



Proyecto Final
2025

Controlador de motor trifásico para instalaciones de baja tensión

Test de Aceptación

Elian Andrenacci, Lucas Manuel Carra

Índice

1. Objeto del Documento	2
2. Identificación del Producto	3
3. Elementos y Equipamiento Necesarios	4
4. Desarrollo del Ensayo	5
4.1. Forma de Medición	6
4.2. Condiciones Iniciales	7
4.3. Preparación de la Prueba	8
4.4. Mediciones y Observaciones	10
5. Conclusiones	15

1. Objeto del Documento

El presente documento tiene por objeto presentar los diferentes puntos para el ensayo de las pruebas que demuestran que el equipo cumple con sus especificaciones acordadas en el documento de Anteproyecto.

Ejecutando los ensayos detallados en las secciones siguientes, se podrá validar el correcto funcionamiento de las distintas etapas del sistema. Asimismo, se evalúan parámetros eléctricos relevantes tales como tensiones, corrientes, formas de onda, estabilidad del bus DC y comportamiento del sistema ante distintas condiciones de carga.

Los resultados obtenidos permitirán determinar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente, identificar limitaciones del diseño actual y establecer lineamientos claros para futuras mejoras y optimizaciones del equipo.

2. Identificación del Producto

El producto bajo ensayo corresponde a un prototipo funcional de variador de frecuencia trifásico alimentado con corriente continua, desarrollado en el marco del presente proyecto de grado y conforme al alcance definido en la etapa de Anteproyecto.

El dispositivo que se ve en la figura 1 se diseñó para accionar motores asincrónicos trifásicos de hasta $1/3HP$ (240W) de potencia nominal, a partir de una fuente de alimentación de $12VDC$, generando una salida trifásica de $220Vac$ con frecuencia variable en el rango de $0Hz$ a $150Hz$.

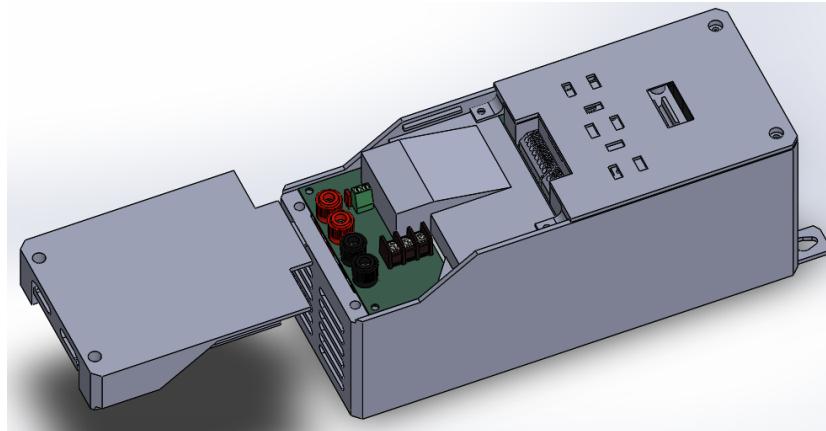


Figura 1: Render del dispositivo bajo medición.

El sistema integra una etapa de conversión y elevación de tensión de corriente continua, una etapa inversora trifásica controlada digitalmente, y un sistema de control que permite la variación de la velocidad de giro del motor mediante el ajuste de la frecuencia de salida. El dispositivo contempla señales de control e interfaz típicas del ámbito industrial, tales como entrada analógica de 0–10 V para referencia de velocidad, parada de emergencia y selección de velocidades preconfiguradas mediante entradas digitales.

En cuanto a las capacidades de comunicación, el producto admite la incorporación de conectividad WiFi orientada a la configuración. No obstante, en el alcance de este proyecto dicha funcionalidad se limita a una red local, permitiendo únicamente la configuración del equipo en las cercanías del inversor, sin contemplar operación remota a través de internet.

El prototipo desarrollado representa una solución orientada a aplicaciones de campo donde se dispone de alimentación en baja tensión continua y se requiere el control de motores trifásicos de potencia moderada, priorizando la simplicidad del sistema, la funcionalidad básica de control y la posibilidad de futuras ampliaciones.

