaustivo entre controles neumáticos y electroneumáticos, centrándose en tres métodos de secuencia (intuitivo, paso a paso y en cascada) mediante la aplicación de las secuencias A+B+C+A-B-C- y A+B+A-C+B-C-. La plataforma experimental utilizada fue el módulo didáctico de control neumático y electroneumático del laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, aprovechando su versatilidad para configurar y evaluar diferentes escenarios operativos.

Procedimiento

Se realizaron tres ensayos bajo las mismas condiciones previas a la validación de datos. Durante estos ensayos, se llevó a cabo un análisis comparativo utilizando dos secuencias distintas: A+B+C+A-B-C- y A+B+A-C+B-C-. Los datos para el tiempo se recopilaban mediante cronómetros del laboratorio, mientras que el consumo energético se midió con una pinza amperimétrica (Fluke 393 FC) del laboratorio. Los costos de implementación se determinaron a partir de datos del mercado proporcionados por tres proveedores, tomando los valores más bajos para cada componente.

Materiales

Se utilizaron cronómetros de laboratorio para medir el tiempo, una pinza amperimétrica Fluke 393 FC para medir el consumo energético, y datos del mercado de tres proveedores para determinar los costos de implementación. Además, se emplearon simulaciones previas con FluidSim V4.2p/1.7 Neumática (versión Demo) para diseñar y armar los circuitos. El módulo didáctico consta de un compresor con acumulador de aire, unidad de mantenimiento, red de distribución de aire mediante mangueras, válvulas distribuidoras, selectoras, reguladores de caudal, cilindros y, adicionalmente, para la parte electroneumática, un Logo y un módulo de salidas tipo relé, y finales de carrera.

Diseño Experimental

El diseño experimental se centró en comparar las respuestas de los sistemas neumáticos y electroneumáticos a diferentes métodos de secuencia. Se utilizó un diseño factorial considerando factores como el método de control, el tipo de circuito y la secuencia.

Recolección de Datos

Los datos de tiempo se recolectaron mediante cronómetros, el consumo energético se midió con una pinza amperimétrica, y los costos de implementación se obtuvieron a partir de datos del mercado. Los circuitos se armaron en base a simulaciones previas con FluidSim.

Análisis Estadístico

El conjunto de datos utilizado en el análisis estadístico se generó a partir de las respuestas de los sistemas neumáticos y electroneumáticos a las diferentes secuencias y métodos de control. El análisis estadístico se realizó utilizando el software R, un entorno de programación y análisis estadístico de código abierto y libre acceso. Se llevaron a cabo pruebas de ANOVA, pruebas de Tukey y análisis de correlación para obtener insights detallados sobre las diferencias y relaciones entre las variables estudiadas.

Análisis Resultados

Simulación de circuitos y ensamblaje

Previamente al montaje de los circuitos en el módulo didáctico, se llevó a cabo una fase crucial de simulación utilizando el software FluidSim V4.2p/1.7 Neumática en su versión Demo. Esta herramienta permitió diseñar y evaluar virtualmente los circuitos neumáticos, proporcionando una visión anticipada de su funcionamiento bajo las secuencias A+B+C+A-B-C- y A+B+A-C+B-C-. La simulación contribuyó a la identificación y corrección de posibles problemas antes de la implementación física, optimizando así el proceso experimental. La Figura 1, muestra la simulación de uno de los circuitos; la secuencia A+B+C+A-B-C-, utilizando el método intuitivo neumático.

