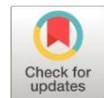


Análisis comparativo de consumo de energía en una estación de bombeo de agua con diferentes algoritmos de control voltaje/frecuencia

Comparative analysis of energy consumption in a water pumping station with different voltage/frequency control algorithms

- ¹ Richard Armando Elizalde Pin  <https://orcid.org/0009-0003-7765-5777>
Carrera de Ingeniería en Electricidad, Facultad de Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Latacunga, Ecuador.
richard.elizalde3884@utc.edu.ec
- ² Jhon Anderson Macao Ortega  <https://orcid.org/0009-0000-4871-0421>
Carrera de Ingeniería en Electricidad, Facultad de Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Latacunga, Ecuador.
jhon.macao5759@utc.edu.ec
- ³ Secundino Marrero Ramírez  <http://orcid.org/0000-0001-5161-545X>
Carrera de Ingeniería en Electricidad, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Latacunga, Ecuador.
secundino.marrero@utc.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 21/03/2024

Revisado: 18/04/2024

Aceptado: 30/05/2024

Publicado: 05/06/2024

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v6i2.2.488>

Cítese:

Elizalde Pin, R. A., Macao Ortega, J. A., & Marrero Ramírez, S. (2024). Análisis comparativo de consumo de energía en una estación de bombeo de agua con diferentes algoritmos de control voltaje/frecuencia. AlfaPublicaciones, 6(2.2), 48–67. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i2.2.488>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras**claves:**

Control escalar,
V/f, consumo y
caudal

Resumen

Introducción: el propósito de este trabajo es presentar alternativas que permitan reducir el consumo de potencia eléctrica en una estación de bombeo mediante los diferentes algoritmos de control para incrementar la eficiencia en los sistemas de abasto de agua de riego al menor costo posible. Durante las diferentes pruebas efectuadas con algoritmos V/f, el control cuadrático en lazo abierto presentó un mejor rendimiento en términos de consumo de potencia para diferentes caudales. El estudio empleó métodos de investigación que incluye la recolección de información, análisis inductivo-deductivo y mediciones para evaluar los impactos en el consumo de potencia entre los diferentes algoritmos que se utilizaron, donde los resultados destacan que el control V/f cuadrático presenta una mayor confiabilidad en relación con la respuesta a perturbaciones. Este resultado no solo mejora el rendimiento del sistema, sino que también puede tener beneficios sustanciales en términos de costos operativos y sostenibilidad a largo plazo. **Objetivo:** evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de control V/f para determinar su eficiencia en relación con la demanda de potencia en instalaciones de bombeo de riego a lazo abierto para reducir la complejidad y costo de sistema. **Metodología:** es una investigación aplicada y de campo con carácter cuantitativo y exploratorio, donde se hace la recopilación de datos obtenidos con procedimientos experimentales en una instalación de bombeo que permite evaluar diferentes tipos de control V/f con el uso de técnicas como la observación y el estudio causal comparativo, para establecer tendencias de consumo de energía con la aplicación del método inductivo para diferentes caudales de trabajo de una bomba centrífuga. **Resultados:** las pruebas realizadas en la estación de bombeo con diferentes algoritmos V/f de un variador de velocidad, revelan que el control cuadrático destaca por su eficiencia en el consumo de potencia y su capacidad para responder de manera más efectiva ante perturbaciones, además la reducción de caudal presenta una menor incidencia en el deterioro del factor de potencia en comparación con los otros controles evaluados. El error en estado estacionario en la respuesta de los controladores resultó similar y aceptable en todos los casos, pero la respuesta del algoritmo cuadrático es más rápida y al ser esto escalado a una instalación de bombeo de riego con flujo variable, ello conlleva a una reducción significativa del

consumo de energía. **Conclusión.** el modo de control V/f cuadrático del variador SIEMENS 420 debido a su menor consumo de potencia y su capacidad para mejorar el rendimiento del sistema de bombeo y tiempo de respuesta puede ser utilizado en estaciones de abasto de riego con caudal variable, donde su implementación puede maximizar su eficiencia y reducir los costos operativos y de implementación, lo que hace de esto una opción favorable para el sistema de bombeo en instalaciones de riego en campos de múltiples invernaderos con diferentes requerimientos de caudal. **Área de estudio general:** Electricidad. **Área de estudio específica:** Automatización y control. **Tipo de estudio:** Artículos originales.

Keywords:

Scalar control,
V/consumption,
and flow rate

Abstract

Introduction. the purpose of this work is to present alternatives to reduce the electrical power consumption in a pumping station by means of different control algorithms to increase the efficiency of irrigation water supply systems at the lowest possible cost. During the different tests conducted with V/f algorithms, the open-loop quadratic control presented a better performance in terms of power consumption for different flow rates. The study employed research methods including data collection, inductive-deductive analysis, and measurements to evaluate the impacts on power consumption between the different algorithms used, where the results highlight that the quadratic V/f control presents a higher reliability in relation to the response to disturbances. This result not only improves system performance but can also have substantial benefits in terms of operating costs and long-term sustainability. **Objective.** evaluate the performance of different V/f control algorithms to determine their efficiency in relation to power demand in open-loop irrigation pumping installations to reduce system complexity and cost. **Methodology.** it is an applied and field research with quantitative and exploratory character, where the data collection obtained with experimental procedures in a pumping installation that allows to evaluate different types of V/f control with the use of techniques such as observation and comparative causal study, to establish trends in energy consumption with the application of the inductive method for different working flows of a centrifugal pump. **Results.** the tests performed in the pumping station with different V/f algorithms of a variable speed drive, reveal that the quadratic

