

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad



TEMA:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ARRANCADOR SUAVE MEDIANTE
UN SISTEMA EMBEBIDO PARA MOTORES TRIFÁSICOS DE DIFERENTES
POTENCIAS EN EL LABORATORIO DE CONTROL DE LA CARRERA DE
ELECTRICIDAD.**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del
Norte previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Autor:
Jorge Javier Chasi Cuzco

DIRECTOR:
Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

Ibarra, 2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1727536995		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Jorge Javier Chasi Cuzco		
DIRECCIÓN:	Tabacundo		
EMAIL:	jjchasic@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0996009527

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ARRANCADOR SUAVE MEDIANTE UN SISTEMA EMBEBIDO PARA MOTORES TRIFÁSICOS DE DIFERENTES POTENCIAS EN EL LABORATORIO DE CONTROL DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD.
AUTOR (ES):	Jorge Javier Chasi Cuzco
FECHA: DD/MM/AAAA	5/09/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 5 días del mes de septiembre de 2023.

EL AUTOR:



Nombre: Jorge Javier Chasi Cuzco



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Yo, Isabel Marina Quinde Cuenca en calidad de tutora del señor, Jorge Javier Chasi Cuzco, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ARRANCADOR SUAVE MEDIANTE UN SISTEMA EMBEBIDO PARA MOTORES TRIFÁSICOS DE DIFERENTES POTENCIAS EN EL LABORATORIO DE CONTROL DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD."** Para la obtención del título de ingeniero en Electricidad; aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

DIRECTORA DE TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a dios quien me brindo la fuerza para seguir adelante y no desmayar en las diferentes adversidades que se presentaron y por tal razón haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

De manera especial a mis padres, por ser quienes me motivaron a continuar con este sueño y nunca rendirme, gracias a su amor, paciencia, trabajo y sacrificio prestado durante todos estos años, en los cuales me apoyaron incondicionalmente en esta etapa de mi formación profesional.

Agradecimiento

Le agradezco a dios por haberme guiado con sabiduría y éxito en mis estudios y haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera y por ser una fortaleza en los momentos de debilidad

Le doy gracias a mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores inculcados y por brindarme una excelente educación en el transcurso de mi vida.

También agradezco a los docentes de la carrera de ingeniería eléctrica de la universidad técnica del norte, por haberme compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación profesional, de igual manera a mi directa de tesis Ing. Isabel Quinde MSc, por la orientación, apoyo y la ayuda brindada para el desarrollo de esta tesis.

Tabla de Contenido

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
CONSTANCIA.....	III
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	IV
Dedicatoria	V
Agradecimiento	VI
Tabla de Contenido.....	VII
Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Resumen	XIV
Abstract	XV
INTRODUCCIÓN	16
A1. Contextualización	16
A2. Problema	18
A3. Formulación del problema.....	18
Objetivos.....	19
A4. Objetivo General.....	19
A5. Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO 1	20
1.1 Motores Eléctricos	20
1.1.1 Motores de Corriente Directa	20
1.1.2 Motores de Corriente Alterna	21
1.1.3 Motores de Inducción	21

1.2 Arranque de los Motores de Inducción	23
1.3 Técnicas de Arranque de Motores de Inducción.....	24
1.3.1 Arranque a Plena Tensión.....	24
1.3.2 Arranque por Autotransformador a Tensión Reducida (ATR)	26
1.3.3 Arranque por Resistencia en Serie.....	28
1.3.4 Arranque Estrella-Delta.	30
1.3.5 Método de Arranque Suave (Soft-Start).....	32
1.4 SCR (Rectificador Controlado de Silicio)	34
CAPÍTULO 2	35
Diseño del prototipo del módulo de arrancador suave para motores trifásicos.....	35
2.1 Metodología.....	35
2.1.1 Requerimientos Técnicos del Módulo del Arrancador suave.	36
2.1.2 Requerimientos del Sistema.....	37
2.1.3 Requerimientos de Estructura.....	37
2.1.2 Especificación de Etapas	38
2.2 Circuito potencia	40
2.2.1 Selección de Triac (Transistor de corriente alterna)	40
2.2.3 Detector de Cruce por Cero	42
2.3 Circuito de Control	42
2.3.1 Microcontroladores.....	42
2.3.2 Pantalla LCD	44
2.3.2 Optoacoplador	46
2.3.3 Fuente de Alimentación	48
2.4 Esquema General de Conexiones	48

2.5 Funcionamiento del sistema	50
2.5.1 Primera Etapa.....	50
2.5.2 Segunda Etapa.....	51
2.5.3 Tercera Etapa	51
2.5.4 Cuarta Etapa.....	52
2.6 Diseño del Módulo del Arrancador Suave	52
2.6.1 Desarrollo de Software.....	53
2.7 Simulaciones	54
2.8 Conclusiones	60
CAPÍTULO 3	61
Implementación del Arrancador Suave con Control de Potencia variables	61
3.1 Metodología.....	61
3.2. Implementación del Módulo.....	61
3.2.1. Descripción de Costo Comercial de los Componentes Eléctricos y Electrónicos para el Arrancador Suave.....	62
3.3. Distribución y Montaje de Componentes Electrónicos	63
3.3.1 Construcción del Circuito del Detector de Cruce por Cero	63
3.3.3. Implementación Interfaz HMI	72
3.3.4 Montaje en la Estructura de Aislamiento y Protección de los Componentes	74
3.4 Resultados.....	76
3.4.1 Pruebas de Arrancador Suave con Motor Trifásico sin carga	76
3.4.2 Pruebas de Arrancador Suave con Motor Trifásico con carga	79
Conclusiones.....	82
Recomendaciones.....	83

Referencias	84
Anexos	89
Anexo A.- Código Detector de Cruce por Cero y Activación de Triacs.....	89
Anexo C.- Tarjeta de Potencia (Esquemático de conexión).....	94
Anexo D.- Hoja de Especificaciones Fototransistor 4N25	95
Anexo E.- Hoja de Especificaciones Moc 3021	97
Anexo F.- Hoja de Especificaciones Triac BT41600V	100

Índice de Figuras

Fig 1.	Partes principales de un motor eléctrico de inducción con rotor de jaula de ardilla.	22
Fig 2.	Curva característica par-velocidad de un motor de inducción típico.	23
Fig 3.	Curvas de corriente/velocidad y par/velocidad del arranque directo	25
Fig 4.	Esquema eléctrico del arranque con autotransformador.	27
Fig 5.	Curva de velocidad y par/corriente del arranque por autotransformador	28
Fig 6.	Curvas de corriente/velocidad y par/velocidad del arranque por resistencia en el estator.	29
Fig 7.	Circuito de potencia y mando arranque estrella delta	31
Fig 8.	Curva de corriente velocidad y par velocidad del arranque estrella-Triangulo.	32
Fig 9.	Esquema básico de un arrancador suave	33
Fig 10.	Rectificador Controlado de Silicio (SCR)	34
Fig 11.	Diagrama de bloques del módulo arrancador suave	39
Fig 12.	Detector de Cruce por Cero	42
Fig 13.	pantalla LCD 16X2	44
Fig 14.	Conexión pantalla LCD 16x2 en Arduino	46
Fig 15.	Circuito de opto acoplamiento MOC3021	47
Fig 16.	Mini Módulo de Fuente de Alimentación	48
Fig 17.	Esquema general de conexiones	49
Fig 18.	Simulación de conexión elementos de potencia en Multisim	50
Fig 19.	Diseño de la estructura externa del Módulo	52
Fig 20.	Diagrama de flujo del menú Principal	54
Fig 21.	Simulación de arrancador suave	55
Fig 22.	Datos de Placa Motor Trifásico	55
Fig 23.	Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque directo	56

Fig 24.	Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque suave	57
Fig 25.	Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque suave	58
Fig 26.	Estabilización de las revoluciones por minuto del motor con arranque suave	59
Fig 27.	Grafica del par producido por un arranque suave.	60
Fig 28.	Detector de cruce por cero con Moc4N25	64
Fig 29.	Implementación del detector de cruce por cero para fase R y S.	65
Fig 30.	Pulso generado por el cruce por cero de 4N25	66
Fig 31.	Grados eléctricos de corriente alterna	67
Fig 32.	PWM generado después de detección de cruce por cero	68
Fig 33.	Duty cycle al 25 %	69
Fig 34.	Acoplamiento del Moc 3021 al triac	70
Fig 35.	Diseño de la Tarjeta PCB	70
Fig 36.	Tarjeta PCB de la etapa de potencia	71
Fig 37.	Simulación HMI en fritzing	72
Fig 38.	colocación elementos HMI en el Tablero	73
Fig 39.	Ubicación de los elementos de la Interfaz HMI	74
Fig 40.	Conexiones Internas del arrancador suave	75
Fig 41.	Termomagnético 3p x20 A	75
Fig 42.	Datos de placa motor trifásico	76
Fig 43.	Onda senoidal Recortada – Fase R	77
Fig 44.	Onda senoidal Recortada – Fase S	78
Fig 45.	Fase T	78