3. Elementos y Equipamiento Necesarios

Para la realización de los ensayos y pruebas descriptos en este documento fue necesario contar con el siguiente equipamiento:

- Dos fuentes de alimentación DC regulada, capaz de suministrar hasta $12Vdc$ y una corriente de 40A requerida por el sistema bajo ensayo.
- Fuente de alimentación DC de $12Vdc$ de 10A para alimentar la etapa lógica del equipo.
- Motor asincrónico de inducción trifásico utilizado como carga, con características compatibles con el rango de operación del variador.
- Multímetros digitales para medición de tensiones y corrientes en continua y alterna.
- Osciloscopio digital de al menos dos canales para la observación de formas de onda de tensión y corriente.
- Termocuplas y multímetros para la medición de la temperatura de trabajo.
- Resistencia Shunt de $1,5m\Omega$ y $0,1\Omega$ para la medición de corriente de entrada.
- Dispositivo de frenado del motor.
- Cables, conectores, protecciones y elementos auxiliares necesarios para una conexión segura del sistema.

Todo el equipamiento fue utilizado respetando las normas básicas de seguridad eléctrica y buenas prácticas de laboratorio.

4. Desarrollo del Ensayo

El desarrollo de los ensayos se estructuró en distintas etapas con el objetivo de validar el correcto funcionamiento del variador de frecuencia trifásico, así como caracterizar su desempeño eléctrico, funcional y térmico dentro del alcance definido para el proyecto.

En primer lugar, se realizaron ensayos funcionales orientados a verificar el accionamiento del motor trifásico, evaluando las condiciones de arranque, régimen permanente y detención para un amplio rango de frecuencias de salida. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos específicos sobre el esquema de modulación por vector espacial (SVM), analizando la integridad de las señales generadas, la simetría de los pulsos y el comportamiento del índice de modulación conforme a la estrategia V/f .

Finalmente, se realizaron ensayos de rendimiento y durabilidad, permitiendo cuantificar la eficiencia de las distintas etapas del sistema y evaluar su capacidad de operación continua bajo carga.

Todos los ensayos se efectuaron en un banco de pruebas controlado, utilizando instrumentación adecuada y respetando las limitaciones propias del prototipo desarrollado.

4.1. Forma de Medición

Las mediciones eléctricas se realizaron mediante instrumentación externa, complementadas con las lecturas internas provistas por el sistema de control y supervisión del variador. Para la medición de tensiones continuas y alternas se emplearon multímetros digitales, mientras que las formas de onda de tensión y corriente fueron observadas utilizando un osciloscopio digital.

La corriente de entrada del conversor fue medida de manera indirecta mediante resistencias shunt de bajo valor, registrando la caída de tensión sobre las mismas con el osciloscopio. Esta metodología permitió analizar tanto el valor RMS de la corriente como su comportamiento temporal, caracterizado por una forma de onda pulsante asociada a la conmutación del conversor.

En el caso del inversor, las mediciones directas de corriente de salida fueron descartadas a causa de la presencia de ruido y resultados no coherentes, consecuencia de la conmutación PWM debiendo utilizar una carga resistiva de valor conocido durante la evaluación del rendimiento del inversor que permita estimar la potencia entregada a partir de la tensión de línea medida.

4.2. Condiciones Iniciales

Previo a la ejecución de cada ensayo, el sistema fue inicializado bajo condiciones controladas. El variador fue alimentado mediante dos fuentes de 12V conectadas en paralelo para la etapa de potencia, mientras que una tercera fuente independiente se destinó exclusivamente a la electrónica de control, asegurando estabilidad y aislamiento entre ambos subsistemas.

El motor trifásico fue inicialmente ensayado en vacío o con carga mínima utilizando un conexiónado como el de la figura 2, permitiendo verificar el funcionamiento básico del sistema antes de aplicar mayores demandas de potencia. La frecuencia de salida se configuró inicialmente en valores bajos, incrementándose progresivamente durante los ensayos para evitar esfuerzos innecesarios sobre la etapa de potencia.