control stands out for its efficiency in power consumption and its ability to respond more effectively to disturbances, also the flow reduction has a lower impact on the deterioration of the power factor compared to the other controls evaluated. The steady state error in the response of the controllers was similar and acceptable in all cases, but the response of the quadratic algorithm is faster and when scaled to an irrigation pumping installation with variable flow, this leads to a significant reduction in power consumption. **Conclusion.** the V/f quadratic control mode of the SIEMENS 420 drive due to its lower power consumption and its ability to improve pumping system performance and response time can be used in irrigation supply stations with variable flow rate, where its implementation can maximize efficiency and reduce operating and implementation costs, making it a favorable option for pumping system in irrigation installations in multiple greenhouse fields with different flow rate requirements.

Introducción

Un elemento considerable en los costes de explotación de los sistemas de riegos a presión constante se relaciona con el consumo de potencia en sus sistemas de elevación del fluido. Por ello la reducción de dicho consumo contribuye a la sostenibilidad ambiental y competitividad del suministro de agua. Entonces para poder reducir la potencia consumida, se puede adaptar la altura de elevación del bombeo a la que demanda la red por medio de la variación de las velocidades de rotación en las bombas y esta variación de rotación se puede realizar con controladores PI y PID en los convertidores de frecuencia (Rodríguez-Castellanos & Cote-Ballesteros, 2019; Inga, 2019). Si además de esto se utiliza un sensor de presión o caudal, pueden regular automáticamente la altura de elevación al valor de consigna introducida en la programación del sistema, considerando que el sistema trabaje con el mejor rendimiento posible.

Entonces, los algoritmos de control en estaciones de bombeo juegan un papel fundamental en la mejora de la eficiencia y la disminución de costes operativos en diversas aplicaciones. El control voltaje frecuencia (V/f) presenta un diseño simple y trae consigo ventajas en el rango de velocidad media a alta. Con este método la tensión de alimentación varía proporcionalmente a la frecuencia (Anyun, 2022), y cuando la relación voltaje frecuencia es constante el motor funciona con un caudal aproximadamente constante en régimen permanente. La proporcionalidad V/f desaparece en bajas

frecuencias, además la característica de la curva del par depende también de la frecuencia del rotor y de su temperatura (Echeverri et al., 2023). Con el control escalar se puede obtener una regulación satisfactoria en lazo abierto cuando el motor trabaja a valores estables del par, sin muchos requerimientos de la velocidad. Cuando la aplicación requiere una respuesta dinámica rápida, con exactitud en la velocidad o el control del par es necesario operar el motor en lazo cerrado. Los motores eléctricos desempeñan un papel crucial al transformar la energía eléctrica en energía mecánica, siendo fundamentales para el movimiento de diversos equipos. Se conectan a instalaciones eléctricas trifásicas y pueden ser de inducción o asincrónicos (MET) (Farina, 2018). El motor de inducción es una de las máquinas eléctricas más utilizadas en aplicaciones industriales por su simplicidad, fiabilidad, bajo costo y debido a que prácticamente no requiere mantenimiento (Escobar-Sandoval et al., 2020). Existen dos tipos de rotores presentes en el motor de inducción, el rotor jaula de ardilla y el rotor bobinado, siendo el primero el más utilizado a nivel industrial. El auge en la utilización del motor de inducción en nuevos campos se debe al avance en la electrónica de potencia y al desarrollo de algoritmos de control. Los variadores de frecuencia son dispositivos que se alimentan de la red de suministro eléctrico y generan corriente alterna de diferente frecuencia, normalmente para accionar motores de inducción a velocidad variable, estos convertidores toman la tensión en la red, luego se rectifica este voltaje y mediante inversores la corriente directa (DC) se transforma nuevamente a corriente alterna (AC), cuya magnitud y frecuencia pueden ser definidas (López et al., 2018; Lyu, 2023).

Un campo donde se requiere el manejo de distintas velocidades del motor ante diferentes caudales de la bomba, es en los sistemas de riego, donde una misma instalación de bombeo debe atender distintos invernaderos que pueden tener dimensiones y secciones diferentes, pero si se utiliza una sola bomba con una potencia que cubre la mayor demanda, entonces ante requerimientos de caudales inferiores al nominal es necesario regular el caudal, sin tener que establecer un retorno o colocar bombas en paralelos; que conjuntamente con el beneficio de la redundancia y las posibilidades de tener diferentes caudales, podrían generar inconvenientes como el desequilibrio en la distribución del caudal entre ellas. También, en el uso de bombas en paralelo, cuando no se realiza con un adecuado diseño y mantenimiento del sistema, unas bombas podrían trabajar más que las otras, lo que trae consigo un desgaste prematuro o un mal funcionamiento de estas, además de representar un mayor consumo de potencia y el incremento de los costos de operación (Sun, 2019).

La eficiencia en la operación de la bomba se define a través de su rendimiento, que establece cuanta potencia eléctrica se necesita para producir una potencia hidráulica durante la impulsión del líquido, la que se ve afectada por las pérdidas de energía en el sistema.

