

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“CONTROL DIGITAL DE MOTORES TRIFÁSICOS USANDO
FREERTOS, CALLAO 2022”**

AUTOR: Dr. Abilio Bernardino Cuzcano Rivas

DOCENTE COLABORADOR: Martín Mitchell Gamarra Suchero

PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de abril de 2022 al 31 de marzo de 2023

Resolución de aprobación **N.º 330-2022R**

Callao, 2023

PERÚ

A handwritten signature in black ink, appearing to be the author's name, Dr. Abilio Bernardino Cuzcano Rivas.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be the collaborator's name, Martín Mitchell Gamarra Suchero.

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

TÍTULO DEL PROYECTO

Control digital de motores trifásicos usando Freertos, Callao 2022

DOCENTE RESPONSABLE

Nombres y Apellidos : Abilio Bernardino Cuzcano Rivas

Categoría : Auxiliar TC 40 Horas

Condición : Nombrado

Código : 5067

Profesión : Ingeniero Electrónico

Grado Académico : Magister

Email : abcuzcanor@unac.edu.pe

DOCENTES COLABORADORES

Nombres y Apellidos : Gamarra Suchero Martin Mitchell

Categoría : Nombrado

Código : 1433

Profesión : Ingeniero Electrónico

Grado Académico : Magister

Email : mmgamarras@unac.edu.pe

Nombres y Apellidos : Damas Flores Marcelo Carlos

Categoría : Nombrado

Código : 5292

Profesión : Ingeniero Electricista

Grado Académico : Magister
Email : mcdamasf@unac.edu.pe

PERSONAL ADMINISTRATIVO DE APOYO

Nombres y Apellidos : Sáenz Apari Zoila Pilar Guadalupe
Código : 3077
Email : zpgsaenza@unac.edu.pe

ESTUDIANTES DE APOYO

Nombres y Apellidos : Sánchez Heredia Godo
Código : 1723225287
Email : gssanchezh@unac.edu.pe

Nombres y Apellidos : Santillana Garabito Manuel
Código : 1723225087
Email : masantillanag@unac.edu.pe

Nombres y Apellidos : Bran Chiroque Cristian
Código : 1723225078
Email : cbranc@unac.edu.pe

LUGAR DE EJECUCIÓN

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIDAD DE ANÁLISIS

Motores trifásicos

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Aplicada / Cuantitativa / No experimental

TEMA OCDE

Ingeniería y tecnología

DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad pues me inculcaron los valores y me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. Descripción de la realidad problemática	16
1.2. Formulación del problema	17
1.2.1. Problema Principal.....	17
1.2.2. Problemas Específicos	17
1.3. Objetivo.....	17
1.3.1. Objetivo General.....	17
1.3.2. Objetivo Especifico	17
1.4. Justificación de la investigación	18
1.4.1. Justificación Teórica.....	18
1.4.2. Justificación Tecnológica	18
1.5. Delimitantes de la investigación	18
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes del Estudio	19

2.1.1.	Antecedentes Internacionales	19
2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	20
2.2.	Bases teóricas	21
	Microcontrolador STM32F4013RE.....	21
	Arquitectura ARM CORTEX M4	21
	Microcontroladores STM32F401	21
	Algoritmo de control.....	22
2.3.	Marco conceptual	23
	Control PID.....	23
2.4.	Definición de términos básicos	25
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	26
3.1.	Hipótesis.....	26
3.1.1.	Hipótesis Principal	26
3.1.2.	Hipótesis Específica.	¡Error! Marcador no definido.
3.2.	Definición conceptual de variables	26
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	27
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación.....	27
4.2.	Método de la investigación.....	27
4.3.	Población y muestra	27
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	27
4.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27

4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	28
V.	RESULTADOS.....	29
5.1.	Resultados descriptivos	29
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	36
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	36
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	38
6.3.	Responsabilidad ética	38
	CONCLUSIONES	39
	LA NECESIDAD DEL USO DE MÉTODOS DE CONTROL PARA LAS VARIABLES DE UN MOTOR TRIFÁSICO ES DE GRAN INTERÉS EN EL CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN, POR EL IMPACTO QUE REPRESENTAN EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL, ASÍ COMO LA REALIDAD EXISTENTE SOBRE EL 22.8% DE ACCIDENTES, FALLAS O AVERÍAS A CAUSA DE POCA SUPERVISIÓN.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	EL USO DE MICROCONTROLADORES REPRESENTA UNA GRAN UTILIDAD AL MOMENTO DE REALIZAR CONTROL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS, ESTOS, ACOMPAÑADOS DE LAS PERTINENTES ETAPAS DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES, PUEDEN REALIZAR UN CONTROL ÓPTIMO DE DIVERSOS ACTUADORES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	EL DESARROLLO DEL SISTEMA BASADO EN UNA INTERFAZ DE MONITOREO POR MEDIO DE FREERTROS, REPRESENTA UNA FORMA DINÁMICA DE REALIZAR UNA OBSERVACIÓN ASEQUIBLE Y UN CONTROL RÁPIDO DE LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL DISEÑO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	ANEXOS	42

Anexo 1. Matriz de consistencia	43
Anexo 2. Datasheet de STM32F4013RE	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales fallos en motores trifásicos [1]	16
Figura 2. Control de velocidad ante estímulo [2]	19
Figura 3. Tablero de monitoreo de parámetros del motor [3]	20
Figura 4. Diagrama del Control PID	24
Figura 5. Sistema de control de motor trifásico	30
Figura 6. Entrada de Referencia del Sistema	31
Figura 7. Selección el parámetro para el lazo cerrado.....	31
Figura 8. Retroalimentación del Sistema	32
Figura 9. Controlador PID	32
Figura 10. Parámetros del controlador PID.....	33
Figura 11. Inversor DC/AC.....	33
Figura 12. Parámetros de inversor DC/AC.....	33
Figura 13. Generador SVPWM	34
Figura 14. Motor trifásico en Simulink	35
Figura 15. Parámetros del motor trifásico	35
Figura 16. Dashboard del sistema	36
Figura 17. Respuesta del sistema en el scope.....	37
Figura 18. Medimos el voltaje de fase y de línea	37

Figura 19. Comportamiento de la modulación en cada fase	38
Figura 20. Comportamiento de la modulación en cada línea	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción operacional de variables.... **¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

En la actualidad los motores trifásicos poseen una gran predominancia dentro de la industria de la electrónica teniendo en cuenta que dependen de una frecuencia y un voltaje variables de gran potencia, viendo la necesidad de poder mantener la velocidad controlada, se usa lo que es el PWM (Modulación por Ancho de Pulso) pero en este caso para motores trifásicos el PWM basado en vector espacial (SVPWM). Una vez teniendo el SVPWM, se podría incluso ir más lejos se podría modelar todo un sistema donde a través del control digital se pueda a llegar a ser más precisos respecto a la velocidad controlada sin dañar el actuador al largo plazo, pudiéndose usar un control PID, Adaptativo, Fuzzy, etc. Teniendo en cuenta que toda esta etapa del control será implementada dentro de un microcontrolador este tendrá la suficiente capacidad de cómputo para ejecutar en tiempo real, debido a que internamente se ha implementado un RTOS (Real-Time Operating System) que en este caso es el FREERTOS

Palabras claves: motores trifásicos, control electrónico, freertos, potencia

ABSTRACT

Currently the three-phase motors have a great predominance within the electronics industry considering that they depend on a variable frequency and voltage of great power, seeing the need to keep the speed controlled, PWM (Pulse Width Modulation) is used, but in this case for three-phase motors the space vector based PWM (SVPWM). Once you have the SVPWM, you could even go further, you could model a whole system where through digital control can become more accurate with respect to the controlled speed without damaging the actuator in the long term, being able to use a PID control, Adaptive, Fuzzy, etc.. Taking into account that all this stage of the control will be implemented within a microcontroller this will have sufficient computing power to run in real time, because internally it has been implemented an RTOS (Real-Time Operating System) which in this case is the FREERTOS.