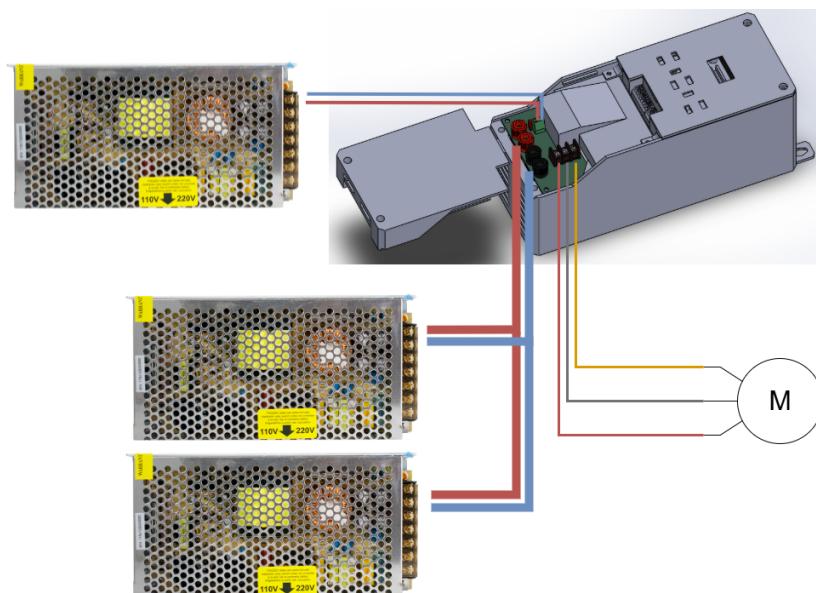


Figura 2: Diagrama de conexión de fuentes de alimentación y motor.

Asimismo, se verificó el correcto estado de las conexiones eléctricas, la inicialización del sistema de control y el correcto funcionamiento de las protecciones implementadas, incluyendo el circuito de parada de emergencia.

4.3. Preparación de la Prueba

La preparación de cada prueba incluyó la configuración del banco de ensayos, la conexión del motor trifásico al inversor y la disposición de la instrumentación necesaria para la medición de las variables de interés.

Se establecieron puntos de medición para la tensión de salida donde marca la figura 3, de corriente de entrada con una resistencia de shunt en serie a las fuentes de tensión como se ve en la figura 4 y la tensión y corriente en el bus DC como marca la figura 5, considerando que la corriente máxima siempre sea menor a 2A.

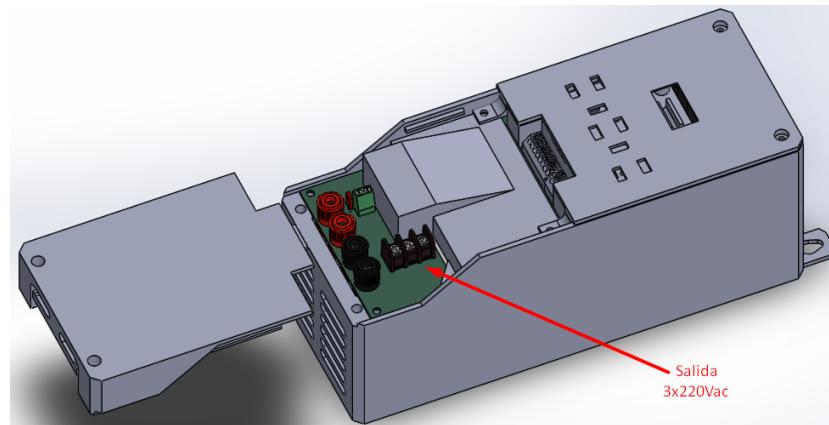


Figura 3: Punto de medición de tensión de salida.