Cuando se realiza el cambio de velocidad en la máquina hidráulica para poder analizar el comportamiento de la altura teórica de Euler en ella y establecer su nuevo modelo de comportamiento, es necesario considerar los criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, con vistas a poder obtener la máquina modelo en relación con la máquina prototipo utilizada. Si se logran cumplir estos tres criterios de semejanza se dice que estamos en presencia de semejanza absoluta. Pero si solo se cumple la semejanza geométrica y cinemática, entonces el modelo presenta una semejanza restringida debido a la dificultad que se origina producto del cambio de velocidad de rotación cuando se cambia la geometría de la máquina, aspecto que se relaciona con la semejanza dinámica (Rocamora et al., 2020).

La presente investigación ha consistido en la evaluación del desempeño de los diferentes algoritmos de control V/f más utilizados en los variadores de velocidad comerciales, con vistas a determinar su eficiencia en el control y el consumo de potencia cuando es utilizado en una instalación de bombeo de agua en el riego a lazo abierto para evitar el uso de sensores en la realimentación que incrementarían la complejidad y el costo de sistema.

Metodología

La altura manométrica y el caudal de una bomba varían según la velocidad de rotación, dependiendo esta variación de las leyes de semejanza que pueden ser aplicadas para obtener el modelo del nuevo comportamiento de la máquina a partir del criterio α que establece la relación de velocidades en la ecuación (1).

$$\alpha = \frac{n_1}{n_0} \quad (1)$$

Donde α es la relación entre la nueva velocidad de giro (n_1) y la velocidad de giro nominal de la máquina (n_0). A su vez el valor de α se relaciona con el caudal Q_1 para la velocidad n_1 y el caudal nominal (Q_0) de la velocidad nominal n_0 a través de la ley de caudal de la ecuación (2) y la ley de altura H establece el valor de α^2 por medio de la ecuación (3).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \alpha \quad (2)$$

$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2 \quad (3)$$

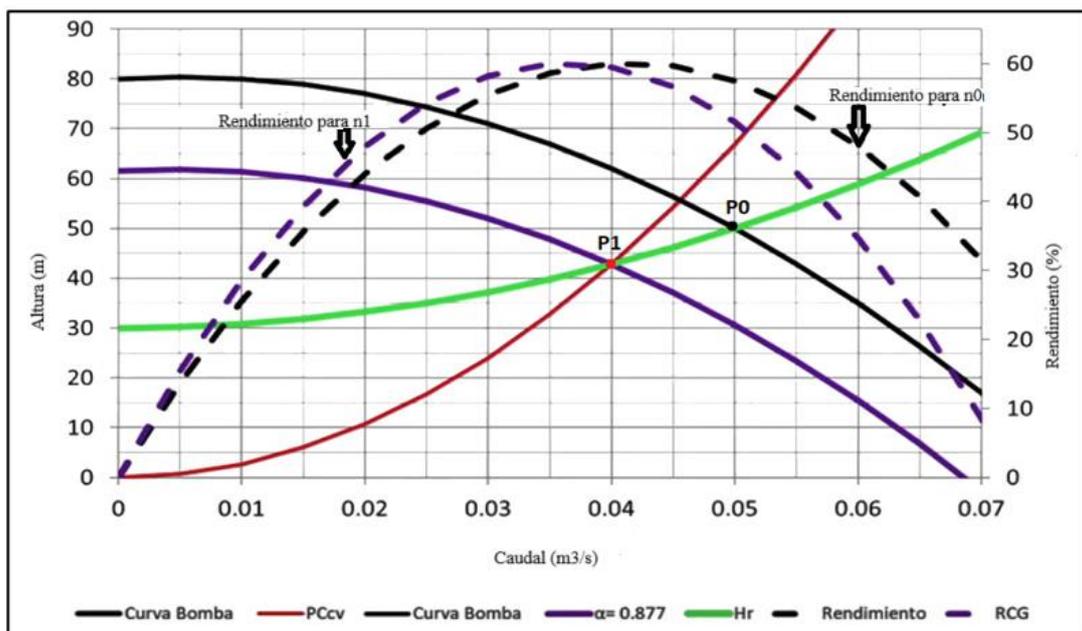
Despejando la altura H_1 de la ecuación (3) se obtiene la ecuación (4) que permite construir la curva de motriz de la bomba. En la figura 1 se muestra un ejemplo con relación al punto homólogo P1(0.04, 42.8) de la intersección entre la curva de la bomba encontrada para la nueva velocidad (n_1) y la curva de la red modificada (mostrada en color rojo) para el caso donde $\alpha = (0.04/0.0456) = 0.877$. El punto P_0 (0.05, 50) es la intersección entre la curva

de la bomba y de la red a velocidad nominal (n_0). De la misma manera se observa el comportamiento del rendimiento para la nueva velocidad n_1 que presenta una caída anticipada en el extremo derecho (Rocamora et al., 2020).

$$H_1 = \frac{H_0}{Q_0^2} Q_1^2 \quad (4)$$

Figura 1

Curva de la bomba y su rendimiento con la variación del caudal ante cambios de rpm



Nota: Adaptado de Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes, por Rocamora et al. (2020).

El resultado de un grupo de ensayos realizados por Rocamora et al. (2020), en una bomba centrífuga para diferentes velocidades (rpm), observándose la variación de la altura, potencia y rendimiento para diferentes caudales (Q), donde a medida que disminuye la velocidad se aprecia una reducción de la altura, potencia y una caída anticipada del rendimiento. Este comportamiento de la bomba debe ser considerado durante la aplicación del control con el variador de velocidad para que el rendimiento de esta no se deteriore significativamente, lo que sin dudas reduce el intervalo de regulación posible a utilizar.