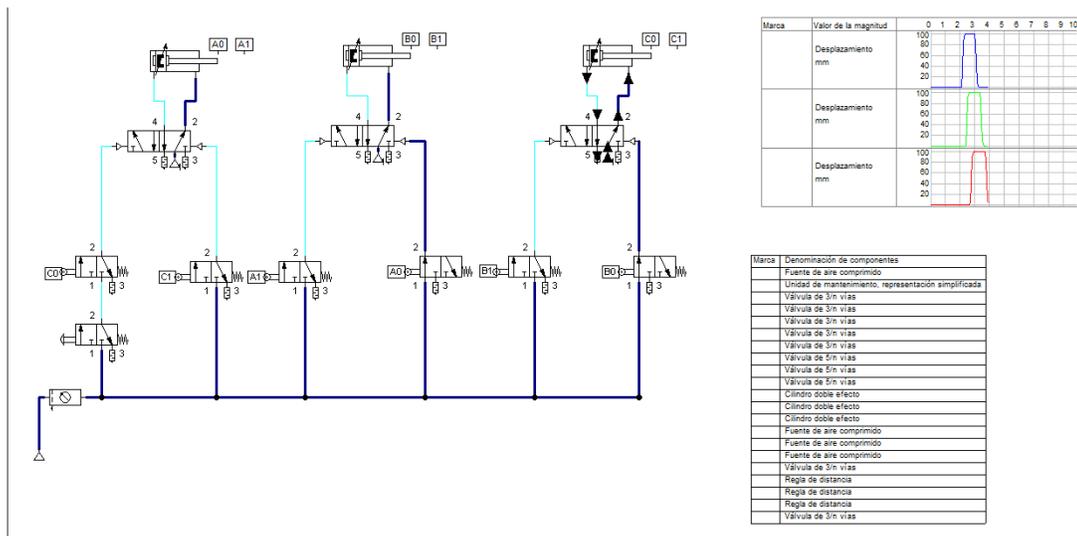


Figura 1. Simulación del circuito neumático, secuencia A+B+C+A-B-C-

Una vez que se tuvo todos los circuitos simulados, se procedió al montaje de los circuitos en el módulo didáctico. La Figura 2, muestra una imagen del circuito implementado.



Figura 2. Implementación de circuitos neumáticos en el módulo didáctico

Resultados de los ensayos

Para establecer el análisis las variables han sido meticulosamente estudiadas a través de ensayos realizados en un módulo didáctico de laboratorio, donde se aplicaron dos secuencias distintas, $A+B+C+A-B-C-$ y $A+B+A-C+B-C-$, utilizando tres métodos de control (Intuitiva, Paso a Paso y en Cascada) y dos tipos de circuitos (Neumático y Electroneumático), un resumen de los resultados obtenidos se detalla en la Tabla 2 para la primera secuencia y en la Tabla 3 para la segunda.

Tabla 2. Costo, consumo eléctrico, consumo de aire, tiempo de respuesta en cada método y en diferentes ensayos para la secuencia A+B+C+A-B-C-

Ensayo	Método	Tipo de Circuito	Costo (USD)	Consumo Eléctrico (W)	Tiempo Respuesta (s)	Consumo de Aire (L/min)
1	Intuitiva	Neumático	847	857	5.2	120
1	Paso a Paso	Neumático	856	843	3.2	125
1	En Cascada	Neumático	843	862	5.3	124
1	Intuitiva	Electroneumático	900	860	5.0	130
1	Paso a Paso	Electroneumático	910	870	4.9	135
1	En Cascada	Electroneumático	880	880	5.1	128
2	Intuitiva	Neumático	845	847	5.1	118
2	Paso a Paso	Neumático	857	856	3.1	120
2	En Cascada	Neumático	843	843	5.3	122
2	Intuitiva	Electroneumático	910	865	5.2	128
2	Paso a Paso	Electroneumático	900	860	3.3	125
2	En Cascada	Electroneumático	880	875	5.0	130
3	Intuitiva	Neumático	862	845	5.2	120
3	Paso a Paso	Neumático	847	857	3.2	125
3	En Cascada	Neumático	856	856	5.3	124
3	Intuitiva	Electroneumático	900	860	5.0	130
3	Paso a Paso	Electroneumático	910	870	4.9	135
3	En Cascada	Electroneumático	880	880	5.1	128

Tabla 3. Costo, consumo eléctrico, consumo de aire, tiempo de respuesta en cada método y en diferentes ensayos para la secuencia A+B+A-C+B-C-

Ensayo	Método	Tipo de Circuito	Costo (USD)	Consumo Eléctrico (W)	Tiempo Respuesta (s)	Consumo de Aire (L/min)
1	Paso a Paso	Neumático	\$860	865	5.2	128
1	En Cascada	Neumático	\$870	870	4.9	135
1	Paso a Paso	Electroneumático	\$855	858	5.1	130
1	En Cascada	Electroneumático	\$865	872	5.0	133
2	Paso a Paso	Neumático	\$862	850	5.3	122
2	En Cascada	Neumático	\$875	875	5.0	130
2	Paso a Paso	Electroneumático	\$860	860	5.2	128
2	En Cascada	Electroneumático	\$870	865	4.9	135
3	Paso a Paso	Neumático	\$855	862	5.2	120
3	En Cascada	Neumático	\$865	865	5.3	124
3	Paso a Paso	Electroneumático	\$857	857	5.1	128
3	En Cascada	Electroneumático	\$870	870	5.0	133