Índice de Tablas

Tabla 1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE DISEÑO	36
Tabla 2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	37
Tabla 3. REQUERIMIENTOS DE ESTRUCTURA.....	38
Tabla 4. VALORES USUALES DE INTENSIDAD DE UN MOTOR A PLENA CARGA	40
Tabla 5. CARACTERÍSTICAS TRIAC BT41600B	41
Tabla 6. MICROCONTROLADORES EN EL MERCADO	43
Tabla 7. PINOUT PANTALLA LCD 16X2	44
Tabla 8. LISTA DE MATERIALES ADQUIRIDOS EN BASE A REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	62
Tabla 9. CONEXIÓN DE PINES DETECTORES DE CRUCE POR CERO	64
Tabla 10. conexión de pines interfaz hombre maquina	73

Resumen

En la actualidad la industria avanza constantemente, lo que la obliga a las empresas implementar motores para realizar trabajos mecánicos, sin embargo su uso representa costos en su consumo eléctrico más aún en el arranque de un motor de inducción, la corriente puede provocar caídas de tensión que afectan a su desempeño, mediante una revisión bibliográfica se buscará en el mercado los diferentes métodos existentes de arranques, el más actual es el uso de un soft starter (arrancador suave), disponible en el mercado desde hace unos 20 años atrás; el equipo acelera de forma gradualmente suave, sin embargo, estos equipos son compactos sin la capacidad de poder modificarlos para una reutilización en otras máquinas con motores que requieran un arranque suave. Por esta razón el objetivo de esta investigación es la implementación de un arrancador suave mediante un sistema embebido para motores trifásicos que posean diferentes potencias, para ellos se modelará en Matlab-Simulink el arrancador con tiristores donde se observará el comportamiento en la reducción de los picos de voltaje y corriente mediante un control de pulsos PWM, lo que permite seguir con la etapa de construcción de un módulo de arrancador suave para motores de diferente potencia.

Palabras clave: Soft Starter, Motor Trifásico, sistema embebido, Tiristores, PWM

Abstract

At present, the industry is constantly advancing, which forces companies to implement motors to carry out mechanical work, however, its use represents costs in its electrical consumption, even more so when starting an induction motor, the current can cause voltage drops. that affect its performance, through a bibliographical review, the different existing starting methods will be searched in the market, the most current is the use of a soft starter, available on the market for about 20 years ago; the equipment accelerates in a smooth gradual way, however, these equipment are compact without the ability to be able to modify them for reuse in other machines with motors that require a soft start. For this reason, the objective of this research is the implementation of a soft starter through an embedded system for three-phase motors that have different powers, for them the thyristor starter will be modeled in Matlab-Simulink where the behavior in the reduction of peaks will be observed. of voltage and current by means of a PWM pulse control, which allows continuing with the construction stage of a soft starter module for motors of different power.

Keywords: Soft Starter, Three-Phase Motor, embedded system, Thyristors, PWM

INTRODUCCIÓN

A1. Contextualización

En la industria, los motores de inducción se utilizan con frecuencia para regular los procedimientos de producción, la mayoría de estos motores funcionan con CA tienen rotores jaula de ardilla. Debido a su eficiencia, versatilidad en el manejo, bajo costo de producción y cortos ciclos de mantenimiento, los rotores jaula de ardilla reales son mucho más compactos y tienen un núcleo de hierro laminado. (Salta, 2020).

La corriente de arranque de un motor de inducción siempre es mucho mayor que la corriente nominal y puede provocar caídas de tensión que repercutan en el rendimiento de las cargas eléctricas cercanas. Un tiempo de arranque excesivo eleva la temperatura del motor, lo que daña sus componentes mecánicos y eléctricos (Caputo, 2018).

Los motores de inducción tienen una corriente de arranque relativamente alta que, durante el tiempo de funcionamiento normal, puede oscilar entre 3 y 15 veces la corriente nominal. Aunque puede ser manejable, tiene el potencial de dañar el motor y la fuente de alimentación con el tiempo. De acuerdo con (Iguenes, 2017), los problemas causados por el arranque de motores eléctricos de CA se pueden categorizar en tres categorías: alto par, alto consumo de corriente y sobrecalentamiento del motor. (Ascuy, 2021)

Los mayores consumidores de electricidad en estos momentos es el sector industrial. Este gran consumo provoca que cada año el gobierno y entes privados inviertan más dinero en la generación de energía, para satisfacer la demanda, estas inversiones se podrían reducir mucho si se implementaran políticas de ahorro energético. Pero ahorrar energía no es una tarea fácil porque en la mayoría de los casos industriales ya el ahorro técnico con tecnología disponibles ha llegado a su límite, resultando en que

el costo de los productos que ahorran energía es irrelevante en el dilema de la toma de decisiones entre “gasto en energía “o inversión en productos de ahorro energético. En definitiva, la decisión correcta sería instalar equipos que sean rentables, que se paguen por sí mismo con el ahorro que generen y mejoren la eficiencia de los procesos existentes. Además, le darían a la empresa que instalará este tipo de dispositivos, una posición entre las que se preocupan por el recurso energético.

Las causas comunes de las bajas de tensión incluyen el encendido de grandes cargas (como la que se puede ver cuando se activa por primera vez una unidad grande de aire acondicionado) y la liberación remota de fallas por parte de los equipos de la red eléctrica. En forma similar, el arranque de grandes motores dentro de una planta industrial puede dar como resultado una caída significativa de la tensión (bajada de tensión). (Seymour & Horsley, 2010).

En ocasiones, los dispositivos electrónicos pueden consumir más corriente de la que pueden manejar en determinadas circunstancias de funcionamiento, este evento impredecible ocurre muy repetidamente y tendrá un efecto significativo en el motor. Ciertos dispositivos deben instalarse de tal manera que se puedan evitar las sobre corrientes. Estos dispositivos que con frecuencia están cableados en los circuitos, cortan automáticamente cualquier corriente adicional que fluya a través del circuito. (Bright Hub Engineering, 2014)

El motor se adapta al comportamiento de accionamiento de la máquina con la ayuda del control de tensión del arrancador suave, la máquina acelera de forma específicamente suave lo que mejora su comportamiento en funcionamiento y aumenta la vida útil de la máquina. Un proceso de producción sin problemas está garantizado por un arranque y una parada suave, que también protege los dispositivos conectados y aumenta su vida útil. (Gandhi, 2021)

A2. Problema

Los arrancadores suaves en el mercado se caracterizan por ser equipos compactos sin la capacidad de poder modificarlos en sus partes constitutivas para una reutilización en otras máquinas con motores que requieran un arranque suave.

Usualmente el método preferido para el arranque de los motores asíncronos de jaula de ardilla es el directo de la línea, desafortunadamente este arranque está asociado a una serie de problemas (sobrecalentamiento, reducción de vida útil) que pueden tener consecuencias adversas en el arranque, perjudicial para el sistema motor-carga, por los grandes esfuerzos que se desarrollan en ambos, tanto en el arranque como en el frenado, otro método utilizado es el arranque estrella delta el cual reduce la corriente de arranque en un factor de 3, sin embargo el par de arranque también se reduce en un factor 3, este método no es adecuado para cargas con alta inercia o para aquellas que requieren un par de arranque.

Los equipos que se instalan en el sistema tales como conductores, protecciones y demás componentes del sistema de maniobra del motor, pueden verse afectados por los picos de corriente y caída de tensión en el sistema de alimentación de la red. Debido a que deben dimensionarse para manejar esas altas corrientes, esto genera costos más altos. (Viego & Quispe, 2017)

A3. Formulación del problema

¿Cómo implementar un arrancador suave mediante un sistema embebido para motores trifásicos que posean diferentes potencias?

Objetivos

A4. Objetivo General

Implementar un módulo de arrancador suave mediante un sistema embebido para motores trifásicos de diferentes potencias en el laboratorio de control de la carrera de Electricidad.

A5. Objetivos Específicos

- Describir las tecnologías actuales para los distintos tipos de arranque de un motor de inducción trifásico.
- Diseñar el prototipo del módulo de arrancador suave para motores trifásicos.
- Implementar el de arrancador suave con control de potencia variables en el laboratorio de control.