Para velocidades superiores, en valores cercanos al 10 % de la velocidad nominal, es correcto considerar la aproximación de que el caudal en la máquina depende únicamente del cociente V/f , pero si se desea mantener el caudal nominal de la máquina (trabajar a par nominal) en todo el rango de frecuencias, entonces se debe mantener constante en el

valor nominal el cociente V/f . Mientras que, a bajas velocidades esta aproximación se pierde progresivamente y comienza a cobrar mayor importancia la caída de tensión en la resistencia del estator; por lo que, se origina una progresiva disminución del caudal en la máquina y disminuye la capacidad de producción del par. Para evitar que esto ocurra se puede sumar un valor constante a la tensión calculada a partir de la velocidad.

El control escalar (VVC) en lazo abierto, si bien resulta ser un método de control sencillo y económico, sus prestaciones son reducidas. Esto hace que el mismo sea adecuado para aquellas aplicaciones industriales que toleran pequeñas variaciones de velocidad, o de flujo en el entrehierro, y que no requieran una respuesta rápida. Una limitante de esta técnica es el margen de variación de velocidad que resulta reducido, y ello se debe a que el mantener constante la relación V/f , existe una influencia de la resistencia óhmica de los devanados que son independientes de la frecuencia. Para la solución de esta dificultad a frecuencias bajas, se puede aumentar un poco más la tensión, o mejor hacerlo en proporción al consumo y la resistencia de los devanados. En algunos inversores se permite seleccionar la relación tensión/frecuencia en función de la carga mecánica para mejorar el desempeño del controlador (Andrade-Cedeño & Pérez-Rodríguez, 2021).

Además del control PI, PID y el escalar mencionado anteriormente, existen otras configuraciones presentes en los variadores de velocidad que también se realizan con el control V/f . Estas técnicas se han desarrollado en las últimas décadas con nuevos dispositivos y algoritmos de control, que le permiten tener a los motores asíncronos un comportamiento dinámico y nivel de precisión en el control que es similar a los motores de c.c. Es así como ha surgido el método de control vectorial, que tiene en cuenta la fase y utiliza un modelo complejo del motor que presenta la orientación del campo magnético, ello le permite actuar mejor sobre el par durante los transitorios para obtener mejores prestaciones dinámicas sobre todo en los casos que se requiere conocer con mayor precisión la posición del rotor.

Entre las técnicas más recientes se encuentra el control directo del par (Direct torque control, DTC) que presenta un inversor dentro del modelo que le permite tener respuestas mucho más rápidas, donde se controla directamente la amplitud y el ángulo del vector tensión, así como la frecuencia, debido a ello se considera superior al control escalar normal.

También es utilizada la variación de tensión y frecuencia siguiendo una ley cuadrática, que es generalmente asociada al control de bombas centrífugas y ventiladores que presentan un par que varía con el cuadrado de la velocidad; donde el control de velocidad se rige por la ley de variación de tensión y frecuencia del convertidor, con un ajuste a las características indicadas, para que el par motor se adapte al par exigido. Otra técnica de control utilizada es la variación de velocidad por reducción de caudal, también conocida como debilitamiento de campo o a potencia constante, donde se varía la frecuencia por

encima del valor en que se alcanza la tensión nominal de la red, considerando que a partir de ese punto la tensión ya no puede seguir creciendo, como resultado en esta zona el flujo en el entrehierro decrecerá paulatinamente con el incremento de frecuencia. Esto origina que el par máximo de la curva par-velocidad, decrezca en función de la frecuencia. Entonces para evaluar la eficiencia en el sistema de control de bombeo es fundamental llevar a cabo una investigación con los diferentes algoritmos de control antes mencionados (García et al., 2022).

En el desarrollo de los ensayos en el módulo de laboratorio serán considerados los siguientes controles V/f:

- Control V/f lineal
- Control V/f con FCC
- Control V/f cuadrático
- Control V/f Multipunto

Durante las pruebas se analizarán detalladamente los datos de consumo de potencia, proporcionando así la base necesaria para implementar mejoras significativas en la eficiencia del consumo de potencia y el caudal del sistema de bombeo luego de realizar un conjunto de observaciones durante ensayos de la bomba. Mediante la experimentación, el método de medición y el estudio causal comparativo se verifican los datos obtenidos del analizador de redes FLUKE 435 – II relacionados con el consumo de potencia para asegurar la confiabilidad y exactitud de la información obtenida luego de realizar las diferentes repeticiones de las pruebas en las condiciones seleccionadas para los experimentos ante distintas variaciones de caudal. Mediante el método de análisis se determinó que tipo de controlador es más eficiente en términos de consumo de potencia para los diferentes tipos de control V/f. En la figura 2 se puede apreciar los materiales y conexión utilizados para las respectivas pruebas en un banco de ensayos y en la tabla 1 se detallan las características del motor de la bomba.