3.2. Análisis de la varianza ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) ha sido ejecutado con el objetivo de examinar de manera exhaustiva las diferencias significativas entre las medias de múltiples grupos en el marco de nuestro estudio experimental. En este análisis, hemos evaluado variables cruciales que impactan el rendimiento de sistemas neumáticos y electroneumáticos, tales como el costo de implementación, el consumo eléctrico, el tiempo de respuesta de los actuadores y el consumo de aire. Los conjuntos de datos utilizados para este análisis incorporan resultados de tres ensayos independientes para cada combinación de métodos y circuitos, proporcionando así una

representación robusta y confiable de los efectos de estas variables en el desempeño de los sistemas analizados. Este análisis estadístico realizado en el software R, es esencial para discernir diferencias significativas entre los grupos, y las conclusiones obtenidas contribuirán de manera significativa a nuestra comprensión de la eficacia relativa de los sistemas neumáticos y electroneumáticos en diversos contextos de secuencia y control. Los resultados se presentan a través de cuatro figuras ANOVA, generadas de las 4 variables de interés. La Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6 proporcionan un desglose detallado de la variación en cada variable en relación con los métodos, tipos de circuito, secuencias y ensayos, destacando la significancia estadística con asteriscos (*). El análisis se ha completado mediante la función `summary()` en R para cada variable, permitiendo una evaluación exhaustiva de las diferencias observadas y respaldando la interpretación de los resultados obtenidos en cada aspecto evaluado.

Figura 3. Output ANOVA de la variable costo

```
ANOVA para Costo:
> summary(anova_costo)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	value	Pr(>F)
Metodo	2	305.3	152.67	1.675	0.228	
Tipo_Circuito	1	80.7	80.67	0.885	0.365	
Secuencia	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Ensayo	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Metodo:Tipo_Circuito	2	41.3	20.67	0.227	0.801	
Metodo:Secuencia	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Tipo_Circuito:Secuencia	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Tipo_Circuito:Ensayo	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Metodo:Tipo_Circuito:Secuencia	1	0.0	0.00	0.000	1.000	
Residuals	12	1094.0	91.17			

La Figura 3 ANOVA muestra los grados de libertad (Df), la suma de cuadrados (Sum Sq), la media de cuadrados (Mean Sq), el valor F y el valor p (Pr(>F)) para cada factor y sus interacciones. En este caso, el método de control y las interacciones entre el método y el tipo de circuito presentan valores de p que superan el umbral de significancia estadística (0.05), indicando que no hay diferencias significativas en el costo entre estos factores. En cambio, el tipo de circuito por sí mismo muestra un valor de p (0.365) que sugiere cierta significancia, aunque está al borde del umbral. La Secuencia, Ensayo y otras interacciones no muestran

efectos significativos en el costo. La suma de cuadrados residual es 1094.0 y la media de cuadrados residual es 91.17, proporcionando una medida de la variabilidad no explicada por los factores considerados en el modelo.

Figura 4. Output ANOVA de la variable consumo eléctrico.

```
ANOVA para Consumo Eléctrico:
> summary(anova_consumo)

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Metodo        2   388.0   194.00   6.787 0.0107 *
Tipo_Circuito 1    60.2    60.17   2.105 0.1725
Secuencia     1     0.0     0.00   0.000 1.0000
Ensayo        1     0.0     0.00   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito 2  389.3   194.67   6.810 0.0106 *
Metodo:Secuencia 1     0.0     0.00   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Secuencia 1  0.0     0.00   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Ensayo 1  0.0     0.00   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito:Secuencia 1 0.0     0.00   0.000 1.0000
Residuals    12   343.0    28.58
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

En la Figura 4, el análisis ANOVA para Consumo Eléctrico muestra diferencias significativas en los métodos de control (Metodo) y la interacción Método:Tipo_Circuito (* $p < 0.05$). Las comparaciones post hoc, como la prueba de Tukey, y visualizaciones adicionales pueden revelar las diferencias.