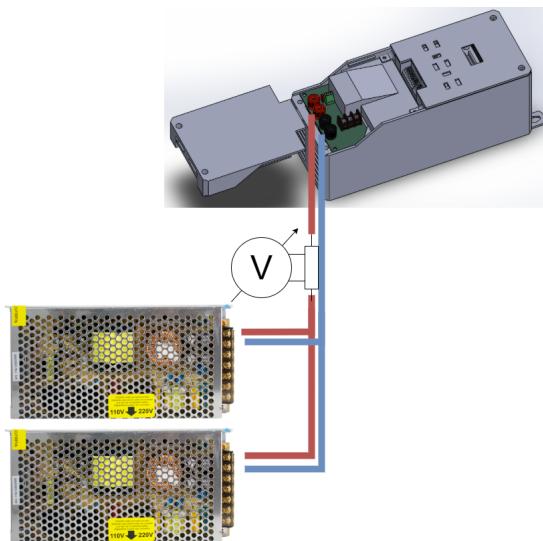


Figura 4: Conexión para medición de corriente de entrada.

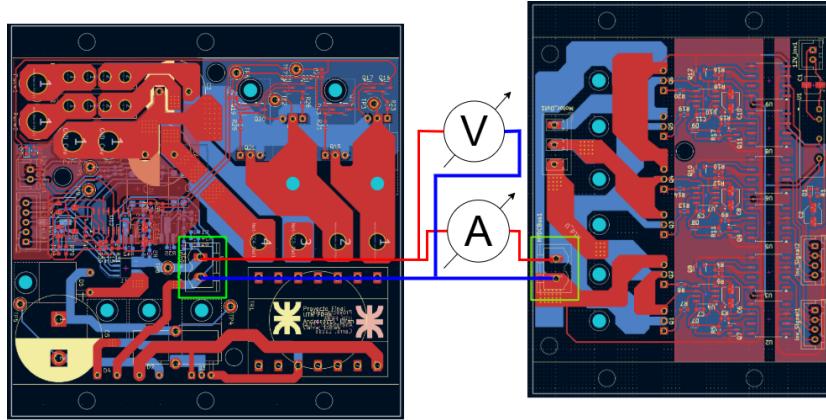


Figura 5: Punto de medición de tensión y corriente continua del bus.

En los ensayos de modulación, se configuraron frecuencias de salida fijas y conocidas, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema en distintos puntos de operación.

Para los ensayos de rendimiento, se montó el sistema de frenado dinámico sobre el motor observable en la figura 6, posibilitando la aplicación de distintos niveles de carga de manera controlada.



Figura 6: Freno dinámico sobre el motor.

Antes de cada ensayo se verificó la correcta visualización de las magnitudes medidas en la interfaz del sistema, garantizando la coherencia entre las mediciones externas y las variables internas del variador.

4.4. Mediciones y Observaciones

Durante los ensayos funcionales se observó un comportamiento estable del motor en todo el rango de frecuencias ensayado, comprendido entre 10Hz y 150Hz , sin presencia de vibraciones, ruidos anómalos ni inestabilidades, indicando que el sistema trifásico generado por el inversor se encuentra correctamente balanceado y que el esquema de modulación implementado funciona conforme a lo esperado.

Los ensayos de modulación evidenciaron una correcta integridad de las señales generadas, con desfases adecuados entre fases y pulsos simétricos en los tiempos de conmutación. Se verificó en la figura 7 que el índice de modulación se ajusta correctamente a la estrategia V/f , manteniendo una relación proporcional entre la frecuencia de salida y la tensión aplicada al motor con una recta horizontal a lo largo de los diferentes puntos de operación. Esta condición también se puede observar en la figura 8, que compara la tensión de salida contra la frecuencia de operación, donde se espera obtener una recta monótonamente creciente.

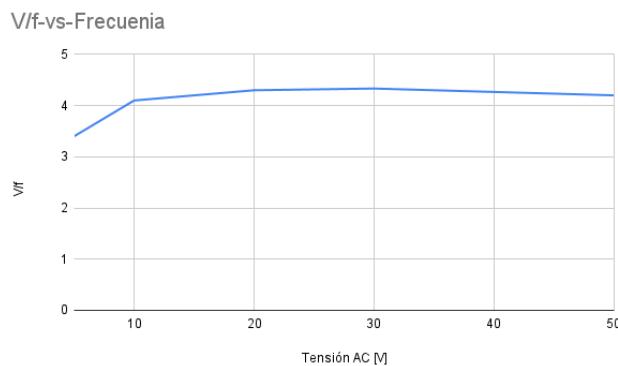


Figura 7: Relación V/f frente a la frecuencia de operación.