Tabla 1

Características del motor

Características del motor trifásico A.C. de la bomba						
Tipo de motor	Pn; [Kw]	Un; [V]	In; [A]	Conexión	N; r.p.m.	F. P
CRT100/00	0,74	252	4,15	Δ	3400	0,85

En los experimentos se utilizó un variador SIEMENS 420 con salidas analógicas (0-20Ma), 6 entradas digitales NPN/PNP aisladas y conmutables, 2 entradas analógicas: AIN1:0-10V,0-20 mA y -10a+ 10V, AIN2: 0-10V,0-20 mA. Un analizador de redes FLUKE 435–II, que se utilizó con la norma EN50160 para las mediciones

correspondientes de las variables eléctricas en el sistema es energizado por medio de un breaker de 50 A trifásico. Cada una de las pruebas se repitieron 5 veces en las diferentes condiciones a evaluar, de las cuales se tomó el resultado promedio para hacer la comparación en eficiencia en el control y consumo de potencia. Se llevaron a cabo pruebas sin la presencia de perturbaciones a diferentes frecuencias 100 %, 90 % 80 % y 70 %, para comparar el consumo de potencia en los diferentes caudales de la bomba. Y luego se realizaron perturbaciones de tipo escalón y pulso para comparar la respuesta del controlador atendiendo al tiempo pico, tiempo asentamiento, error en estado estacionario y el sobre impulso que nos va a permitir evaluar la eficiencia de cada control ante perturbaciones relacionadas con la variación de presión en la red.

Figura 2

Conexión del sistema para los experimentos



Resultados

Comportamiento de la potencia y caudal con los algoritmos de control sin presencia de perturbaciones

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas para diferentes valores de variaciones de velocidad (%) y tipos de control V/f, donde se evidencia que en la prueba del 100 % presenta una potencia de 512,72 w y un caudal constante de 99 l/min, en la prueba del 90 % el control V/f cuadrático tiene una potencia de 457,5 w con un caudal de 63 l/min, en la prueba del 80 % la potencia es de 330 w para un caudal constante de 76 l/min, y en la prueba del 70 % se tiene una potencia de 215,45 w para un caudal constante de 63 l/min. En términos generales durante los diferentes tipos de prueba, el

control V/f cuadrático presenta una menor potencia para el mismo caudal, por ende, tiene un menor consumo de energía tal como lo mencionan en sus experimentos, autores como Schofield (2022) y WalkerPumps.com (2022).

Tabla 2

Potencia y caudal de los diferentes algoritmos de control sin perturbación

Prueba sin perturbación de los diferentes tipos de control					
Variación de frecuencia	Potencia (w)				Caudal (l/min)
	V/f Lineal	V/f FCC	V/f Cuadrático	V/f Multipunto	Todos los controles V/f
100% (60 Hz)	572	537,27	512,72	550	99
90% (54 Hz)	450	450	447,27	457,5	87
80% (48 Hz)	360	330	330	354,54	76
70% (42Hz)	240	236,66	215,45	240	63

En la tabla 3 se presenta el factor de potencia correspondiente a los distintos algoritmos evaluados. Se destaca que, conforme la frecuencia disminuye, se observa una tendencia en la disminución del factor de potencia en todos los casos analizados y por ende una reducción de la eficiencia en el uso de la energía.

Tabla 3

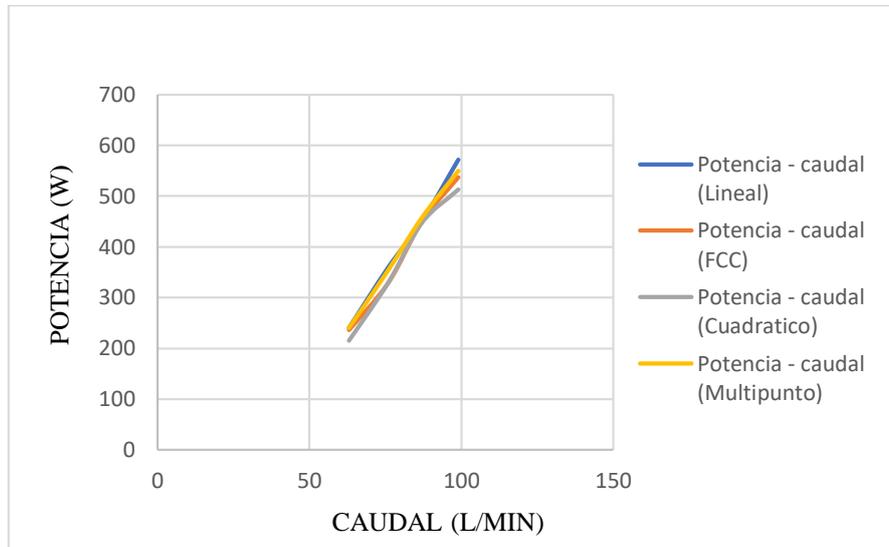
Factor de potencia de los diferentes algoritmos de control

Variación de frecuencia	Factor de potencia			
	V/F Lineal	V/F FCC	V/F Cuadrático	V/F Multipunto
100% (60 Hz)	0,8245	0,8845	0,889	0,889
90% (54 Hz)	0,8154	0,88	0,8872	0,8828
80% (48 Hz)	0,8081	0,7963	0,8036	0,7972
70% (42 Hz)	0,739	0,7533	0,8036	0,7445

No obstante, es importante resaltar que el control V/f cuadrático tiene un mejor desempeño en comparación con los demás algoritmos en estas condiciones específicas como se observa en la tabla 3.