Key words: three-phase motors, electronic control, freertos, power

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los motores trifásicos poseen una gran predominancia dentro de la industria de la electrónica teniendo en cuenta que dependen de una frecuencia y un voltaje variables de gran potencia, viendo la necesidad de poder mantener la velocidad controlada, se usa lo que es el PWM (Modulación por Ancho de Pulso) pero en este caso para motores trifásicos el PWM basado en vector espacial (SVPWM). Una vez teniendo el SVPWM, se podría incluso ir más lejos se podría modelar todo un sistema donde a través del control digital se pueda a llegar a ser más precisos respecto a la velocidad controlada sin dañar el actuador al largo plazo, pudiéndose usar un control PID, Adaptativo, Fuzzy, etc. Teniendo en cuenta que toda esta etapa del control será implementada dentro de un microcontrolador este tendrá la suficiente capacidad de cómputo para ejecutar en tiempo real, debido a que internamente se ha implementado un RTOS (Real-Time Operating System) que en este caso es el FREERTOS.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

En la actualidad, los motores trifásicos constituyen un componente fundamental en el sector industrial, ello es apreciable en los diferentes de subcampos de producción empresarial, donde, junto con diferentes aditamentos mecánico-electrónicos conforman grandes maquinarias que agilizan el trabajo del hombre. El uso de los motores trifásicos en sí mismo, presenta problemas al ejecutar su funcionamiento y control de velocidad, entre ellos, el descontrol de armónicos, la interferencia electromagnética, el desfase de señal de control y la obtención de salida en el actuador. Ello es evidenciable por la falta de un control adecuado de los parámetros del motor, la presente investigación propone el agregado de un algoritmo de control e interfaz gráfica a fin de evitar pérdidas de energía y daños estructurales. Entre los problemas más importante de motores trifásicos se tienen los siguientes: [1]

- Contaminación
- Lubricación inadecuada
- Errores de montaje
- Almacenamiento y manejo inadecuado
- Causas desconocidas
- Desalineación

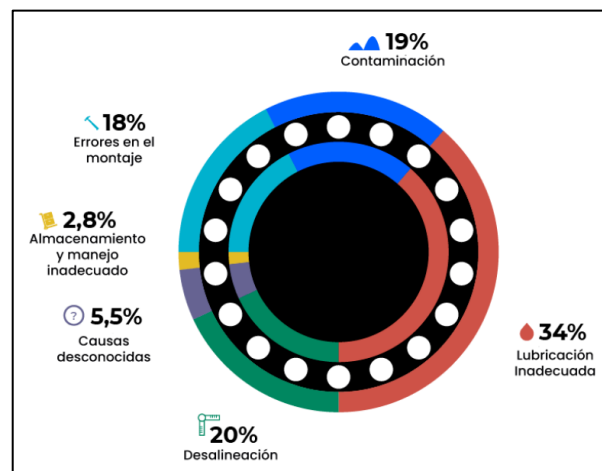


Figura 1. Principales fallos en motores trifásicos [1]

De los datos mencionados se puede estimar la magnitud que causa el poco control de los parámetros de un motor trifásico, entre las que influyen directamente representan un: 22.8% a más, sin considerar las causas desconocidas, de motivos por los cuales un motor trifásico puede operar de forma errónea.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema Principal

PG: ¿En qué medida podría mejorar el control de un motor trifásico al utilizar un algoritmo de control digital y el uso de un sistema operativo de tiempo real?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿En qué medida disminuyen los armónicos y la interferencia electromagnética?

PE2: ¿De qué manera se implementaría el algoritmo de control?

PE3: ¿Se puede realizar el control de manera remota?

PE4: ¿Cómo se visualizan las variables a controlar?

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo General

OG: Implementar correctamente el algoritmo de control digital un motor trifásico para visualizar todas las variables a controlar en tiempo real

1.3.2. Objetivo Especifico

OE1: Se logró la disminución de armónicos e interferencia electromagnética

OE2: Implementar un algoritmo de control para controla las variables eléctricas

1.4. Justificación de la investigación

Se muestran las justificantes para el desarrollo de la investigación

1.4.1. Justificación Teórica

Se hacen uso de teorías de microcontroladores electrónicos para el desarrollo de la presente investigación.

1.4.2. Justificación Tecnológica

La investigación propone el control de motores trifásicos por medio de una herramienta poco usada como es Freertos

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Delimitación teórica

La investigación se enmarca en el uso de teoría de control digital por medio de microcontroladores que hacen posible la manipulación a escala del motor trifásico.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Estudio

Se presentan las fuentes más relevantes y relacionadas con el estudio realizado

2.1.1. Antecedentes Internacionales

El trabajo de tesis de maestría de Velásquez F. (2013), se presenta una descripción y aplicación de los algoritmos utilizados para implementar un control escalar y vectorial para motores de inducción utilizando un controlador de señales digitales y la herramienta de programación CodeWarrior. La herramienta presentó un conjunto de aditamentos, entre ellos la codificación para el control de motores. Adicionalmente, la herramienta usada presentó utilidades como el control de señales digitales, convertidores, marcadores de tiempo, generadores de amplitud de señales. Los resultados de las pruebas realizadas fueron satisfactorios, esto es debido al gran conjunto de herramientas que ofrece y el control de parámetros del motor trifásico. [2]

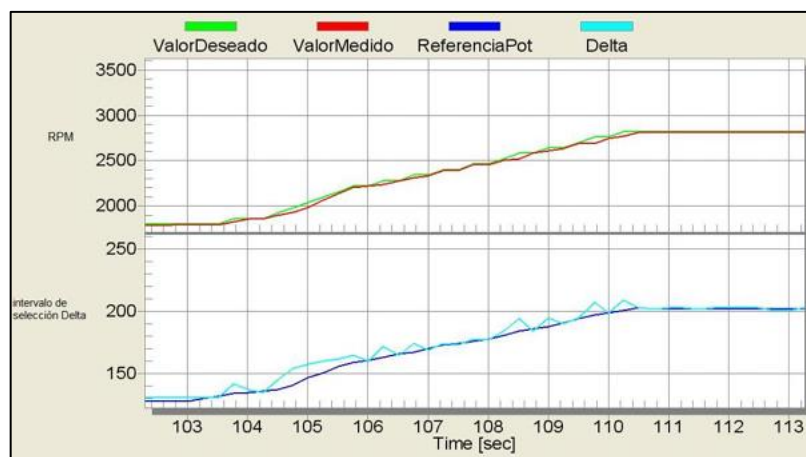


Figura 2. Control de velocidad ante estímulo [2]

En la tesis de Cedillo, J. y Samaniego V. (2021), presentan una solución ante la falta de control de parámetros de motores trifásicos, para ello proponen el desarrollo de un sistema de monitoreo, control y toma de información a distancia de variables eléctricas por medio de IoT (internet de las cosas). La solución

presentada por las autoras se basa en el uso de redes y protocolos industriales en un entorno de LabView y actuadores como PLC para poder realizar el control de motores en alta potencia [3]