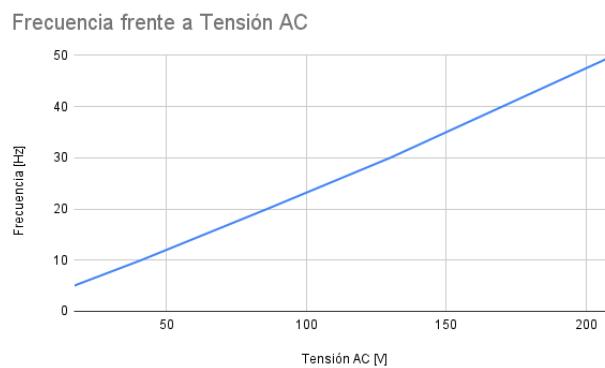


Figura 8: Relación frecuencia frente a la tensión de salida del dispositivo.

En cuanto al rendimiento, se observó que la etapa inversora presenta una eficiencia elevada 95,2 %, mientras que la etapa conversora 85,4 %, la cual constituye la principal fuente de pérdidas del sistema. Finalmente, durante los ensayos de durabilidad, se

identificó una limitación térmica en el transformador del conversor, que restringe la potencia continua entregable a aproximadamente $1/6HP$ para una operación prolongada. Se puede ver en las figuras 9 y 10 como los parámetros de salida se mantienen estables durante 30 minutos luego del transitorio del arranque.

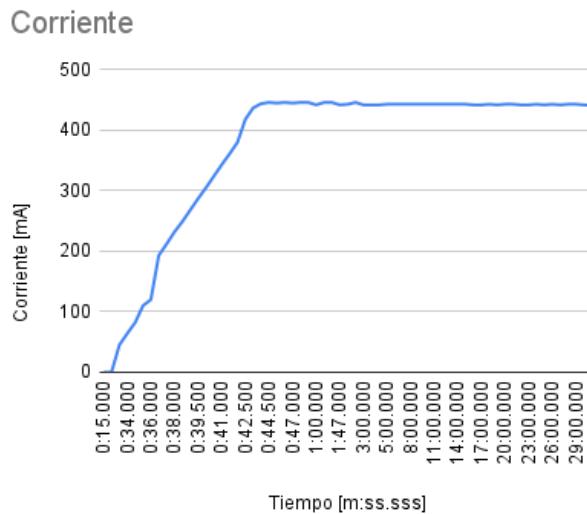


Figura 9: Evolución de la corriente durante 30 minutos de operación.

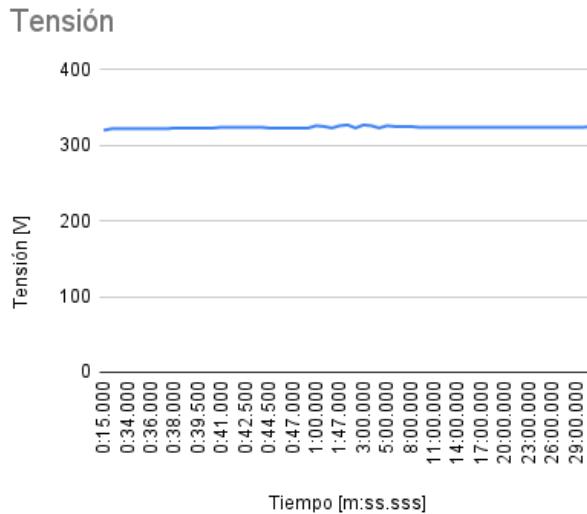


Figura 10: Evolución de la tensión durante 30 minutos de operación.

Además se evaluó el perfil de incremento de temperatura del transformador en la figura 11 y, en las figuras 12 y 13 como las tensión y corriente del bus de continua se

mantienen estables durante toda la prueba frente a la variación de temperatura, al igual que la potencia sobre el motor como se ve en la figura 14.