CAPÍTULO 1

Describir las tecnologías para arranque de un motor de inducción trifásico.

1.1 Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas que funcionan a través de la interacción del flujo magnético y la corriente eléctrica, es una máquina capaz de convertir la energía eléctrica en mecánica. En general los motores eléctricos se clasifican en dos grupos: motores de corriente directa (DC) y de corriente alterna (AC).

Según TRANSELEC (2017) funcionan bajo el mismo principio donde utiliza la energía eléctrica para crear campos magnéticos que se opongan entre sí, haciendo que se rechacen, de modo que hagan mover la parte giratoria, que es el rotor.

1.1.1 Motores de Corriente Directa

Los motores de corriente directa funcionan con corriente y voltaje que son constantes en el tiempo, estos se inventaron antes que la corriente alterna, compuesto básicamente por estator y el rotor.

“Se pueden utilizar tanto para aplicaciones de baja y alta potencia. Sin embargo, debido a su alto costo y la necesidad de piezas de repuesto, normalmente sólo se utilizan para alimentar dispositivos que requieren una entrada de potencia variable” (Motorex, 2019). Posee ventajas como limpieza, comodidad y seguridad en el funcionamiento; se considera que ha reemplazado otras fuentes de energía tanto en industrias, como en el hogar.

1.1.2 Motores de Corriente Alterna

El motor de corriente alterna es el más utilizado, a diferencia del de corriente directa, trabaja con voltajes cuya magnitud y dirección varía por cada fase. Se clasifican en motores asíncronos (o de inducción) y motores síncronos.

En los síncronos el eje gira con el campo magnético a una misma velocidad, por otro lado, en los asíncronos el eje se revoluciona a una velocidad poco menor a la del campo magnético, basan su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, debido a la circulación de corriente alterna por los devanados trifásicos y la influencia de los polos magnéticos del estator. (Universidad Tecnológica de Panama, 2007, p. 6)

1.1.3 Motores de Inducción

Los motores asíncronicos de corriente alterna producen la torsión del rotor al inducir electromagnéticamente el campo magnético de la bobina del estator. (canalMOTOR, 2020).

La característica principal que diferencia al motor de inducción de las demás máquinas eléctricas es que las corrientes del bobinado secundario son creadas únicamente, como su nombre lo dice, por inducción. En el resto de los motores esta corriente es creada por excitación directa por una fuente de CD u otra fuente de energía externa. Este motor tiene dos tipos de rotor: rotor de “jaula de ardilla” y rotor “devanado”. Los motores de rotor devanado presentan problemas de mantenimiento similares a los motores de corriente directa, debido a que también utilizan escobillas y anillos rozantes.

En la fig.1 se observa la construcción de un motor de Inducción.

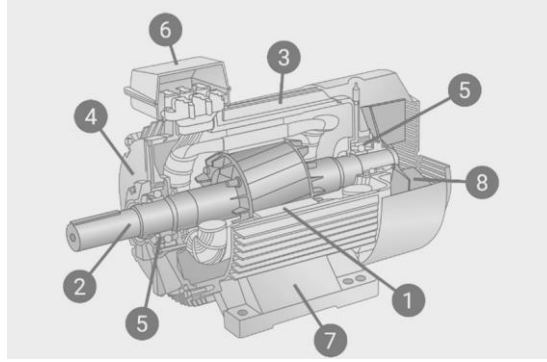


Fig 1. Partes principales de un motor eléctrico de inducción con rotor de jaula de ardilla.
Fuente: (Vandelvira, 2011)

1. Estator
2. Rotor
3. Carcasa
4. Cajeras de rodamientos o tapas
5. Rodamientos
6. Caja de conexiones
7. Base soporte
8. Ventilador de enfriamiento

Los motores con rotor de jaula de ardilla son los más utilizados.

Funciona como un transformador de voltaje (por inducción), cuando los devanados del estator se conectan a una fuente de tensión variable en el tiempo se genera un campo magnético rotatorio, este campo induce corrientes en los devanados del rotor, las cuales generan un campo magnético rotatorio (campo magnético del rotor). La sumatoria del campo magnético del rotor y del estator produce una fuerza neta, generando así un torque que produce el movimiento del rotor. Para que sea un motor asíncrono, la velocidad del campo magnético en el rotor debe ser menor que la velocidad del campo magnético en el estator. (RODRÍGUEZ, 2016).

1.2 Arranque de los Motores de Inducción

El procedimiento de puesta en marcha de una máquina eléctrica se conoce como arranque. Para que esta operación se lleve a cabo en un motor asíncrono, el par de arranque debe ser mayor que el par resistente de la carga. Al hacerlo se obtiene un momento de aceleración, que hace que el rotor gire a una velocidad cada vez mayor hasta llegar al régimen permanente, que es cuando los pares del motor y de la resistencia se igualan. (Fraile, 2016).

Según García (2021) “se caracteriza porque la rotación del rotor no se corresponde con la velocidad rotación del campo magnético producido por el estator”, el motor asincrónico se denomina así porque siempre opera a una velocidad un poco más lenta que la velocidad síncrona.

Cuando no funcionan al 100% de la velocidad, los motores de inducción pueden superar fácilmente su par y corrientes nominales. Las curvas de par-velocidad demuestran este comportamiento transitorio, y la Fig. 2 muestra una curva típica par-velocidad para motores de inducción con puntos significativos designados. (Cavallo, 2020)

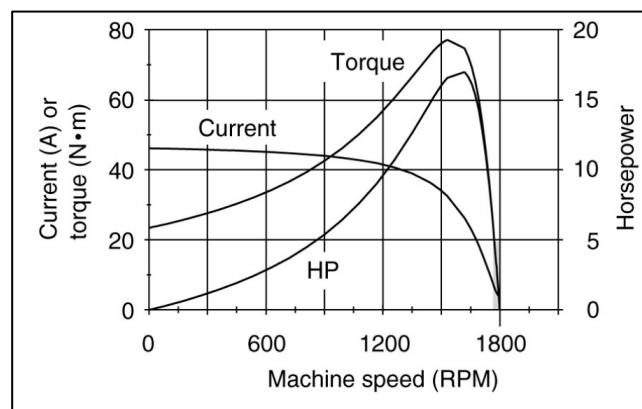


Fig 2. Curva característica par-velocidad de un motor de inducción típico.
Fuente: (Electrical Academia, 2020)

1.3 Técnicas de Arranque de Motores de Inducción.

El arranque de los motores de inducción se puede poner en marcha con tan solo conectarlos a la red de distribución de energía eléctrica de tres fases. Sin embargo, Chapman (2012), asegura que en algunos otros hay muy buenas razones para no hacerlo de esta manera ya que la corriente de arranque que se requiere puede causar una caída en el voltaje del sistema de potencia, por lo cual no es aceptable el arranque a través de la línea. Al agregar una segunda resistencia al circuito del rotor durante el arranque los motores de inducción de rotor bobinado pueden arrancar solo con corrientes moderadas.

Al arrancar un motor de inducción de jaula de ardilla, la corriente inicial puede variar mucho, pero la resistencia adicional no solo aumenta el par de arranque, sino que también lo disminuye. Estos ajustes dependen de la potencia nominal del motor y de la eficacia de la resistencia del rotor durante condiciones iniciales de arranque. En la placa de identificación de los motores de jaula, hay una letra código de arranque que se usa para calcular la corriente del rotor durante condiciones de arranque. La corriente máxima permitida del motor en circunstancias de arranque se indica mediante esta letra de código. La potencia aparente del motor en función de la potencia nominal se utiliza para expresar estos límites.

1.3.1 Arranque a Plena Tensión

El método de arranque más sencillo es el arranque tensión plena o directo que consiste en conectar el motor directamente a una red a su tensión y frecuencias nominales; es el más económico porque solo necesita equipo de maniobra y protección, y el motor desarrolla su par completo (torque), que típicamente es 1 a 2.5 veces el nominal (Araya, 2017).

“Como resultado de esta aplicación obtendremos altas corrientes de arranque (corriente de sobrecarga) que a su vez causan molestas caídas en la tensión de red. Por este motivo, las compañías eléctricas suelen limitar la potencia nominal de los motores conectados a la red. Este valor límite puede

variar de una red a otra. En redes eléctricas públicas, estas limitaciones por lo general se cumplen cuando en el arranque la potencia aparente del motor trifásico no excede de 5.2 KVA o cuando es de mayor potencia aparente pero la corriente de arranque no excede de 60 A. Con una tensión de red de 400 V y un arranque 8 veces la intensidad nominal, esto corresponde a un motor con una intensidad nominal de 7.5 A o un motor de 4 kW” (Eaton, 2017, pág. 5).