Figura 5. Output ANOVA de la variable tiempo de respuesta específicas.

```
ANOVA para Tiempo de Respuesta:
> summary(anova_tiempo)

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Metodo        2  0.893   0.447   0.685 0.5230
Tipo_Circuito 1  3.375   3.375   5.172 0.0421 *
Secuencia     1  0.000   0.000   0.000 1.0000
Ensayo        1  0.000   0.000   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito 2  1.480   0.740   1.134 0.3539
Metodo:Secuencia 1  0.000   0.000   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Secuencia 1 0.000   0.000   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Ensayo 1  0.000   0.000   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito:Secuencia 1 0.000   0.000   0.000 1.0000
Residuals    12  7.830   0.652
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

En la Figura 5, el valor p para el Tipo de Circuito es 0.0421, lo que sugiere que existe una diferencia estadísticamente significativa en el tiempo de respuesta entre los dos tipos de circuito.

Sin embargo, no se observan diferencias significativas en el tiempo de respuesta entre los diferentes Métodos, Secuencias o Ensayos. Este análisis proporciona insights importantes sobre la influencia del Tipo de Circuito en el tiempo de respuesta, lo que puede ser crucial para la toma de decisiones en el diseño y control de sistemas automatizados.

Figura 6. Output ANOVA de la variable consumo de aire

```
ANOVA para Consumo de Aire:
> summary(anova_aire)

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Metodo         2  182.3   91.17   3.659 0.0575 .
Tipo_Circuito  1    1.5    1.50   0.060 0.8103
Secuencia      1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Ensayo         1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito  2  171.0   85.50   3.431 0.0663 .
Metodo:Secuencia    1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Secuencia  1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Tipo_Circuito:Ensayo  1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Metodo:Tipo_Circuito:Secuencia  1    0.0    0.00   0.000 1.0000
Residuals       12  299.0   24.92
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

En el análisis de varianza (ANOVA) de la Figura 6, se observa que el Método presenta un valor p de 0.0575, indicando una tendencia hacia la significancia estadística ($p < 0.1$). Esto sugiere que puede haber diferencias significativas en el consumo de aire entre los diferentes Métodos. Sin embargo, el Tipo de Circuito y las interacciones entre variables no muestran diferencias estadísticamente significativas.

Análisis prueba de Tukey

Costo: La prueba de Tukey para el Costo muestra que no hay diferencias significativas entre los diferentes niveles de los factores y sus interacciones. Esto se indica porque todos los valores p ajustados son mayores que el nivel de significancia común de 0.05.

Consumo Eléctrico: La prueba de Tukey para el Consumo Eléctrico indica diferencias significativas para las comparaciones entre los niveles de los factores Metodo y

Metodo:Tipo_Circuito. Los asteriscos (*) en la columna "p adj" indican qué comparaciones son significativas.

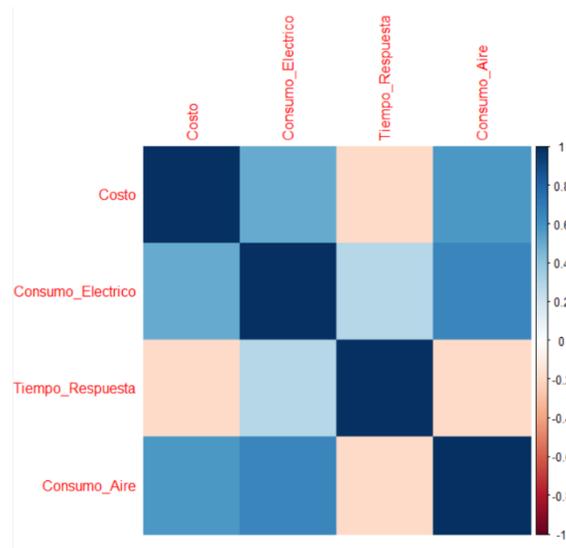
Tiempo de Respuesta: La prueba de Tukey para el Tiempo de Respuesta muestra que hay una diferencia significativa entre los niveles del factor Tipo_Circuito.