Figura 3. Tablero de monitoreo de parámetros del motor [3]

2.1.2. Antecedentes nacionales

Moreano J. (2016) en su trabajo de tesis de maestría, analiza e implementa el control orientado de campo indirecto para un motor trifásico en cortocircuito con rotor de jaula de ardilla. El objetivo principal de la conducción es cumplir con el límite de velocidad y mantenerlo a pesar de las perturbaciones. El trabajo se divide en cuatro partes: Comienza con la modelización matemática del motor de cortocircuito y las transformaciones necesarias para realizar el control. Luego se describe el control indirecto orientado al campo. Posteriormente se utilizan simulaciones del modelo matemático y algoritmo de control con MATLAB y Simulink. Finalmente, se describe la implementación experimental del control IFOC, se presentan los componentes utilizados y los resultados obtenidos. Al finalizar la investigación se reconoce que se ha culminado con éxito la implementación, se cuenta con un módulo para el control de motores trifásicos en cortocircuito mediante el método de control vectorial IFOC y se ha creado un punto de partida para la investigación e implementación. [4]

2.2. Bases teóricas

Microcontrolador STM32F4013RE

El microcontrolador responsable de la generación de FREERTO, el algoritmo de control y la modulación SVPWM es STM32F4013RE, que es uno de la arquitectura ARM CORTEX M4. La capacidad de operar hasta 84 MHz con suficiente poder de cómputo para aplicaciones críticas en varias industrias como la automotriz, manufacturera, biomédica, de telecomunicaciones y aeroespacial. [5]

Arquitectura ARM CORTEX M4

Los procesadores de la serie Cortex-M están diseñados para permitir a los desarrolladores crear soluciones de bajo costo y con limitaciones de energía para una amplia gama de dispositivos. El Cortex-M4 es un procesador integrado de alto rendimiento desarrollado para el mercado de control de señales digitales, que requiere una combinación poderosa y fácil de usar de procesamiento de señales y capacidades de control. [6]

Microcontroladores STM32F401

Los microcontroladores STM32F401 son parte de los dispositivos STM32 Dynamic Efficiency. Estos dispositivos ofrecen el mejor equilibrio entre el consumo de energía dinámico (en modo de conducción) y la potencia de procesamiento, integrando muchas características de valor agregado en paquetes tan pequeños como 3 x 3 mm.

- 3x USARTs que pueden transmitir hasta 10.5 Mbit/s,
- 4x SPI que pueden transmitir hasta 42 Mbit/s,
- 3x I²C, en modo 100KHz, 400KHz, 4Mbit/s
- 1x SDIO,
- 1x USB 2.0 OTG full speed,
- 2x full duplex I²S hasta 32-bit/192KHz,
- 12-bit ADC de hasta 2.4 MSPS,
- 10 timers, 16- y 32-bit, pudiendo correr a 84 MHz (Incluyen el PWM)

Al momento de buscar un modelo matemático para trabajar con motores trifásicos se debe tener en cuenta los elementos que lo constituyen (Estator, Rotor y los Escudos) pudiendo variar si se tratara de un Monofásico o Trifásico.

En nuestro caso nuestro interés es en el modelo de un motor trifásico, con rotor en corto circuito (Jaula de Ardilla), pero para su modelado se puede usar métodos no paramétricos, a través de visualizar su respuesta a respuestas a la entrada escalón, sea en softwares como Matlab o LabVIEW. Otro método de Modelado sería el cálculo de manera experimental de los parámetros correspondientes del motor sea resistencias, inductancias y transformador.

Una vez calculado el modelo matemático de nuestro motor, obtendremos nuestra función de transferencia o discretizar para poder implementar nuestro algoritmo de control en nuestro microcontrolador.

Algoritmo de control

El algoritmo de control va a depender del controlador que se dese implementar:

- **Control Convencional:** Control PID, Cascada, avance o retardo de Fase.
- **Control Avanzado:** podemos dividir en tres: Convencional (control selectivo, control desacoplado), basado en modelos numéricos (Control predictivo adaptativo) y basados en conocimiento (Control difuso y neuronal)

Para este sistema se utilizará un controlador digital en el que se seguirá una secuencia de pasos desde la obtención de data analógica, la convierte a una señal digital, la computadora procesa la información y la convierte en una nueva secuencia de valores digitales, que varían de acuerdo con el algoritmo implementado.

La implementación del algoritmo se realizará en un Microcontrolador STM32 de arquitectura ARM (Advanced RISC Machine) de 32 bits, teniendo la capacidad

de cómputo para realizar tareas de alto consumo de la CPU incluyendo una Unidad de Punto Flotante (FPU).

La modulación de vector espacial PWM es una técnica avanzada utilizada para aplicaciones de variador de frecuencia. Utilizando una alimentación de voltaje continuo que es más efectivo y genera menos distorsión armónica (DHT) en el inversor trifásico que controlara nuestro motor.

El termino de vector espacial es derivado del campo giratorio de un motor de inducción, en esta técnica En esta técnica de modulación, una cantidad trifásica se puede convertir en una cantidad bifásica equivalente en un marco giratorio síncrono en un marco fijo. Puede encontrar la magnitud del vector de referencia en estos componentes de dos fases y usarlo para modular la salida del inversor.

Estos vectores nos informan de la dirección en la que el inversor está intentando establecer un campo magnético dentro del generador. Para controlar la salida de par del generador, necesitamos crear un vector que gire suavemente. El inversor debe tener la capacidad de establecer un vector en cualquier ángulo.

2.3. Marco conceptual

Control PID

Dentro del sistema el controlador que se uso fue un PID, teniendo 3 parámetros fundamentales: Ganancia proporcional (K_p), Integral (K_i) y Derivativo (K_d).

El parámetro Proporcional (K_p) mide la diferencia entre el valor actual y el set point y aplica el cambio.

El parámetro Integral (K_i) se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, el ajuste es más rápido, pero puede causar inestabilidad en el sistema, oscilaciones, vibración de motor y de la bomba.

El parámetro Derivativo (K_d) emite una acción predictiva, es decir, prevé el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad de cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

La correcta sintonización o programación de estos parámetros nos ayuda a controlar de manera efectiva nuestra presión o flujo deseado. Si no programamos adecuadamente estos parámetros, el sistema puede quedar inestable y el motor y la bomba pueden comenzar a vibrar y dañarse.

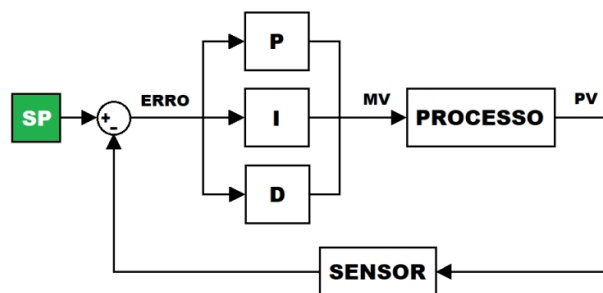


Figura 4. Diagrama del Control PID

FreeRTOS

El kernel de FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real que admite numerosas arquitecturas. Es ideal para crear aplicaciones de microcontroladores integradas. Proporciona:

- Un programador multitareas.
- Varias opciones de asignación de memoria (incluida la opción de crear sistemas asignados de forma totalmente estática).
- Primitivos de coordinación entre tareas, como notificaciones de tareas, colas de mensajes, varios tipos de semáforo y búferes de transmisión y mensajes.
- Support multiprocesamiento simétrico (SMP) en microcontroladores multinúcleo.