Las curvas de corriente y par al momento de nacer un arranque directo en línea a un motor de inducción se muestran en la fig.3.

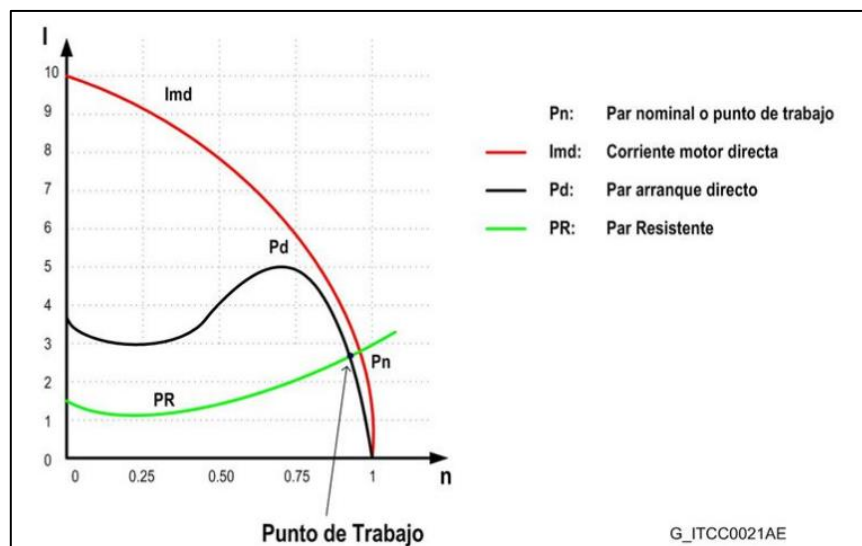


Fig 3. Curvas de corriente/velocidad y par/velocidad del arranque directo
Fuente: (Power Electronics, 2006)

A pesar de las ventajas que conlleva la sencillez del equipo, elevado par de arranque, arranque rápido y bajo costo, sólo es posible utilizar el arranque directo en los siguientes casos:

- La potencia del motor es débil con respecto a la de la red, para limitar las perturbaciones que provoca la corriente requerida.
- La máquina accionada no requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo mecánico como por ejemplo un reductor que impide el arranque brusco.

- El par de arranque debe ser elevado. Por el contrario, siempre que:
- La caída de tensión provocada por la corriente requerida pueda perturbar el buen funcionamiento de otros aparatos conectados a la misma línea.
- La máquina accionada no pueda admitir sacudidas mecánicas.
- La seguridad o la comodidad de los usuarios se vea comprometida

Según Araya (2017), de no existir el problema de que la carga conectada al motor no admita aceleraciones bruscas; y que la caída de tensión producida por la corriente de arranque supere el valor admitido por otros usuarios o equipamiento conectados a la misma red de alimentación. La reglamentación de la Asociación Electrotécnica Argentina AEA, establece que esa caída de tensión no debe superar el 15% de la tensión nominal de la red. La caída de tensión que se produce en la red depende de la capacidad de esta, es decir de su impedancia serie o, en otras palabras, de su potencia de cortocircuito sin duda el arranque más indicado será el directo; en caso contrario habrá que emplear algún arranque a tensión reducida.

1.3.2 Arranque por Autotransformador a Tensión Reducida (ATR)

Este método de arranque consiste en alimentar un motor con bajo voltaje a través de un autotransformador, lo que hace que los voltajes subsiguientes aplicados a los terminales del motor aumentan durante el transcurso del periodo de arranque hasta alcanzar los voltajes de línea nominales.

Otro autor ha afirmado lo siguiente:

El proceso puede realizarse en dos o tres escalones y con tensiones no inferiores al 40, 60 y 75 por 100 de la tensión de la línea. En la posición 1 del conmutador se alimenta el autotransformador con la tensión de la red, aplicando al motor solamente una fracción de esta

tensión de la red (etapa de arranque). Cuando la máquina ha aumentado su velocidad hasta un valor adecuado, cercano al asignado, el conmutador se pasa a la posición 2, lo que eleva la tensión que llega al motor y éste sigue aumentando de velocidad. Finalmente se pasa el conmutador a la posición 3, de tal forma que la tensión de la red queda aplicada directamente al estátor del motor. (Fraile, 2016, pág. 353)

En la fig. 4 se observa el esquema eléctrico del arranque mediante tensión reducida

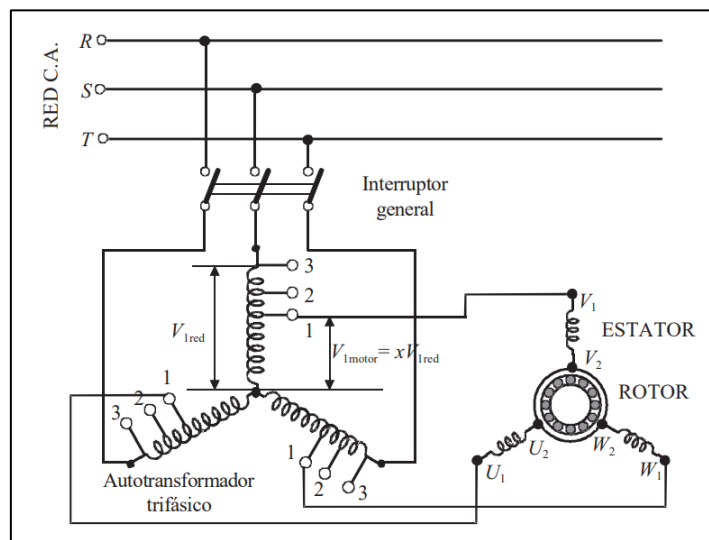


Fig 4. Esquema eléctrico del arranque con autotransformador.
Fuente: (Fraile, 2016)

A medida que arranca un motor por autotransformador, la corriente en el motor disminuye en proporción inversa a la relación de transformación del autotransformador, y la corriente en la línea de red que alimenta al motor disminuye en proporción inversa al cuadrado de la misma relación de transformación. (Gómez, Ascanio, Dulcey, Laguado, & Rincón, 2020)

En la fig.5 se observa la curva de par velocidad por arranque de autotransformador.

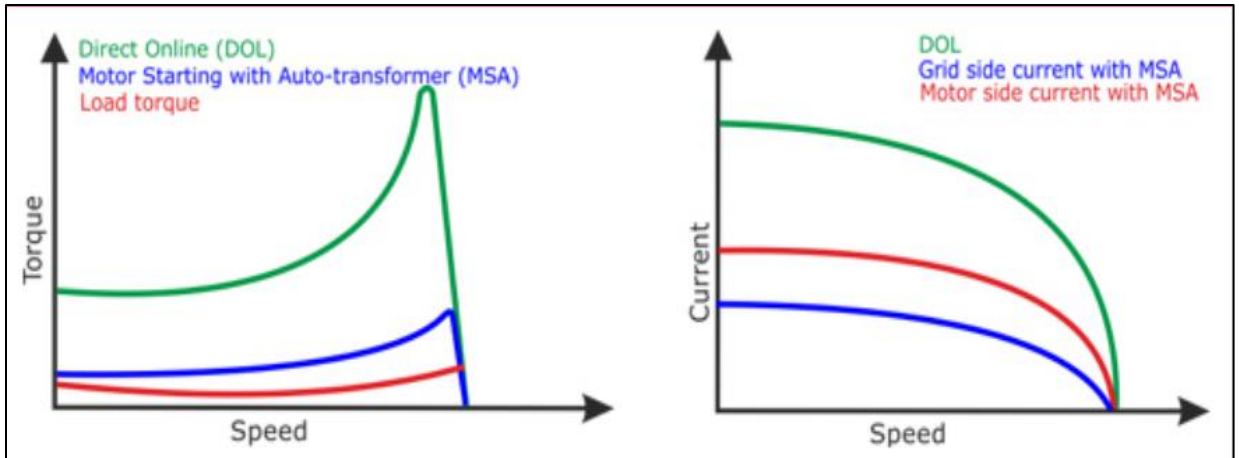


Fig 5. Curva de velocidad y par/corriente del arranque por autotransformador
Fuente: (hilkar, 2020)

1.3.3 Arranque por Resistencia en Serie.

El principio consiste en arrancar el motor con un voltaje reducido mediante la adición de resistencias en serie con los devanados del estator y una vez se haya estabilizado la velocidad, el motor se conecta a la red eliminando las resistencias.