Figura 3

Curva de potencia-caudal



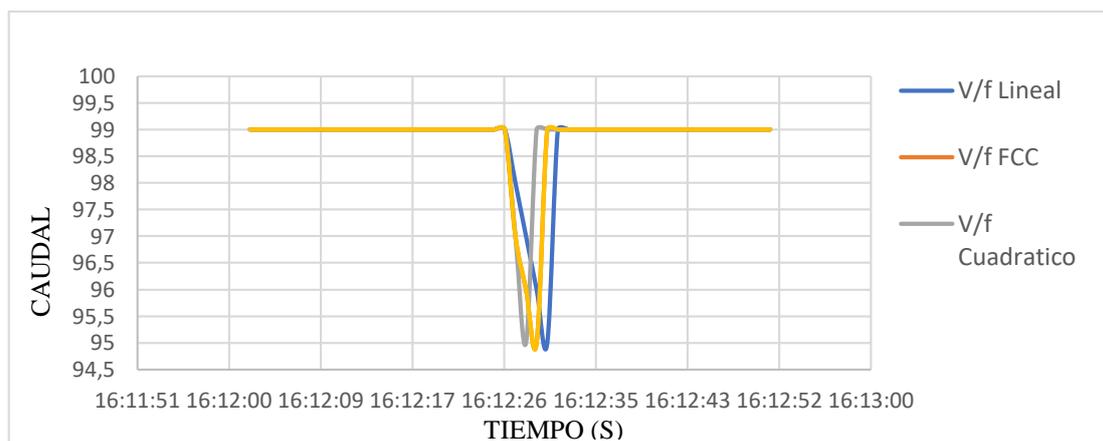
También se estableció la curva de potencia-caudal para mayor comprensión de los resultados como se aprecia en la figura 3 en la cual están los 4 algoritmos de control siendo el control cuadrático el que menor potencia consume.

Resultados de los algoritmos de control con perturbación pulso

En el análisis de la respuesta ante perturbaciones, las pruebas se realizan para un caudal constante de 99 l/min, donde se aplicó una perturbación aproximada del 10 % en la presión del sistema, reduciendo el caudal a 95 l/min (ver figura 4).

Figura 4

Resultados de perturbación de pulso para los diferentes algoritmos de control



Durante esta perturbación con un pulso de duración de 5 segundos, se destaca el control V/f cuadrático registrando el mejor tiempo de asentamiento de tan solo 2 segundos (Ver figura 4), permitiendo que el caudal retorne al valor de 99 l/min (ver tabla 4).

Tabla 4

Datos de los algoritmos de control con perturbación de pulso

Resultados de las perturbaciones escalón con los diferentes algoritmos de control.			
Algoritmos de control	Tiempo de asentamiento (s)	Error en estado estacionario (%)	Tiempo de Pico (s)
V/f Lineal	3,2	4,21	1,4
V/f FCC	2,5	4,21	0,9
V/f Cuadrático	2	4,21	0,65
V/f Multipunto	3	4,21	1,1

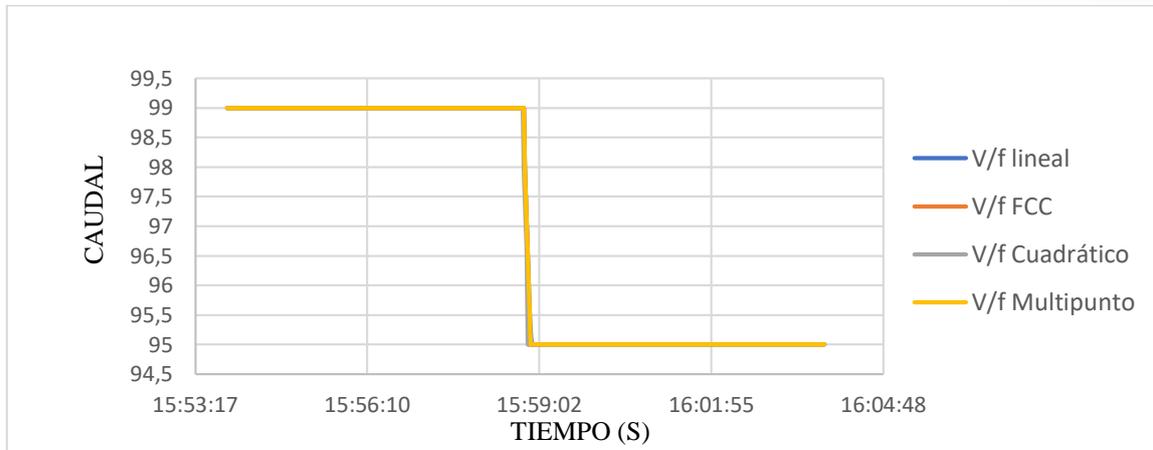
El comportamiento del sobre impulso es despreciable en todos los casos y el error en estado estacionario sería inferior en perturbaciones menores a un 10 %, pero el tiempo de asentamiento y el tiempo de pico máximo muestran mejores resultados en el control V/f cuadrático.

Comportamiento de los algoritmos de control ante una perturbación escalón

En estas pruebas se comenzó con un caudal constante de 99 l/min donde se aplicó una perturbación aproximada del 10 % en la presión del sistema, reduciendo el caudal a 95 l/min (ver figura 5).

Figura 5

Resultados de perturbación escalón para los diferentes algoritmos de control



Durante la perturbación de tipo escalón, se vuelve a destacar la respuesta del control V/f cuadrático, al registrar el mejor tiempo de asentamiento de 4,5 segundos como se ve en la figura 5 y la tabla 5.