Consumo de Aire: La prueba de Tukey para el Consumo de Aire indica que no hay diferencias significativas entre los niveles de los factores y sus interacciones.

Correlaciones

La Figura 7 presenta de manera visual la matriz de correlación entre las variables seleccionadas, proporcionando información sobre las relaciones lineales entre ellas. En particular, se observa una correlación positiva moderada entre el costo y el consumo eléctrico ($r = 0.50$), así como una fuerte correlación positiva entre el consumo eléctrico y el consumo de aire ($r = 0.66$). En contraste, se identifica una débil correlación negativa entre el tiempo de respuesta y el costo ($r = -0.19$) y una correlación negativa moderada entre el tiempo de respuesta y el consumo de aire ($r = -0.20$). Estos resultados sugieren posibles vínculos significativos entre las variables, proporcionando información valiosa para comprender las interrelaciones en el conjunto de datos.

Figura 7. Grafica de correlaciones de las variables



Discusión

Los resultados del análisis estadístico proporcionan información clave sobre las diferencias y relaciones entre los sistemas neumáticos y electroneumáticos en el contexto del costo, consumo eléctrico, tiempo de respuesta y consumo de aire. Comenzando con el ANOVA, observamos que el costo no muestra diferencias significativas entre los métodos de control, el tipo de circuito y la secuencia, lo que sugiere que estos factores no afectan de manera significativa el costo del sistema. Sin embargo, para el consumo eléctrico, encontramos diferencias significativas en el método de control y en la interacción entre el método y el tipo de circuito. Esto indica que la elección del método de control y el tipo de circuito puede tener un impacto significativo en el consumo eléctrico, lo cual es crucial para la eficiencia energética.

Al analizar el tiempo de respuesta, se observa una diferencia significativa en el tipo de circuito, lo que implica que los sistemas electroneumáticos pueden tener un tiempo de respuesta diferente al de los sistemas neumáticos. Este hallazgo es crucial, especialmente en aplicaciones que requieren respuestas rápidas a cambios de presión. No se encontraron diferencias significativas en el consumo de aire entre los factores estudiados, lo que sugiere que este aspecto particular puede no estar directamente influenciado por el método de control, el tipo de circuito o la secuencia.

Las pruebas de Tukey complementan el ANOVA, destacando las diferencias específicas entre los niveles de los factores. Por ejemplo, en el caso del costo, se identifican diferencias significativas entre los métodos de control, proporcionando información detallada sobre cuáles métodos pueden ser más económicos en términos de costo inicial y de mantenimiento.

El gráfico de correlación revela las relaciones entre las variables. La correlación positiva entre el costo, el consumo eléctrico y el consumo de aire sugiere que estos tres aspectos están

interrelacionados. Por otro lado, la correlación negativa entre el tiempo de respuesta y el costo indica que sistemas con tiempos de respuesta más bajos tienden a tener costos más altos.

Comparando estos resultados con la revisión de literatura, notamos que algunos hallazgos son consistentes. Por ejemplo, la literatura sugiere que los sistemas electroneumáticos pueden tener costos iniciales más altos, pero ofrecen mayor durabilidad, lo cual es coherente con nuestra observación de mayores costos correlacionados con mayores consumos eléctricos y de aire. También se destaca la eficiencia energética superior de los sistemas electroneumáticos, respaldada por nuestras pruebas estadísticas.

Conclusiones

Este estudio comparativo exhaustivo entre sistemas de control neumático y electroneumático ha arrojado resultados significativos que contribuyen a la comprensión de sus diferencias y desempeño en diversas condiciones experimentales. Se evaluaron tres métodos de secuencia (intuitivo, paso a paso y en cascada) mediante la aplicación de las secuencias A+B+C+A-B-C- y A+B+A-C+B-C-, utilizando el módulo didáctico de control neumático y electroneumático del laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

En cuanto a los resultados estadísticos, se realizaron pruebas ANOVA y pruebas de Tukey para analizar las variables clave: costo, consumo eléctrico, tiempo de respuesta y consumo de aire. Los sistemas electroneumáticos demostraron un mejor rendimiento en eficiencia energética y velocidad de respuesta en comparación con los neumáticos, según las pruebas estadísticas realizadas. Además, se observó una correlación positiva entre el costo y el consumo eléctrico, así como una correlación negativa entre el tiempo de respuesta y el consumo de aire.