Una forma de limitar la intensidad de arranque es acoplando resistencias en serie con la línea de alimentación al estator, una vez arrancado retiraremos las resistencias puenteándolas mediante un contactor. Las resistencias deberán ser resistencias de potencia para que sean capaces de resistir el calentamiento que se producirá. (Automatismo Industrial, 2019)

Se calcula el valor de la resistencia con la siguiente expresión: $R = 0,055 \times (U_n/I_n)$, donde:

- R Resistencia por fase en Ohmios.
- U Tensión de la red en voltios.
- I_n Intensidad nominal del motor en A.

“A la hora de calcular las resistencias se tendrá en cuenta el número de arranques por hora y el tiempo de arranque. Normalmente se calcula la resistencia para 5 arranques por hora y 8 segundos de tiempo arranque” (Automatismo Industrial, 2019).

La intensidad media de arranque tendrá un valor de $I_{med} = 4,5 I_n$ y el par de arranque se reducirá por debajo de la mitad de $[I]$ para de arranque en conexión directa. Una ventaja con respecto al arranque estrella-triángulo es que no se van a producir cortes de tensión en el momento de eliminar las resistencias estáticas. (Automatismo Industrial, 2019)

El voltaje entregado a los terminales del motor durante la fase de aceleración asistida por resistencias es variable. Es igual al voltaje de la red menos la caída de voltaje a través de la resistencia inicial; La caída de voltaje varía según la cantidad de corriente que el motor consume. La caída de voltaje en la resistencia ocurre porque la corriente disminuye a medida que aumenta la velocidad del motor. Como resultado, cuando el motor es puesto en marcha, hay poco voltaje aplicado a los terminales del motor y aumenta gradualmente.

En la Fig.6 se muestra las curvas de corriente y par con respecto a la velocidad por este método.

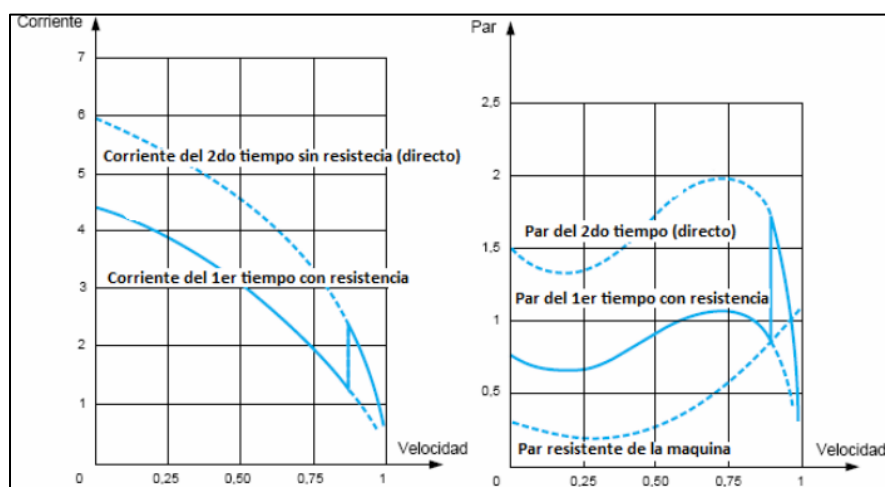


Fig 6. Curvas de corriente/velocidad y par/velocidad del arranque por resistencia en el estator.

Fuente: (Vandelvira, 2011)

Su inconveniente consiste en que la punta de corriente es relativamente importante durante el arranque. Sería posible reducirla mediante el aumento del valor de la resistencia, pero esta medida conllevaría una caída de tensión adicional en las bornes del motor y, por tanto, una considerable reducción del par de arranque. Por el contrario, la eliminación de la resistencia al finalizar el arranque se lleva a cabo sin interrumpir la alimentación del motor y, por tanto, sin fenómenos transitorios. (Calderón, 2011)

1.3.4 Arranque Estrella-Delta.

Los dos extremos de cada uno de los tres devanados del estator regresan a la placa terminal a través de los terminales del motor o el cuadrado de conexión, respectivamente, durante la fase inicial. Por otro lado, el devanado debe hacerse de una manera que el acoplamiento delta coincida con el voltaje de la red; por ejemplo, un motor a 380[V] debe usarse en una red trifásica con un voltaje de 380[V]. (Fraile, 2016)

Este método solamente se puede utilizar en aquellos motores que estén preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red. La máquina se conecta en estrella en el momento del arranque y se pasa después a triángulo cuando está en funcionamiento. La operación se realiza en la actualidad con automatismo de contactores, con un circuito de fuerza y otro de mando o control; se requieren tres contactores: uno, denominado principal, para la alimentación de los principios de bobina de los devanados del motor; otro contactor se encarga de realizar la conexión del devanado en estrella, y el tercero ejecuta la conexión triángulo; además se necesita un relé de tiempo para ajustar el momento en que se pasa de la conexión estrella a la conexión triángulo. (Fraile, 2016, p. 355)

En la Fig. 7 se muestra el esquema de conexión del arranque estrella-triángulo.

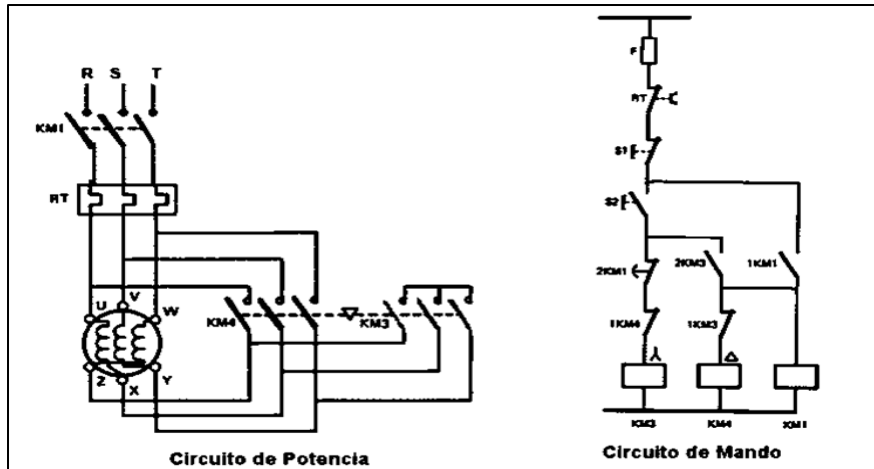


Fig 7. Circuito de potencia y mando arranque estrella delta
Fuente: (Uranga, 2018)

Cuando el par motor y el par resistivo se equilibran, la velocidad del motor se estabiliza, generalmente entre el 75 y el 85 por ciento de su velocidad nominal. El motor funciona como lo haría naturalmente en este punto porque los devanados están acoplados en delta. El cambio entre acoplamiento estrella delta están gestionado por un temporizador. Dado que ninguno de los contactores puede cerrarse al mismo tiempo, se evita un cortocircuito entre fases si el contactor delta se cierra entre 30 y 50 milisegundos después de que se abre el contactor estrella. (Calderón, 2011)

El motor arranca en la configuración de estrella y luego se transfiere a la configuración delta, lo que permite que se aplique el voltaje total al motor durante su funcionamiento para obtener el par de salida completo. Además, puede explicarse que en un arrancador Estrella-Delta, el motor comienza como conexión en estrella y cuando el motor comienza a funcionar, la conexión se cambia a delta. Con conexión en estrella, el motor toma $\sqrt{3}$ veces menos voltaje. Sin embargo, como el par es proporcional al cuadrado de la tensión, el par de arranque también se reduce. (Goh, Looi, & Kok, 2009)

La figura 8 muestra el hueco de tensión en el arranque estrella-triángulo.