El kernel de FreeRTOS nunca realiza operaciones no deterministas, como, por ejemplo, recorrer una lista enlazada, dentro de interrupciones o secciones

críticas. El kernel de FreeRTOS incluye una implementación de temporizador de software eficiente que no utiliza tiempo de CPU a menos que el temporizador necesite mantenimiento. Las tareas bloqueadas no necesitan laborioso mantenimiento periódico. Las notificaciones directas a la tarea facilitan una rápida señalización de la tarea, sin casi ningún gasto de RAM.

2.4. Definición de términos básicos

Electrónica de control

La electrónica de control va orientada a aquellos dispositivos que intervienen en la automatización y control de procesos industriales.

En este campo están involucrados los amplificadores operacionales, sus configuraciones básicas, algunos sensores y por supuesto los microcontroladores.

Los circuitos usados en electrónica de control son básicamente controladores de variables fisicoquímicas como lo son: Controles de temperatura, humedad, presión, nivel, PH, amplificadores de instrumentación, controles PWM etc.

Motor trifásico

El motor trifásico debe el término a que se alimenta de energía eléctrica trifásica. Las instalaciones monofásicas son más propias de hogares, con tensiones que van de 120 a 230 voltios y potencias que quedan por debajo de los 10 Kw.

Microcontrolador

El Microcontrolador es un circuito integrado que es el componente principal de una aplicación embebida. Es como una pequeña computadora que incluye sistemas para controlar elementos de entrada/salida. También incluye a un procesador y por supuesto memoria que puede guardar el programa y sus variables (flash y RAM). Funciona como una mini PC. Su función es la de automatizar procesos y procesar información.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis Principal

HG: Se implementó correctamente el algoritmo de control digital un motor trifásico que permitió visualizar todas las variables a controlar en tiempo real

3.2. Definición conceptual de variables

Variables Independientes: (X)

Evolución del campo de la investigación.

Variables Dependiente:(Y)

Métodos de evaluación de los sistemas de simulación

X1: Técnicas de evaluación

Y1: Red temática estratégica de métodos de evaluación.

X2: Desempeño de producción de las fuentes de simulación

Y2: Adecuación de la necesidad actual de producción dispositivos electrónicos.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

Según las fuentes de información, este trabajo se considera una investigación Mixta. Esta participa de la naturaleza de la investigación de campo y documental. Respecto al nivel de investigación se determina descriptivo-explicativa porque selecciona las características fundamentales del objeto de estudio con una descripción detallada de sus partes. De la misma forma se considera explicativa en la medida que se analizan las causas y efectos de las relaciones entre las distintas variables.

4.2. Método de la investigación

Los métodos se utilizan cada vez más cuando se estudian varios aspectos de la ciencia y también en la forma en que las instituciones y universidades se clasifican en todo el mundo. Se han completado un número suficiente de estudios y, con la literatura resultante, ahora es posible analizar el método bibliométrico utilizando su propia

4.3. Población y muestra

La población está determinada por las simulaciones realizadas por el programa que se estará realizando

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

No se posee

4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los documentos se reunirán por intermedio de la base de datos Scopus, mientras que el análisis de desempeño se determinara por medio del Software SciMAT.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Se utilizó software Excel para la recopilación de los datos de parámetros eléctricos

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

Dentro de la implementación del controlador digital para motores trifásicos nuestro sistema tendrá las siguientes etapas:

- **Comparador:** Etapa en la cual se compara la señal de entrada nuestro Set Point con la realimentación del encoder trifásica de nuestro motor.
- **Controlador:** En esta etapa al obtener la data del comparador se utiliza el algoritmo de control implementado, para obtener una respuesta y será ejecutada mediante el sistema operativo que se encuentra corriendo en el Core del STM32 siendo un control en tiempo real.
- **Actuador:** En esta etapa entra la parte de control le asigna una respuesta a la etapa de potencia a través de sus 3 canales PWM complementarios las cuales se conectan al inversor trifásica.
- **FeedBack:** En esta etapa obtenemos el valor de salida de nuestro sistema pudiendo ser una señal de voltaje, o de un encoder.

Después de haber hecho un estudio viendo las mejores herramientas para el modelado del motor trifásico, un sistema embebido que soporten la implementación un sistema operativo y el software CAD para diseñar el inversor trifásico, se llegó a la siguiente elección:

- **Matalb & Simulink:** Son software de ingeniería que nos servirá para la parte de modelamiento, simulación, comparativas de un motor trifásico teniendo en cuenta todas sus características y adicionalmente el soporte para generar código embebido.
- **Stm32:** Serie de microcontroladores de 32 bits de la empresa STMicroelectronics, en las cuales soportan sistemas operativos en tiempo real, contando con una robustez para aplicaciones industriales.

- **Altium:** Es el software líder a nivel mundial que nos permite realizar pcb's de muy alto nivel y profesionalidad, siendo utilizada por las principales empresas a nivel mundial como la NASA, Space X, Microchip, etc.

Para lo que el diseño electrónico del inversor trifásico se utilizara los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) o transistores bipolares de compuerta aislada son elementos muy similares en diseño y operación a los Mosfet de potencia, teniendo una elevada impedancia de entrada y una baja resistencia de salida típicamente menores de $10\text{ m}\Omega$ que le da un gran amortiguamiento frente a cargas inductivas y cuenta con una área de operación segura (SOA) muy amplia ,disipan mejor que otros semiconductores, poseen una alta ganancia de corriente y tolerable a grandes picos de corriente. [5]

En Simulink se desarrolló lo que es el esquema básico del sistema que consiste en un modelo clásico de lazo cerrado, en la cual tenemos la entrada de la referencia, la retroalimentación del encoder del motor trifásico.

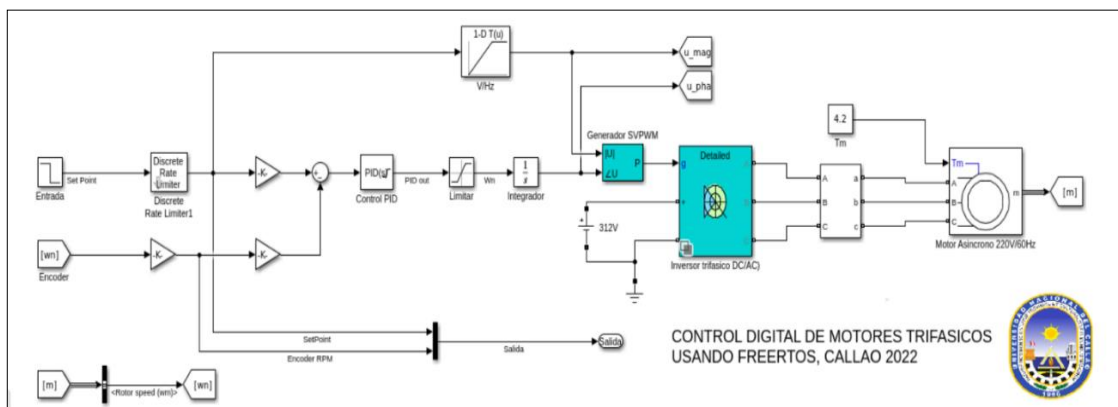


Figura 5. Sistema de control de motor trifásico

Fuente: Elaboración propia

Donde veremos los bloques principales y sus parámetros.