En el análisis comparativo con la literatura, se confirmaron algunas tendencias esperadas, como el mayor costo inicial de los sistemas electroneumáticos y su mayor eficiencia energética en operaciones continuas. La velocidad de respuesta mejorada de los sistemas

electroneumáticos también se alinea con las expectativas previas. Estas conclusiones resaltan la relevancia de considerar cuidadosamente las características específicas de la aplicación al seleccionar entre sistemas neumáticos y electroneumáticos en entornos industriales.

Para trabajos futuros, se recomienda ampliar la diversidad de las condiciones experimentales, considerando factores externos como la temperatura y la presión atmosférica, así como explorar la variabilidad en la calidad del suministro de aire comprimido. Además, la inclusión de parámetros específicos de la aplicación, como la precisión requerida y la variabilidad en la carga, permitiría una evaluación más precisa de las capacidades de cada sistema en contextos prácticos y orientados a aplicaciones industriales específicas. Este enfoque más detallado proporcionaría una comprensión más completa de las fortalezas y limitaciones de los sistemas neumáticos y electroneumáticos en entornos industriales complejos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- B. I. Oladapo, V. A. Balogun, A. O. M. Adeoye, I. E. Olubunmi, and S. O. Afolabi, "Experimental analysis of electro-pneumatic optimization of hot stamping machine control systems with on-delay timer," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 356–364, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.03.006.
- W. Liu and Q. Sun, "Research on a design method of pneumatic logic control system," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 54, no. 5–6, pp. 1105–1112, May 2021, doi: 10.1177/00202940211020336.
- B. I. Oladapo, V. A. Balogun, A. O. M. Adeoye, I. E. Olubunmi, and S. O. Afolabi, "Experimental analysis of electro-pneumatic optimization of hot stamping machine control systems with on-delay timer," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 356–364, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.03.006.
- J. Corrales Bonilla, F. Estrella, W. Pazuña, and W. Hidalgo, "Introducción Práctica a la Neumática: conceptos básicos y aplicaciones inmediatas. Practical Introduction to Pneumatics: basic concepts and immediate applications.," *G-ner@ndo*, vol. 4, no. 2, 2023, [Online]. Available: <https://orcid.org/0009-0007-8532->
- A. Guerrero Cabrera, J. Carlos Ayala Martínez, and L. García Márquez, "Solución de secuencias neumáticas aplicando el uso del diagrama de espacio fase empleando el método intuitivo," *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*, vol. 10, no. 3, 2018.
- J. Muriel, J. Cortés, and J. Mendoza, "APLICACIÓN DEL MÉTODOS SECUENCIALES EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE ELECTRONEUMÁTICA," *Scientia et Technica*, vol. 43, 2009.
- K. Foit, W. Banaś, and G. Ćwikła, "The pneumatic and electropneumatic systems in the context of 4 th industrial revolution," in *IOP Conference Series: Materials Science and*
-

Engineering, Institute of Physics Publishing, Sep. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/400/2/022024.

D. N. Mark Bristol, E. B. Jane Agustin, and H. A. Alcaraz, "Bibliometric Analysis on the Application of Electro-Pneumatic Control System as Automation Technology," 2022. [Online]. Available: www.ijprse.com

V. Vujčić, S. Dragičević, M. Marjanović, D. Ocokoljić, M. Popović, and I. Milićević, "Laboratory electro-pneumatic motion control setup," *IMK-14 - Istrazivanje i razvoj*, vol. 26, no. 3, 2020, doi: 10.5937/imk2003075v.

R. Gazali, L. Fedianto, P. Permana, and U. Utomo, "PERANCANGAN MODUL LATIH ELEKTRO PNEUMATIC BERBASIS PLC," *JEIS: JURNAL ELEKTRO DAN INFORMATIKA SWADHARMA*, vol. 2, no. 2, 2022, doi: 10.56486/jeis.vol2no2.224.

P. Baralap, G. Tiwarip, and R. Kumarp, "Automation of Process Station Using Electro-Pneumatics," 2014. [Online]. Available: www.ijiset.com