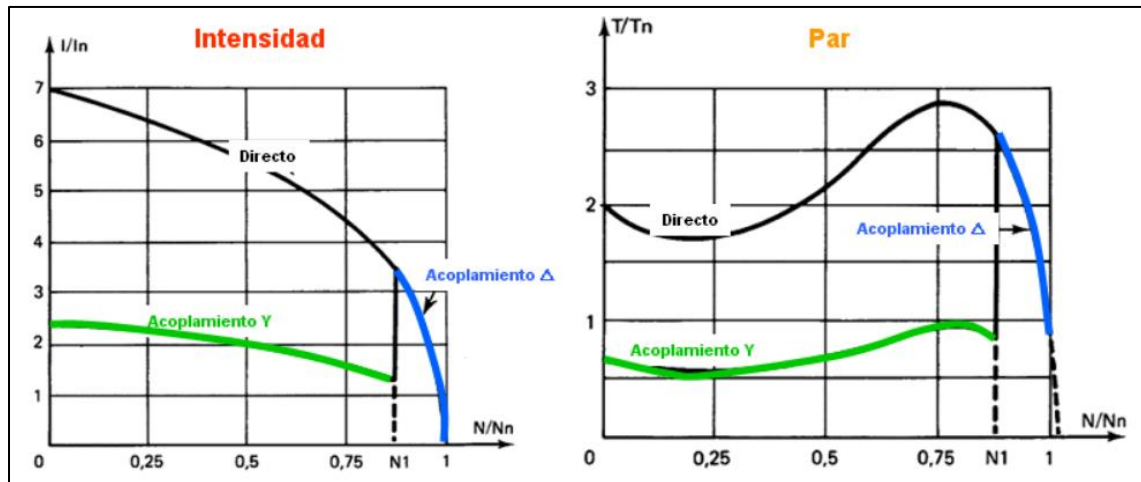


Fig 8. Curva de corriente velocidad y par velocidad del arranque estrella-Triangulo.
Fuente: (Tuveras.com, s.f.)

Este evento ocurre durante la transición de la conexión estrella a la conexión Delta. Durante el momento de transición, el contactor cambia y hace que el voltaje baje, durante aproximadamente 0,25 segundos y esto es suficiente para causar la caída de tensión en el arranque del motor. Sin embargo, este no es un problema significativo que afecte la aceleración y el par de arranque del motor. Una vez se establece la conexión a delta, el motor acelerará hasta su velocidad nominal y, por tanto, la tensión y las corrientes de onda estarían de manera estable. (Goh, Looi, & Kok, 2009)

1.3.5 Método de Arranque Suave (Soft-Start)

Los avances en la electrónica permitieron la creación del arrancador electrónico (arrancador suave). También aplicando disminución de la tensión, estos arrancadores reducen la corriente y el momento a rotor bloqueado. Los arrancadores suaves, además, pueden desacelerar la máquina hasta el reposo. El equipo emplea configuración de dos tiristores en antiparalelo (back to back) funciona como interruptores de estado sólido que están encendidos por una parte de cada ciclo, mediante el control de

ángulo por PWM (Pulse Width Modulation) de cada par de tiristores que es controlado para aplicar una tensión variable a los terminales del motor durante la aceleración y desaceleración. (Viego, Gómez, & Sousa, 2017)

En la Fig.9 se muestra un esquema básico del circuito de un arrancador suave. En Gómez (2017) Al final del período de arranque, la tensión alcanza su valor máximo luego de la aceleración suave o rampa ascendente (normalmente ajustable en cuanto a su duración), en vez de ser sometido a incrementos o saltos repentinos, como ocurre con los métodos de arranque convencionales.

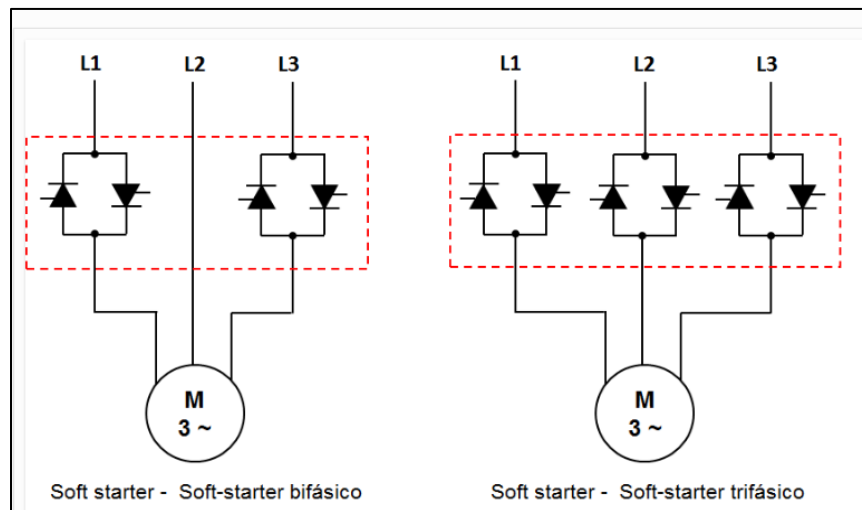


Fig 9. Esquema básico de un arrancador suave
Fuente: (Learnchannel-TV, 2019)

Otra importante ventaja de los arrancadores suaves es que la tensión media puede ser modificada para adaptarse a las condiciones iniciales, variando el ángulo de conducción de los tiristores el voltaje de salida puede ser aumentado o disminuido, se logra fácilmente gracias a la electrónica control que puede ser programada para proporcionar un voltaje de salida sobre la base de una secuencia de tiempo, esto es

un circuito abierto, también puede ser un circuito cerrado; controlando el voltaje de salida basado en mediciones de características como velocidad y corriente. (Echevería & Villanueva, 2008)

1.4 SCR (Rectificador Controlado de Silicio)

Los SCR son dispositivos de mucha importancia en el mundo de la electrónica de potencia que se comporta como un regulador de señal sinusoidal y lo podemos utilizar dependiendo el tipo de aplicación que como usuario necesitemos desde iluminación hasta sistemas de aspersión, pasando por los famosos cargadores de baterías que sin duda son importantes en la fabricación de estos artefactos. (SENSORICX, 2020).

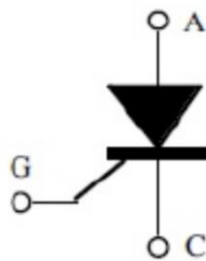


Fig 10. Rectificador Controlado de Silicio (SCR)
Fuente: Autor

La unión de dos SCR unidireccionales, crean un TRIAC (Transistor de corriente alterna), que ayuda a cortar la onda senoidal del lado positivo y negativo cada medio ciclo, que proporciona la información de los pulsos.

CAPÍTULO 2

Diseño del prototipo del módulo de arrancador suave para motores trifásicos.

En este capítulo se realiza un análisis de los diferentes elementos de electrónica de potencia que conforman el módulo del arrancador suave, la metodología que se utilizó para la selección de los materiales para la etapa de potencia y control con la finalidad de que cumplan con criterios técnicos óptimos de los objetivos del capítulo.

2.1 Metodología

Para el diseño del proyecto, con base en el segundo objetivo específico, se desarrollaron los siguientes pasos:

- Se analizó los elementos electrónicos para el módulo del arrancador, esto para que el diseño esté acorde a los requerimientos técnicos.
- Para la distribución de los componentes en el módulo de pruebas se realizó los diseños, en el software AUTOCAD, obteniendo una vista previa de la estructura o chasis del arrancador suave a ser implementado.
- Para la simulación eléctrica, en la etapa de control se utilizó el software de Multisim, la cual permitió visualizar a detalle el esquema de conexión de los elementos electrónicos, sin embargo, no contaba con los componentes del mercado, por lo que la etapa de potencia está simulada en el software de Matlab-Simulink.
- Se realizó la lista de componentes para la adquisición de los elementos, los cuales trabajarán a un 75% de su capacidad, debido a que los elementos tienden a sobrecalentarse al conmutarlos.

Como resultado se obtiene el diseño de los circuitos del módulo previamente simulado, evitando así los posibles riesgos en la implementación, y puede asegurar hasta los detalles más pequeños, como la corriente, tensión aplicada, tiempos de accionamiento, entre otros. (Autycom, 2021)

2.1.1 Requerimientos Técnicos del Módulo del Arrancador suave.

En la Tabla 1 se detalla los requerimientos técnicos del módulo del arrancador suave, el arrancador será utilizado para motores trifásicos de hasta 15HP y debe ser de fácil manipulación por parte del usuario.

Tabla 1. REQUERIMIENTOS TECNICOS DE DISEÑO				
N°	Característica Técnica	PRIORIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
1	Selección de motores de diferentes potencias de 0.5HP a 15HP	X		
2	Tiristores de Alta potencia		X	
3	Mediciones exactas del controlador de la red trifásica.	X		
4	Precisión en el ángulo de disparo	X		
5	Materiales según la necesidad del arrancador suave		X	
6	Diseño optimo del circuito	X		
7	Fácil manejo del usuario mediante pulsadores de control.		X	

Fuente: Autor

2.1.2 Requerimientos del Sistema

Los requerimientos del sistema permiten elaborar el complemento electrónico del dispositivo e identificar los componentes necesarios para cumplir con las funciones deseadas.