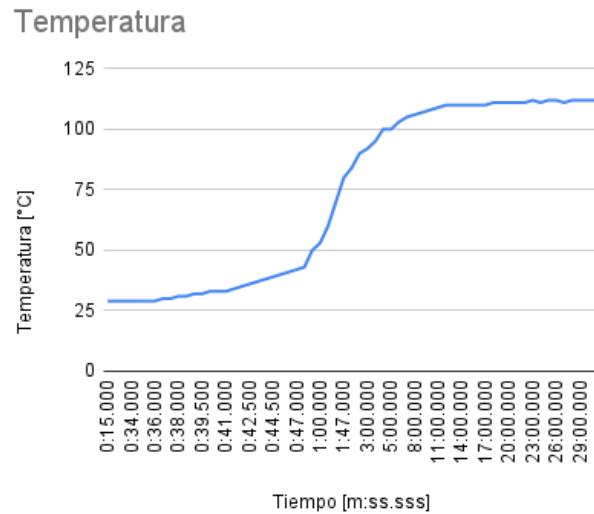


Figura 11: Evolución de la temperatura durante 30 minutos de operación.

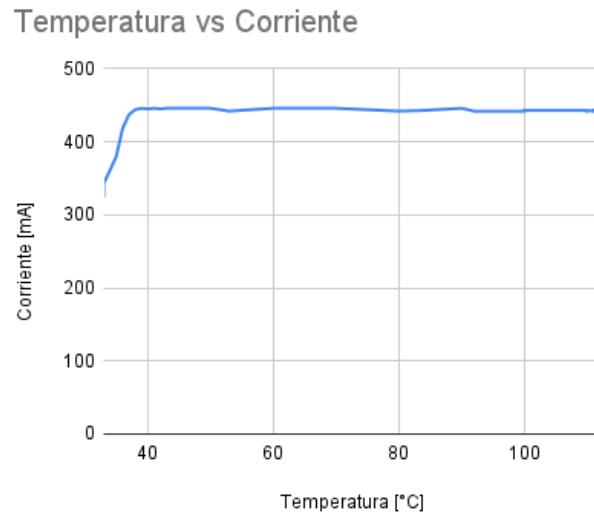


Figura 12: Comparación temperatura vs corriente durante 30 minutos de operación.

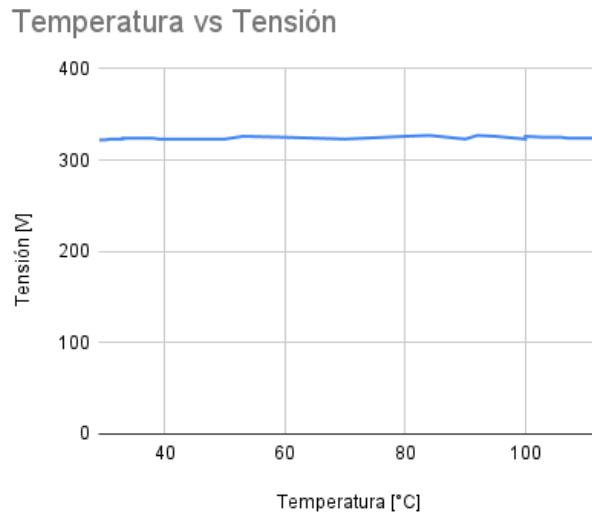


Figura 13: Comparación temperatura vs tensión durante 30 minutos de operación.

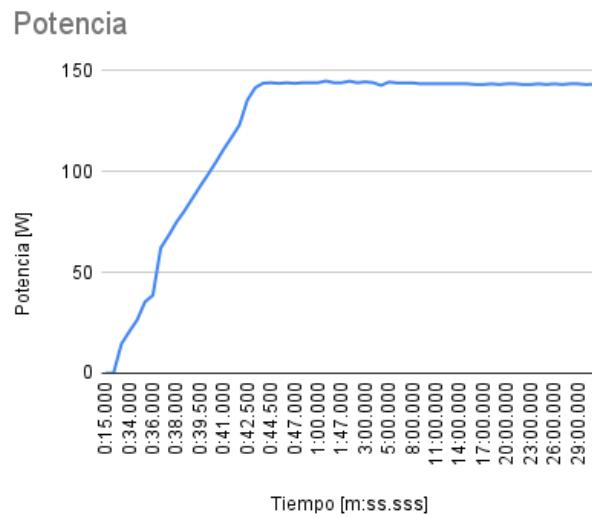


Figura 14: Evaluación de la potencia de salida durante 30 minutos de operación.