Tabla 5

Datos de los algoritmos de control con perturbación escalón

Resultados de las perturbaciones de pulso con los diferentes algoritmos de control.			
Algoritmos de control	Tiempo de asentamiento(s)	Error en estado estacionario (%)	Tiempo de Pico segundos (s)
V/f Lineal	6,9	4,21	1,8
V/f FCC	5,8	4,21	1
V/f Cuadrático	4,5	4,21	0,8
V/f Multipunto	6,2	4,21	1,3

El comportamiento del sobre impulso es despreciable en todos los casos y el error en estado estacionario a pesar de ser bastante similar, sería inferior en perturbaciones menores a un 10 %, pero el tiempo de asentamiento y el tiempo de pico máximo muestran mejores resultados en el control V/f cuadrático.

Discusión

En la prueba realizada del 100 % con un caudal constante de 99 l/min, el control V/f cuadrático tiene un ahorro de potencia de 7,27 % frente al control V /f multipunto, un ahorro de potencia de 4,73 % frente al control V/f FCC, un ahorro de potencia 11,56 % frente al control V/f lineal.

En la prueba del 90 % con un caudal constante de 87 l/min el control V/f cuadrático frente al control V /f multipunto tiene un ahorro de potencia de 2,28 %, también presenta un ahorro de potencia de 0,61 % frente al control V/f FCC y control V/f lineal.

En la prueba del 80 % con un caudal constante de 76 l/min el control V/f cuadrático y el control V/f FCC tienen un ahorro de potencia de 7,43 % frente al control V /f multipunto y un ahorro de potencia de 9,09 % frente al control V/f lineal.

En la prueba del 70 % con un caudal constante de 63 l/min el control V/f cuadrático tiene un ahorro de potencia de 11,39 % frente al control V /f multipunto, un ahorro de potencia de 11,39 % frente al control V/f lineal y un ahorro de potencia de 9,84 % frente al control V/f FCC.

Si escalamos estos resultados a una instalación de bombeo de un conjunto de invernaderos que en riego por goteo requieren una capacidad de bombeo del 100 % y el 70 % en una bomba de 1Hp similar a la que se ha ensayado, esto permitiría la reducción de 30 % del consumo de agua, para un ahorro de potencia de 37,97 % en un tiempo de bombeo de 30 minutos al día (Pardo & Casa, 2020). Este es un sistema que, al presentar una presión constante con caudal constante, a partir del control voltaje frecuencia se puede ajustar de forma precisa la velocidad y el par según las condiciones de carga, para poder prescindir del lazo cerrado de control que incrementaría los costos del sistema y resultaría más compleja su explotación al requerir la presencia de sensores de caudal o presión en los diferentes invernaderos.

Los resultados obtenidos en la evaluación de distintos algoritmos de control han sido fundamentales para identificar la solución óptima en el sistema de bombeo en relación con la modalidad de control que sería más eficaz y con un menor consumo de potencia. El control V/f cuadrático sobresale como la opción más efectiva, tal como han indicado varios estudios previos (Marrero-Ramírez et al., 2023; Martínez-Lendeche et al., 2017). Además, se ha constatado que dicho método conlleva a un significativo ahorro en la demanda de potencia que se verificó en las pruebas que abarcan los diferentes algoritmos de control en las pruebas para el 100 %, 90 %, 80 % y 70 % de capacidad de la bomba (Galvis et al., 2021; Blanco, 2020).

Es importante destacar que, frente a perturbaciones externas, el algoritmo de control V/f cuadrático exhibe una notable eficiencia en cuanto a tiempos de respuesta comparado con

sus contrapartes (Rodríguez, 2023; Moreano, 2016). Estos hallazgos, respaldados por investigaciones previas, consolidan la posición del control V/f como la alternativa más afectiva en circunstancias consideradas para el bombeo en los sistemas de riego lazo abierto. Siendo el control V/f cuadrático quien garantiza un mejor rendimiento en condiciones normales con una capacidad aceptable para adaptarse y responder eficazmente a perturbaciones de presión.

Conclusiones

- Después de haber analizado los cuatro tipos de control escalar que tiene el variador de frecuencia SIEMENS 420, en función del ahorro de potencia se propone el modo de control V/f cuadrático, ya que este presenta una menor potencia consume a diferencia de los demás algoritmos evaluados. Por ello la implementación de un sistema de control V/f cuadrático emerge como una estrategia clave para alcanzar un mejor rendimiento y sostenibilidad en diversos aspectos del sistema, frente a perturbaciones en las aplicaciones de sistema de bombeo. Esta implementación tiene el potencial de maximizar la eficiencia y minimizar los costos operativos al ser de lazo abierto. Por lo tanto, es recomendable considerar seriamente la adopción de un sistema de V/f cuadrático en el sistema de bombeo para obtener los beneficios mencionados anteriormente que se relaciona con las características de esta máquina de flujo.
- La implementación del control V/f cuadrático en un sistema de bombeo para riego por goteo en invernaderos permite un ajuste preciso de la velocidad y el par, logrando una reducción del 30 % en el consumo de agua y un ahorro de 37,97 % en potencia. Esto se consigue mediante una presión y caudal constantes sin necesidad de un lazo cerrado de control, reduce significativamente los costos y la complejidad del sistema al eliminar la necesidad de sensores adicionales.
- El control V/f cuadrático cuando se enfrenta a perturbaciones de pulso y escalón, logró una respuesta superior en términos de tiempo de asentamiento, permitiendo que el sistema se estabilice más rápidamente ante cambios repentinos en la presión del sistema. Esto se traduce en una capacidad de recuperación más eficiente del sistema y una menor variación en el caudal requerido que resulta aceptable para esta aplicación en particular.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