Entrada del Sistema

La referencia de entrada será en RPM, es decir le indicaremos al sistema las revoluciones por minutos que deseemos establecer, pero en la implementación

real se trabajara con un microcontrolador que discretizara esa señal por eso le agregamos un discretizador que lo limite cada 0.00005 Segundos siendo este nuestro tiempo de muestreo.

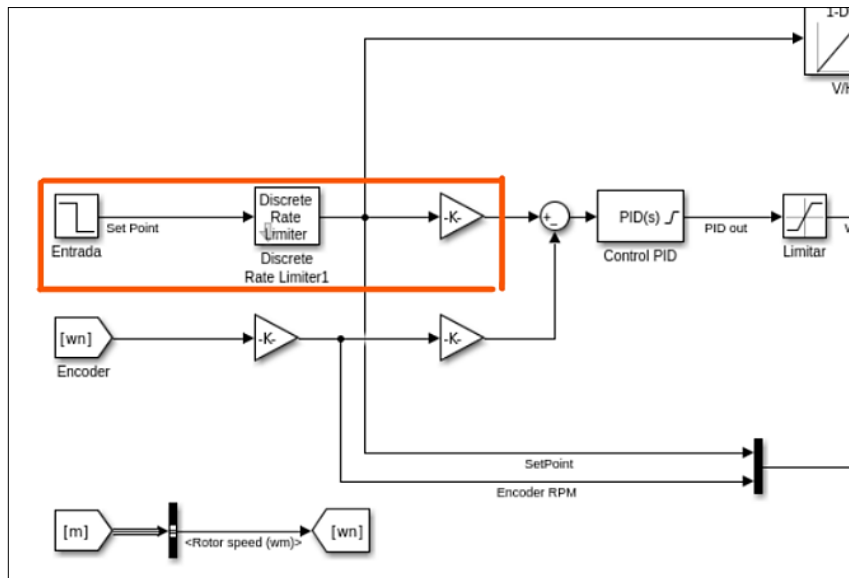


Figura 6. Entrada de Referencia del Sistema

Fuente: Elaboración propia

Retroalimentación

Para cerrar el lazo de control tenemos varios parámetros a la salida del motor trifásico pero el que me interesa es su velocidad angular, la cual la convierto a RPM con eso ya puedo calcular el error del sistema entre la referencia y la medición actual.

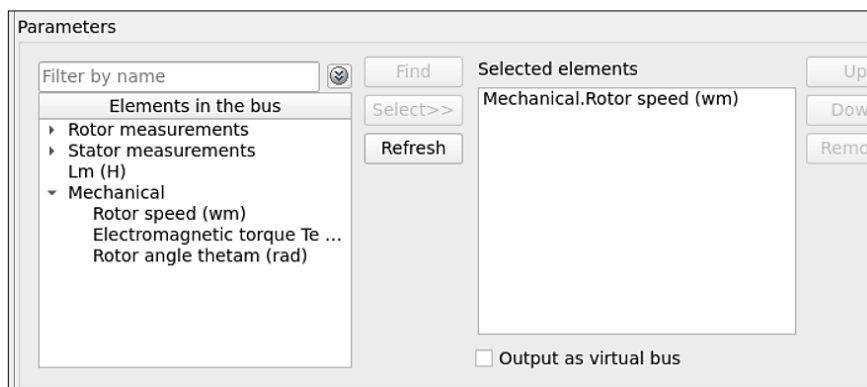


Figura 7. Selección el parámetro para el lazo cerrado

Fuente: Elaboración propia

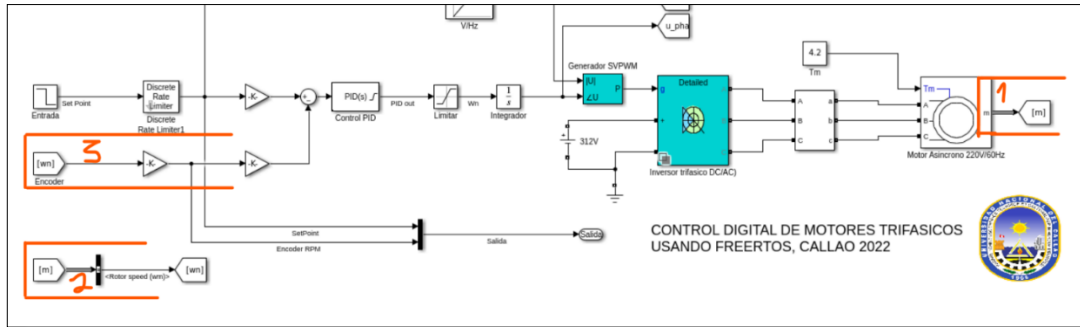


Figura 8. Retroalimentación del Sistema

Fuente: Elaboración propia

Controlador

En este sistema se usó un controlador PID paralelo para que pueda realizar el control de la referencia de nuestro sistema, siendo muy preciso sin sobre picos, y teniendo una respuesta muy rápida.

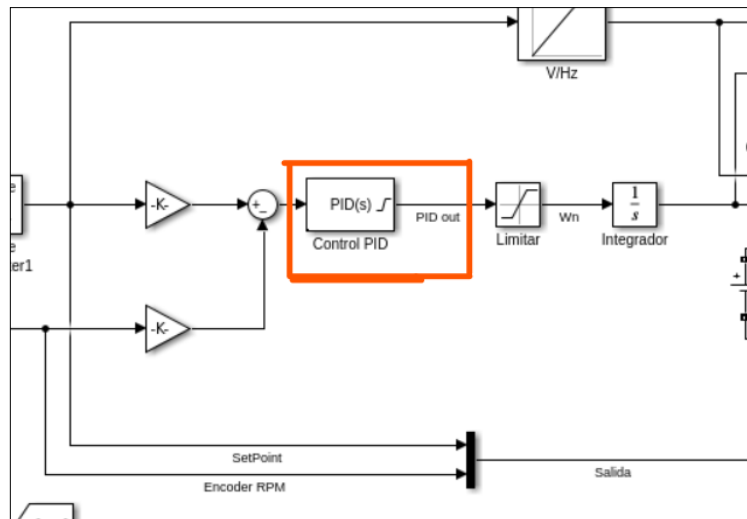


Figura 9. Controlador PID

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de los parámetros se utilizó el método de prueba error para poder acercarnos a la salida que se deseaba, en una etapa posterior se desarrollara el cálculo de la función de transferencia de nuestro sistema

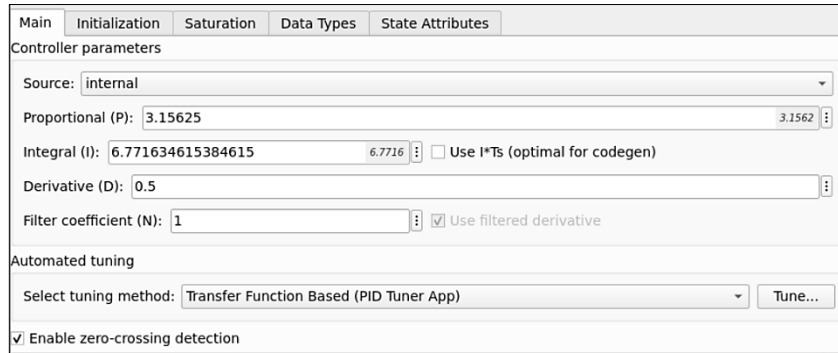


Figura 10. Parámetros del controlador PID

Fuente: Elaboración propia

Inversor trifásico

En nuestro sistema se implementó de manera simulada un inversor DC/AC se usó una configuración más comercial que es mediante IGBT/Diodos (también se pudo usar Mosfet/Diodos o GTO/Diodos) teniendo su voltaje de corriente directa a 312V que es el equivalente a $220\sqrt{2}$.