La Tabla 2 presenta algunos requerimientos a tomar en cuenta para el diseño, implementación y uso del dispositivo.

Tabla 2.
REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

N°	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	PRIORIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
1	Utilización de comunicación serial.	X		
4	Manual de calibración.	X		
5	Manual de Mantenimiento.	X		
6	Datasheet de sensores.		X	
7	Extracción de datos almacenados.	X		
12	Conexiones de alimentación red trifásica.	X		
13	Medidas precisas y exactas en la detección de cruce por cero.	X		
15	Interferencias en la comunicación.		X	
16	Interfaz intuitiva	X		
17	Control de motor mediante tablero	X		

Fuente: Autor

2.1.3 Requerimientos de Estructura

La arquitectura del sistema permite conocer las limitaciones del software y del hardware para el dimensionamiento del módulo como también de los elementos de potencia, control que ayudaran a verificar su correcto funcionamiento antes de la implementación física de componentes dentro del módulo. Los requerimientos de la estructura se detallan en se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3.
REQUERIMIENTOS DE ESTRUCTURA

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA				
N°	REQUERIMIENTOS	PRIORIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
1	Software libre.	X		
2	Hardware de bajo costo.	X		
3	Compatibilidad de componentes	X		
4	Facilidad de programar.		X	
5	Compatibilidad con Arduino.	X		
6	Paquetes y librerías accesibles.		X	
7	Placa con microcontrolador y ADC.	X		
8	Recubrimientos de componentes.	X		
9	Ventilación de componentes.	X		
10	Estructura para montaje	X		
11	Protecciones eléctricas.	X		

Fuente: Autor

Las características técnicas mencionadas corresponden a un arrancador suave con óptimo desempeño, así como de transparencia para la comunicación con el usuario.

2.1.2 Especificación de Etapas

El arrancador suave controla motores mediante rampas de voltaje, reduciendo su corriente, con lo que genera un ahorro de energía, estos arrancadores internamente cuentan con una conexión correspondiente a la etapa de control, mediante un arreglo de Triac's conectan con la etapa de potencia. (Risoul, 2021)

El circuito de potencia, encargado de controlar el voltaje en un arreglo de Triac's conectados a las fases, donde se permite regular el voltaje de corriente alterna al cambiar el ángulo de disparo cada

medio ciclo. Así el voltaje aumenta de forma gradual hasta llegar a un voltaje nominal de acuerdo con la limitación de corriente.

La conexión del circuito de control cuenta con un tren de pulsos PWM, en el que se modifican el ángulo de disparo en la onda senoidal, para ello cuenta con un detector de cruce por cero para que el ángulo se iguale con el de la onda, el generador de pulsos fue realizado mediante el uso de un microcontrolador, enviando la señal a un optoacoplador encargado de enlazar la etapa de potencia con la de control.

En la Fig. 11 se muestra el diagrama de bloques del módulo de arranque con las etapas de potencia y control separadas mediante un acoplador, contando con una pantalla para la visualización de valores de selección en el arrancador.

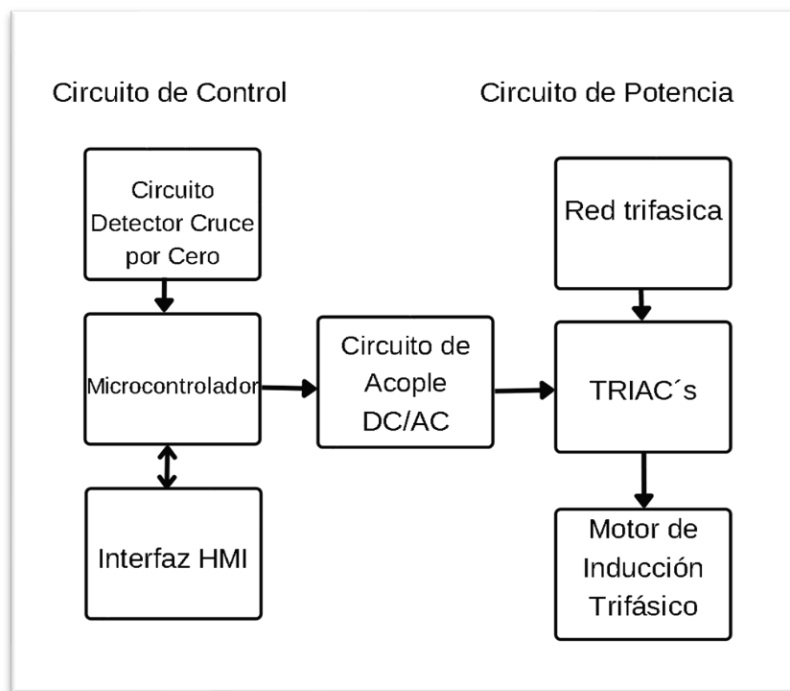


Fig 11. Diagrama de bloques del módulo arrancador suave
Fuente: Autor

En la selección de componentes, las características técnicas del arrancador presentados en la Tabla 1 deben ser consideradas para la adquisición de elementos, el arrancador debe de cumplir con

un diseño transparente y de fácil manipulación para el usuario, por lo que se tendrá en cuenta los aspectos como el costo, comunicación, diseño y software libre, velocidad de giro y dimensionamiento de los principales elementos para su correcto funcionamiento.

2.2 Circuito potencia

El motor que se utilizará debe contar con la conexión delta interna, para así reducir las corrientes en los circuitos semiconductores al momento de arranque, permitiendo reemplazar los SCR's de baja potencia en antiparalelo por un TRIAC de alta potencia, reduciendo costos de implementación.

2.2.1 Selección de Triac (Transistor de corriente alterna)

Para la selección del Triac se toma en cuenta las corrientes y voltajes en el motor para poder seleccionarlo dentro de los parámetros ya antes mencionados para los motores trifásicos con potencias mecánicas de 0.5 HP a 15 HP de potencia, en la Tabla 4 se presenta las corrientes más usuales dentro del rango de potencias.

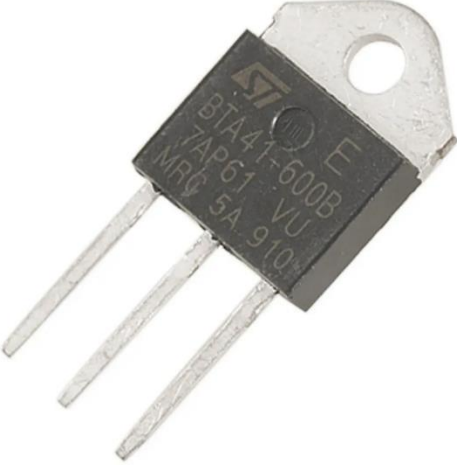
VALORES USUALES DE INTENSIDAD DE UN MOTOR A PLENA CARGA													
otencia del motor	W	.37	.55	.75	.1	.5	.2			.5	.5	1	5
	p	.5	.75		.5				.5	.5	0	5	0
ensi3n	20v		.5	.5		.5	.5	1	5	2	8	2	4
	0hz												
e fase	00v		.5		.5	.5		.5	.5	1	5	2	9
	0Hz												
e la red	40v	.9	.4	.7	.4	.2	.5			1	4	0	7
	0Hz												

Fuente: (CPI, 2018)

Según las corrientes del motor a plena carga (Tabla2), el Triac debe cumplir con un rango de corriente de hasta 40 A y un límite de voltaje de hasta 440v, por lo cual se seleccionó el Triac que permita manejar grandes potencias y fácil configuración de su conexión.

En la Tabla 5 se muestra las características técnicas del Triac BTA41600 y en la figura se muestra su encapsulado.

Tabla 5.
CARACTERÍSTICAS TRIAC BT41600B

Característica	Valor	Imagen Referencial
Tensión máxima de apagado repetitiva, Vdrm	600 [V]	
Corriente RMS de encendido IT(rms)	41 [A]	
Corriente de trigger de la compuerta máxima, Igt	100[mA]	
Corriente de trigger de la compuerta máxima, Vgt	1.3[V]	
Potencia de pico de la compuerta	1 [W]	
Corriente máxima transitoria	400 [A]	
Corriente máxima de retención	80[mA]	
Temperatura de operación mínima	-40[°C]	
Temperatura de operación máxima	125 [°C]	

Fuente: (Visitronica, 2020)

2.2.3 Detector de Cruce por Cero

En la Fig. 2 se muestra la conexión para detectar el cruce por cero de la red trifásica, con la que se monitoreará la señal de corriente alterna y mandará una serie de pulsos al microcontrolador a través de la interrupción externa.