Referencias Bibliográficas

- Andrade-Cedeño, R., & Pérez-Rodríguez, J. A., (2021). Análisis de control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable. *Dominio de las ciencias*, 7(6), 38-62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8383727>
- Anyun, F. (2022). *Dolycon*. https://es.dolyconinverter.com/blog/variable-frequency-drive-vf-control-and-vector-control_b18
- Blanco Morales, O. (2020). *Control de bombas centrifugas con variador de frecuencia*. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://es.scribd.com/document/363874008/CONTROL-DE-BOMBAS-CENTRIFUGAS-CON-VARIAD-pdf>
- Echeverri Cardona, H. D., Monsalve Álvarez, E. Y., & Zapata Parra, J. S. (2023). *Evaluación de los métodos de control escalar y vectorial de un motor trifasico mediante simulación e implementación experimental* [Tesis de pregrado, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Ecuador]. <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/2387>
- Escobar-Sandoval, J. E., Chere-Quiñónez, B. F., & Ángulo-Guerrero, R. J. (2020). Uso del programa MATLAB / SIMULINK en la descripción de motores eléctricos de corriente alterna. Análisis documental. *Dominio de las Ciencias*, 6(5), 348–360. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/1605>
- Farina, A. (2018). Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento. *Revista Ingeniería Eléctrica*, 330(abril), 68-72. https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/330/farina_motores_electricos
- Galvis, J. J., Martínez, F. H., Hernández, C. A., & Madrid, J. I. (2021). Desarrollo de control escalar económico para motores de inducción monofásicos. *Grupo de Investigación ARMOS*. Universidad Distrital – Universidad Tecnológica de Pereira. <https://www.iiis.org/cds2008/cd2009cSc/CISCI2009/PapersPdf/C072PA.pdf>
- García Legorreta, A., González Montañez, F., & Jiménez Mondragón, V. (2022). Co-simulación de un motor de inducción trifásico con control escalar. *Pistas educativas*, 44(143), 397-415. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/viewFile/2890/2221>
- Inga Morán, Jaime Bolivar. (2019). *Diseño de un controlador PID adaptativo para el control de nivel en tres tanques cilíndricos interconectados* [Tesis de maestría,

Escuela Superior Politecnica Litoral de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador].
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48142>

López Monteagudo, F. E., Bañuelos Ruedas, F., Villela Varela, R., Beltrán Telles, B., De La Torre y Ramos, J., & Díaz Rodríguez, J. L. (2018). Estrategias de control y ahorro energético con el empleo de variadores de velocidad. *Identidad Energetica*, 1, 29-34.
<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/bitstream/20.500.11845/1645/1/ARTICULO%20ESTRATEGIAS%20DE%20CONTROL%20Y%20AHORRO%20ENERGETICO-IEV1-18CC-SB07.pdf>

Lyu, Shuangchi. (2023). Simulación y control para motores Brushless [Tesis de maestría, UPC, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú, Catalunya, España]. <http://hdl.handle.net/2117/393572>

Marrero-Ramírez, S., Vega-Áreas, O., & González-Palau, I. A. (2023). Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(4), 19–30.
<https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6295>

Martínez-Lendech, J., Gómez-Agis, J., Martínez-Martínez, D., & Vargas-Ayuso, C. (2017). Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema eléctrico. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 1(1), 1-7.
https://www.researchgate.net/publication/343982166_Analisis_de_factor_de_potencia_en_variadores_de_velocidad_conectados_a_un_sistema_electrico

Moreano Peña, J. (2016). *Implementación del control escalar V/f para el control de velocidad de un motor asíncrono trifásico* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura, Perú]. <https://hdl.handle.net/11042/2657>

Pardo Solano F. V., & Casa Yanguicela, J. C. (2020). *Automatización de un sistema de riego para el control de humedad en los cultivos del invernadero #2 del Centro Experimental Salache en la Universidad Técnica de Cotopaxi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador].
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6822>

Rocamora Osorio, M. del C., Abadía Sánchez, R., Cámara Zapata, J. M., Melián Navarro, M. A., Puerto Molina, H., & Ruiz Canales, A. (2020). *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes*. Editorial Club Universitario.
<https://books.google.com.py/books?id=38TnCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- Rodríguez-Castellanos, J. E., & Cote-Ballesteros, J. E. (2019). Anti-windup strategy based on back calculation and tracking applied to direct PID fuzzy controllers. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 119–139.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9925>
- Rodríguez Báez, S. (2023). *Accionamiento eléctrico para un motor de inducción para alta eficiencia con estimación de la velocidad* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico].
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/23b325d6-413d-4bf9-9e4b-96b5ff312adc/content>
- Schofield, S. (2022). *Optimización de los sistemas de bombeo para ahorrar energía eléctrica*. Info PLC ++. <https://www.infoplcn.net/plus-plus/tecnologia/item/111906-articulo-tecnico-europump-optimizacion-bombas>
- Sun, Wen Yi. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad para motores de continua basado en microcontrolador* [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de València, Valencia, España].
<https://riunet.upv.es/handle/10251/126195>
- WalkerPumps.com. (2022). *Bomba centrífuga que ahorra energía y reduce el consumo de energía*. <https://www.walkerpump.com/es/centrifugal-pump-energy-saving-and-reducing-energy-consumption/>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.



Indexaciones