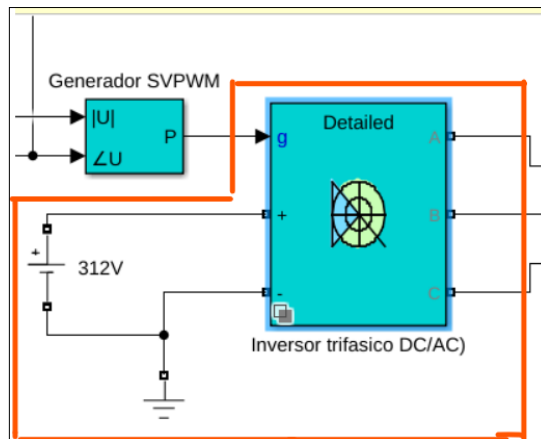


Figura 11. Inversor DC/AC

Fuente: Elaboración propia

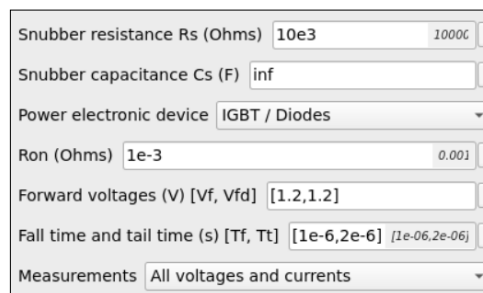


Figura 12. Parámetros de inversor DC/AC

Fuente: Elaboración propia

Generador SVPWM

Para tener el accionamiento del motor usamos la modulación SVPWM, le debemos pasar por referencia la magnitud - ángulo de disparo (también se puede usar las componentes obtenidas usando transformada de Park-CLARK) y eso estará en radianes, también le indicamos que la modulación trabajará a una frecuencia de 2000Hz.

Para el cálculo de la magnitud se interpola la referencia de entrada, y a la salida de la planta de limita y se le integra para poder obtener el ángulo una vez teniendo ambos parámetros este acciona al inversor DC/AC.

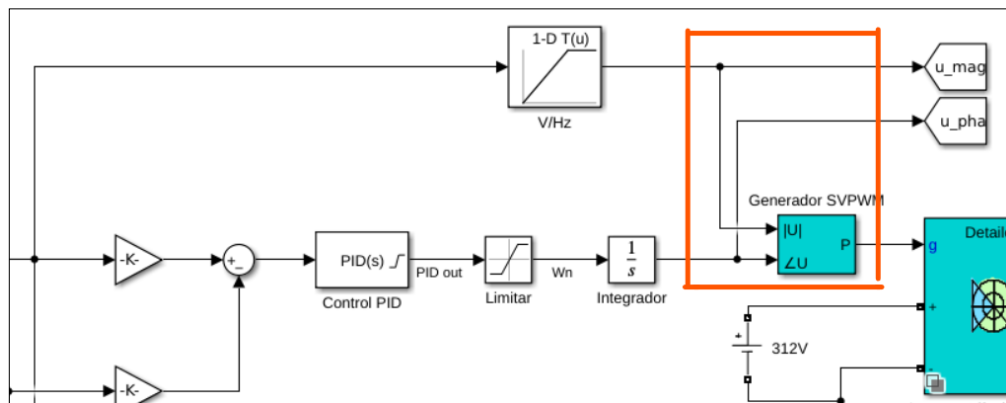


Figura 13. Generador SVPWM

Fuente: Elaboración propia

Motor trifásico

El motor que se utilizó un asíncrono a 220 AC y 60Hz, ingresando como variable el torque mecánico, ya que este puede variar en diversos motores y para la correcta simulación nos conviene poder cambiar su valor en cualquier momento. También se estimaron los posibles valores de las resistencia e inductancia de algunas partes del motor como lo es el estator y el rotor, también para acercarse a una simulación real le doy valores de lo que es el factor de inercia – fricción.

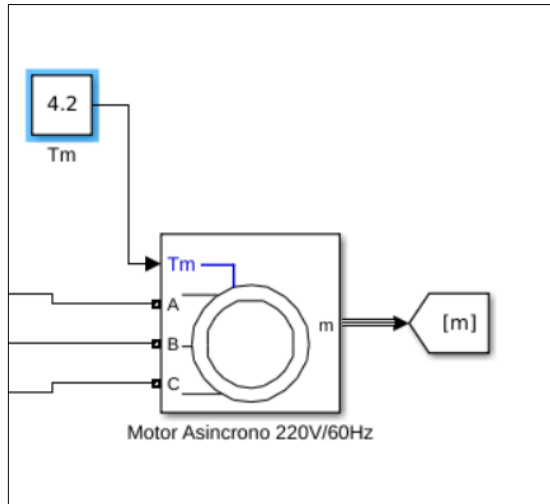


Figura 14. Motor trifásico en Simulink

Fuente: Elaboración propia

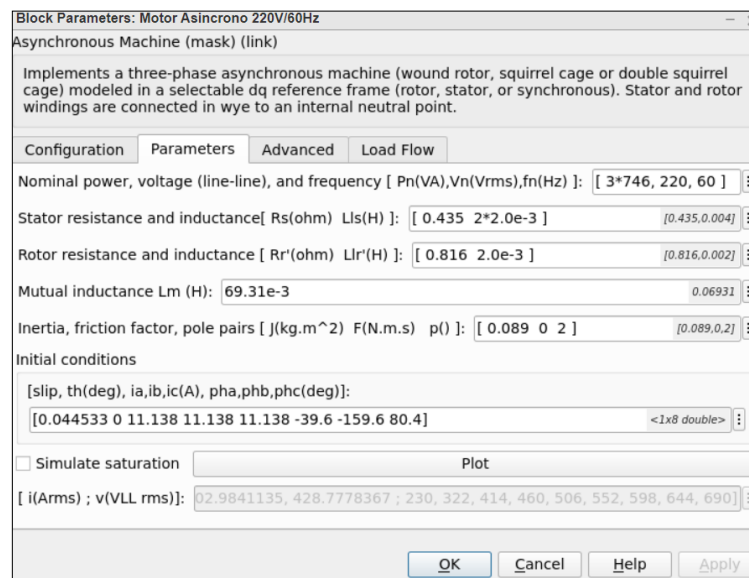


Figura 15. Parámetros del motor trifásico

Fuente: Elaboración propia

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Respuesta del Controlador

Una teniendo el sistema lo que realizamos, ponemos a simular el programa teniendo una interfaz gráfica muy amigable en la cual podemos varia la entrada en todo momento y ver la respuesta.