Se comprobó el correcto funcionamiento de la salida analógica de 0-10V, donde expone un funcionamiento lineal en la zona de frecuencias medias y una pequeña alinealidad en los extremos como se ve en la figura 15-

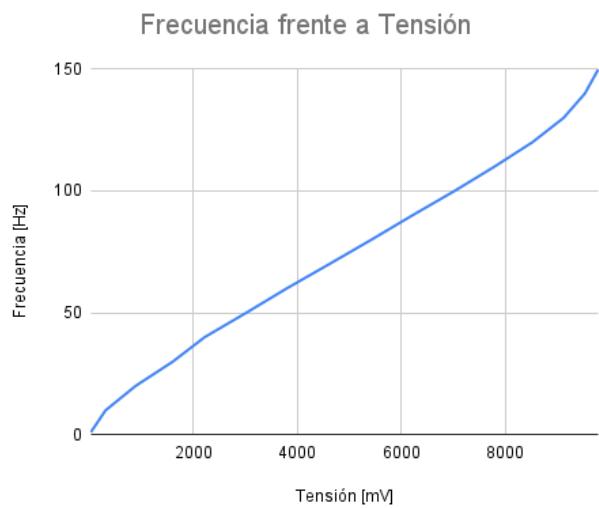


Figura 15: Evolución de la salida 0-10V en representación de la frecuencia.

5. Conclusiones

A partir de los ensayos realizados se concluye que el variador de frecuencia desarrollado cumple con los objetivos funcionales planteados en el alcance del proyecto, permitiendo el accionamiento y control de velocidad de un motor trifásico mediante una alimentación de baja tensión continua.

El sistema demuestra un funcionamiento estable, una modulación adecuada y un elevado rendimiento en la etapa inversora. No obstante, se identifican limitaciones en la etapa conversora, principalmente asociadas al diseño del transformador, condicionando la potencia continua máxima entregable y el comportamiento térmico del equipo.

En este sentido, el prototipo constituye una base sólida para futuras mejoras, orientadas a optimizar el diseño del conversor, incrementar la potencia continua y mejorar la robustez térmica del sistema, consolidando así una solución viable para aplicaciones reales dentro del dominio planteado.

Se detalla en la tabla 1 cual fue el resultado de cada ensayo realizado:

Ensayo	Condición	Resultado esperado	Resultado obtenido	Estado
Funcional	1/3HP 50Hz	Arranque y parada suave	Mantenimiento de la relación V/f	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Arranque programado	Arranque exitoso	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Frenada programada	Detención exitosa	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Cambios de frecuencia de régimen, aceleración y desaceleración	Parámetros configurados exitosamente	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Corte de seguridad por consumo de corriente alto	Corte por emergencia	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Corte de seguridad por descenso de tensión excesivo	Corte por emergencia	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Cambio de velocidad durante el giro por cambio de entrada digital	Cambio de velocidad durante operación	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Indicación de frecuencia de operación en salida analógica 0-10V	Curva V/f lineal en gran rango de operación	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Configuración por red Wi-Fi AP	Parámetros configurados exitosamente	PASS
Funcional	1/3HP 50Hz	Manipulación del motor por red Wi-Fi AP	Arranque y parada exito	PASS
Durabilidad	1/3HP 10 min - Carga resistivas	Sin fallas	Sobrecalentamiento Transformador T_1	FAIL
Durabilidad	1/6HP 30 min - Carga resistivas	Sin fallas	Funcionamiento estable y duradero	PASS
Rendimiento	1/6HP 50Hz	$\eta_{Inversor} \geq 90\%$	$\eta_{Inversor} \approx 95,2\%$	PASS
Rendimiento	1/3HP 50Hz	$\eta_{Convertidor} \geq 80\%$	$\eta_{Convertidor} \approx 85,4\%$	PASS

Cuadro 1: Resultado de las pruebas realizadas