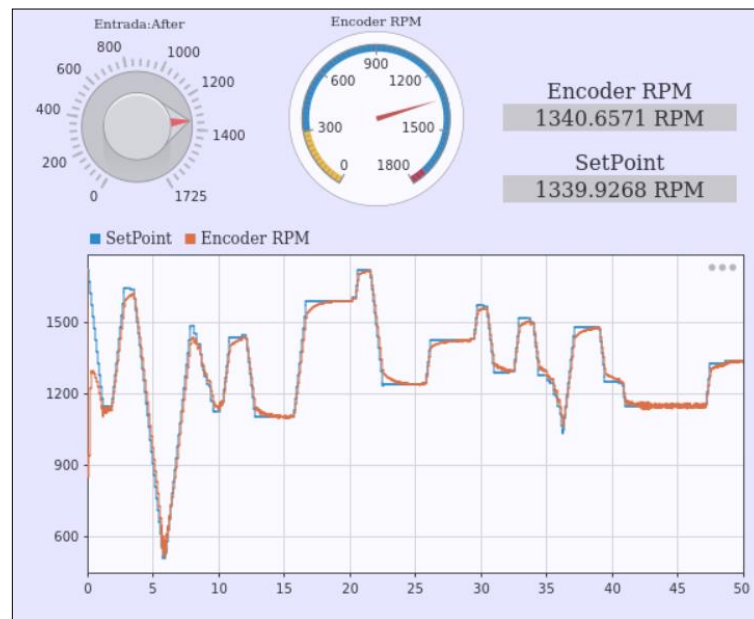


Figura 16. Dashboard del sistema

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°12 podemos observar que en todo momento la señal de salida sigue la referencia ingresada, sin ningún sobrepico u oscilación.

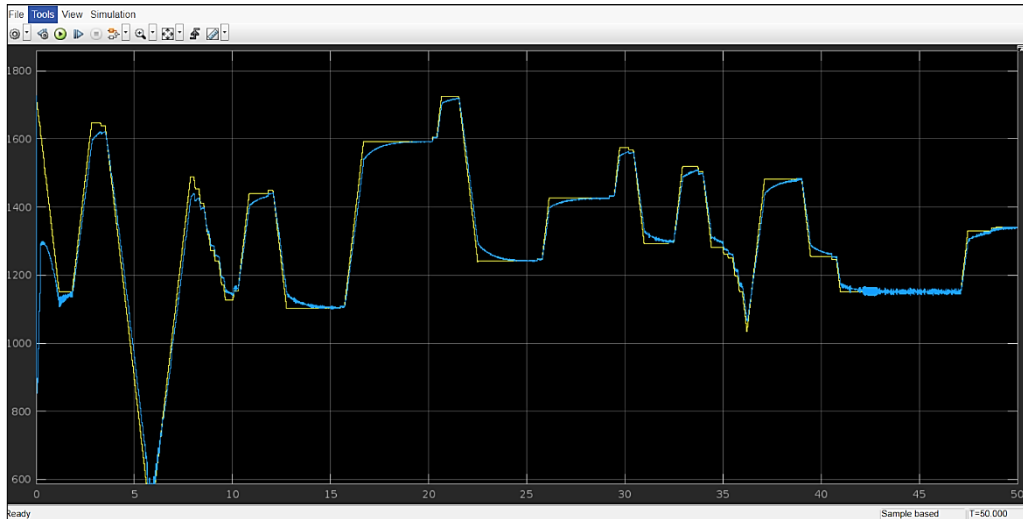


Figura 17. Respuesta del sistema en el scope

Fuente: Elaboración propia

Modulación SPWM

Otro punto a analizar es la modulación que nos permite realizar el control tanto en su fase y magnitud.

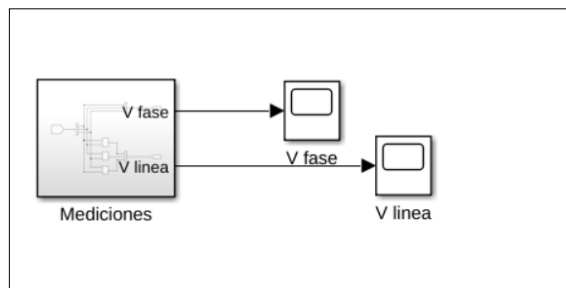


Figura 18. Medimos el voltaje de fase y de línea

Fuente: Elaboración propia

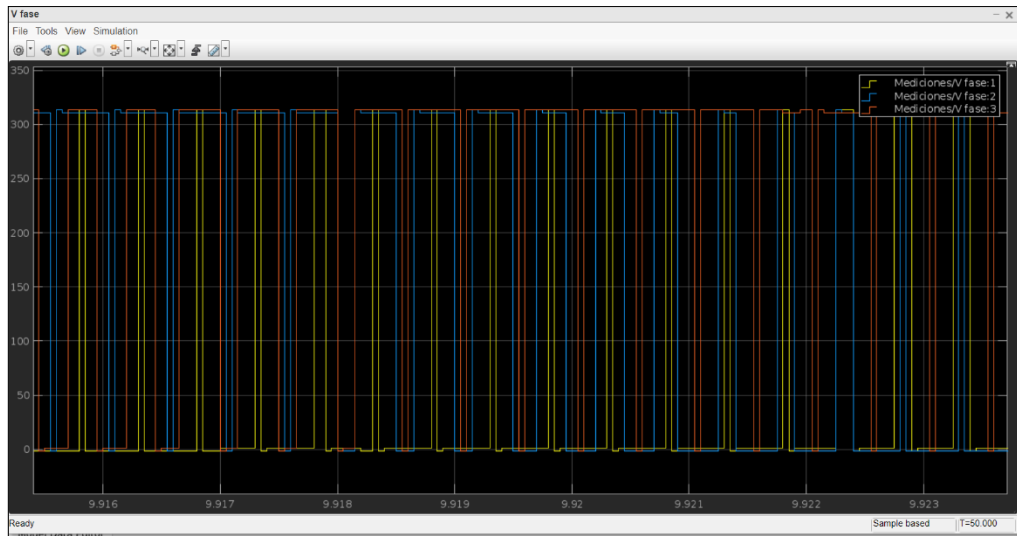


Figura 19. Comportamiento de la modulación en cada fase

Fuente: Elaboración propia



Figura 20. Comportamiento de la modulación en cada línea

Fuente: Elaboración propia

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

6.3. Responsabilidad ética

Los datos considerados para la evaluación, son de naturaleza pública y al acceso de todos, siendo que esta investigación solo basó en mediciones.

CONCLUSIONES

La necesidad del uso de métodos de control para las variables de un motor trifásico es de gran interés en el campo de la investigación, por el impacto que representan en el ámbito industrial, así como la realidad existente sobre el 22.8% de accidentes, fallas o averías a causa de poca supervisión.

El uso de microcontroladores representa una gran utilidad al momento de realizar control de parámetros eléctricos, estos, acompañados de las pertinentes etapas de acondicionamiento de señales, pueden realizar un control óptimo de diversos actuadores.

El desarrollo del sistema basado en una interfaz de monitoreo por medio de Freertros, representa una forma dinámica de realizar una observación asequible y un control rápido de los parámetros establecidos en el diseño.

RECOMENDACIONES

Es importante realizar un estudio más detallados de los parámetros involucrados y que varían según los modelos de motores, a fin de realizar un ajuste del sistema de control.

Se recomienda desarrollar un control de parámetros eléctricos del motor por medio de una interfaz en nube o por medio del manejo de dispositivos móviles para así poder realizar un control más cercano y adaptado a situaciones de lejanía o riesgos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Motores eléctricos: las 10 fallas más comunes - TRACTIAN”.
<https://traction.com/es/blog/fallas-en-motores-electricos-conoce-las-10-causas-mas-comunes-y-como-evitarlas> (accedido 3 de julio de 2023).
- [2] F. Velásquez, “Implementación de algoritmos de control de motores de inducción en un controlador de señales digitales”, Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [3] J. Cedillo y V. Samaniego, “Sistema SCADA para variables eléctricas de motores trifásicos mediante buses de campo IoT”, Tesis de título profesional, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2021.
- [4] J. Moreano, “Implementación del control indirecto de campo orientado (IFOC) en un motor AC trifásico”, Tesis de maestría, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2016.
- [5] “STM32 Nucleo-F401RE Pinout, Specs & Datasheet”.
<https://components101.com/microcontrollers/stm32-nucleo-f401re-pinout-datasheet> (accedido 3 de julio de 2023).
- [6] Autor corporativo, “Cortex-M4 – Arm®”.
<https://www.arm.com/products/silicon-ip-cpu/cortex-m/cortex-m4>
(accedido 3 de julio de 2023).

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p>Problema Principal ¿Se contralora de una manera más eficiente al Motor Trifásico?</p> <p>Problemas Específicos ¿De qué manera se implementaría el algoritmo de control? ¿Se puede realizar el control de manera remota? ¿Cómo se visualizan las variables a controlar?</p>	<p>Objetivo Principal Realizar un análisis de mapeo científico conceptual de los sistemas electrónicos para la simulación adecuada.</p> <p>Objetivo Especifico Determinar los equipos necesarios y los dispositivos electrónicos para el adecuado uso. Tener el simulador adecuado para los dispositivos electrónicos que usaremos.</p>	<p>Hipótesis Principal Identificando los diferentes dispositivo electrónico para campo de la investigación</p> <p>Hipótesis Especifica. Se podrá determinar la red temática estratégica de los métodos de evaluación de las del simulador adecuado.</p> <p>Adecuando la necesidad actualde producción asi poder conocer quien se encuentra con síntomas del covid 19.</p>	<p>Variables Independientes: (X) Evolución del campo de la investigación.</p> <p>Variables Dependiente:(Y) Métodos de evaluación de los sistemas de simulación</p> <p>X1: Técnicas de evaluación</p> <p>Y1: Red temática estratégica de métodos de evaluación.</p> <p>X2: Desempeño de producción de las fuentes de simualcion</p> <p>Y2: Adecuación de la necesidad actual de producción dispositivos electronicos</p>	<p>Tipo de Investigación Según la fuente de información, este trabajo se considera una investigación Mixta. Esta participa medio ambiente en investigación de campo y documental. Respecto al nivel de investigación se determina descriptivo-explicativa porque selecciona las características fundamentales del objeto de estudio con una descripción detallada de sus partes. De la misma forma se considera explicativa en la medida que se analizan las causas y efectos en la descontaminación.</p> <p>Determinación de la población La población está determinada por los artículos originales de la base de datos</p> <p>Determinación de la Muestra La muestra es el conjunto de documentos relevantes para el periodo seleccionado. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.</p>



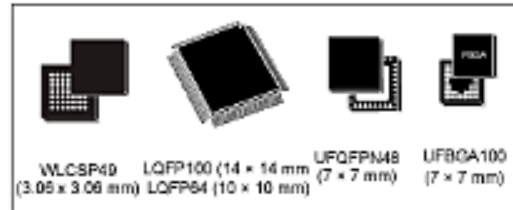
STM32F401xD STM32F401xE

ARM® Cortex®-M4 32b MCU+FPU, 105 DMIPS,
512KB Flash/96KB RAM, 11 TIMs, 1 ADC, 11 comm. interfaces

Datasheet - production data

Features

- Core: ARM® 32-bit Cortex®-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 84 MHz, memory protection unit, 105 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
 - up to 512 Kbytes of Flash memory
 - up to 96 Kbytes of SRAM
- Clock, reset and supply management
 - 1.7 V to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, PVD and BOR
 - 4-to-26 MHz crystal oscillator
 - Internal 16 MHz factory-trimmed RC
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 32 kHz RC with calibration
- Power consumption
 - Run: 146 µA/MHz (peripheral off)
 - Stop (Flash in Stop mode, fast wakeup time): 42 µA Typ @ 25°C; 65 µA max @25 °C
 - Stop (Flash in Deep power down mode, fast wakeup time): down to 10 µA @ 25 °C; 30 µA max @25 °C
 - Standby: 2.4 µA @25 °C / 1.7 V without RTC; 12 µA @85 °C @1.7 V
 - V_{BAT} supply for RTC: 1 µA @25 °C
- 1×12-bit, 2.4 MSPS A/D converter: up to 16 channels
- General-purpose DMA: 16-stream DMA controllers with FIFOs and burst support
- Up to 11 timers: up to six 16-bit, two 32-bit timers up to 84 MHz, each with up to four IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input, two watchdog timers (independent and window) and a SysTick timer



- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
 - Cortex®-M4 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 81 I/O ports with interrupt capability
 - Up to 78 fast I/Os up to 42 MHz
 - All I/O ports are 5 V-tolerant
- Up to 12 communication interfaces
 - Up to 3 x I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 3 USARTs (2 x 10.5 Mbit/s, 1 x 5.25 Mbit/s), ISO 7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
 - Up to 4 SPIs (up to 42Mbit/s at f_{CPU} = 84 MHz), SPI2 and SPI3 with muxed full-duplex I²S to achieve audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
 - SDIO interface
 - Advanced connectivity: USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
- CRC calculation unit
- 96-bit unique ID
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar
- All packages (WLCSP49, LQFP64/100, UFQFPN48, UFBGA100) are ECOPACK®2

Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F401xD	STM32F401CD, STM32F401RD, STM32F401VD
STM32F401xE	STM32F401CE, STM32F401RE, STM32F401VE

2 Description

The STM32F401xD/xE devices are based on the high-performance ARM® Cortex®-M4 32-bit RISC core operating at a frequency of up to 84 MHz. Its Cortex®-M4 core features a Floating point unit (FPU) single precision which supports all ARM single-precision data-processing instructions and data types. It also implements a full set of DSP instructions and a memory protection unit (MPU) which enhances application security.

The STM32F401xD/xE incorporate high-speed embedded memories (512 Kbytes of Flash memory, 96 Kbytes of SRAM), and an extensive range of enhanced I/Os and peripherals connected to two APB buses, two AHB buses and a 32-bit multi-AHB bus matrix.

All devices offer one 12-bit ADC, a low-power RTC, six general-purpose 16-bit timers including one PWM timer for motor control, two general-purpose 32-bit timers. They also feature standard and advanced communication interfaces.

- Up to three I²Cs
- Up to four SPIs
- Two full duplex I²Ss. To achieve audio class accuracy, the I²S peripherals can be clocked via a dedicated internal audio PLL or via an external clock to allow synchronization.
- Three USARTs
- SDIO interface
- USB 2.0 OTG full speed interface

Refer to [Table 1](#) for the peripherals available for each part number.

The STM32F401xD/xE operate in the -40 to +105 °C temperature range from a 1.7 (PDR OFF) to 3.6 V power supply. A comprehensive set of power-saving mode allows the design of low-power applications.

These features make the STM32F401xD/xE microcontrollers suitable for a wide range of applications:

- Motor drive and application control
- Medical equipment
- Industrial applications: PLC, inverters, circuit breakers
- Printers, and scanners
- Alarm systems, video intercom, and HVAC
- Home audio appliances
- Mobile phone sensor hub

[Figure 3](#) shows the general block diagram of the devices.