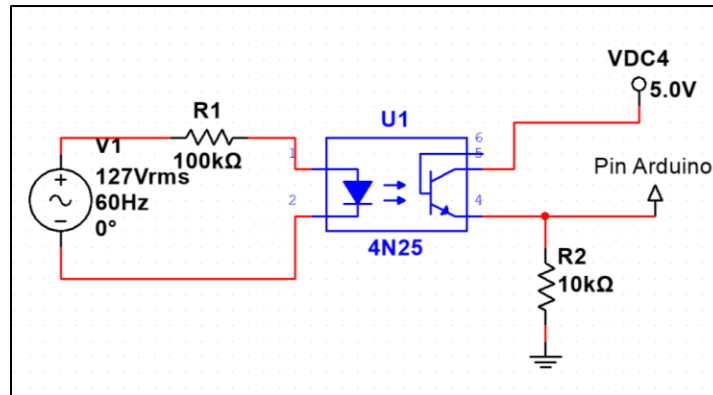


Fig 12. Detector de Cruce por Cero
Fuente: Autor

2.3 Circuito de Control

El circuito de control está conformado por el microcontrolador, la pantalla de cristal líquida (LCD), los circuitos de pulsadores, el optoacoplador encargado de unir la parte de control con la de potencia y la fuente de alimentación DC.

2.3.1 Microcontroladores

Para la selección del controlador para el sistema embebido se analizó diferentes opciones de dispositivos programables en el mercado, considerando que el dispositivo debe poseer salidas PWM, software amigable, capacidad de soportar frecuencias altas, para lo cual se presenta la Tabla 4 con diferentes controladores y sus características.

Tabla 6.
MICROCONTROLADORES EN EL MERCADO

Controlador	Modelo	Tensión (V)	Frecuencia (MHz)	Memoria Flash (Kb)	Memoria RAM (Kb)	Salidas Pwm	Precio \$
Arduino	Uno	5v	160	16	2	6	1.2
	Pro Mini	5v	160	16	2	6	0.5
	Due	5v	160	512	512	12	1.5
	Mega	5v	160	256	8	15	2.7
Raspberry	Zero	5v	100	16	1	1	0.4
	1B	5v	100	16	128	2	0.9
	2B	5v	100	16	1	3	1.9
	3B	5v	140	16	1	19	2.9
	3B+	5v	140	16	1	19	2.9
	4B	5v	300	16	1	2	4.2
	4B+	5v	300	16	1	2	4.2
ATTIN	Y85	5v	19	2	8	1	0.9
PIC	16F628	5v	50	4	-	1	0.1
	16F628	5v	50	4	-	1	0.1
	16F84	5v	180	8	-	1	0.1
	16F84	5v	180	8	-	1	0.1
PIC	16F84	5v	180	8	-	1	0.1
	16F84	5v	180	8	-	1	0.1

Fuente: (Teja, 2021), (Unit Electronics, 2020), (Tan, 2021), (Rodriguez, 2019)

Con las características de varios de los controladores señalados en la tabla 2, se obtienen las características deseadas para el controlador, en función de las necesidades y costos accesibles, se observa que se tiene las tecnologías como Arduino y ATtiny 85 que son accesibles en temas de costos, y un rango de voltajes de entrada para su alimentación que concuerda con los requerimientos del sistema, así como la disponibilidad de pines PWM para el control del ángulo de disparo, así como la velocidad de procesamiento.

Se opta por Arduino Mega, con 15 salidas PWM y conecta diferentes entradas analógicas para configurar los ángulos de disparo, además de las características técnicas de la tabla 1, ya que es de acceso libre, flexibilidad para la conexión y programación que configurará el módulo del arrancador.

2.3.2 Pantalla LCD

Con la intención de que el usuario obtenga datos del arranque, se implementa al módulo los valores del tiempo y ángulo de arranque, por lo que se visualizaron en una pantalla LCD con dichos valores.

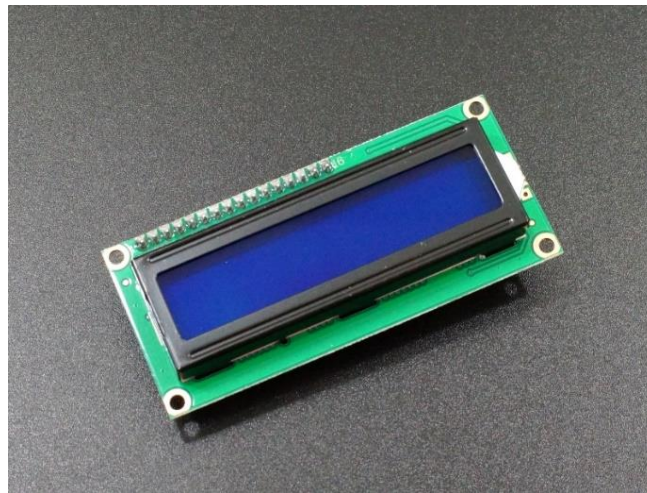


Fig 13. pantalla LCD 16X2
Fuente: Autor

Tabla 7.
PINOUT PANTALLA LCD 16X2

Número pin	Símbolo	Función
1	VSS	Tierra (Ground)
2	VDD	5v +
3	V0	Broche de contraste
4	RS	Registro
5	RW	Leer o Escribir
6	E	Activar o no pantalla (Enable)
7	D0	Data pin
8	D1	Data pin
9	D2	Data pin
10	D3	Data pin
11	D4	Data pin
12	D5	Data pin
13	D6	Data pin
14	D7	Data pin
15	A	Ánodo(5v+)
16	K	Cátodo (GND)

Fuente: (Lozano,2020)

Con el fin de reducir pines de la pantalla LCD se realizó la comunicación serial mediante el módulo I2C, como se observa en la Fig.14, la comunicación entre el Arduino y la Pantalla LCD se realiza a través de los 2 pines de comunicación y así el circuito se vuelve bastante sencillo. Para que el código de programación siga siendo corto se utilizara las librerías externas `<Wire.h>` y `<LiquidCrystal_I2C.h>`. (García, 2020)

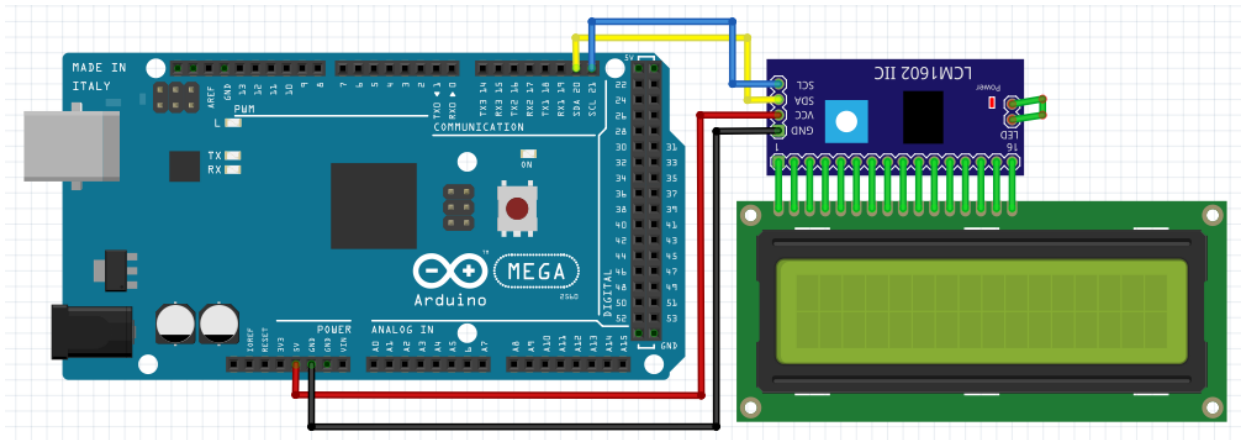


Fig 14. Conexión pantalla LCD 16x2 en Arduino
Fuente: (Latorres, 2023)

2.3.2 Optoacoplador

El optoacoplador cumple la función de unir el circuito de control con el de potencia, se optó por este método ya que no presenta desgastes mecánicos, como lo haría un relé, para lo cual se utilizó un optotriac MOC3021 que se acopla a la compuerta del Gate del Triac Bt4160, cuenta con las siguientes características:

- Corriente de disparo de led a Triac IFT0= 10[mA]- 15[mA]
- Voltaje de aislamiento Viso =750[V]
- Corriente de compuerta IGt= 50[mA] a 100[mA]
- Voltaje inverso de Led Max=6 [V]
- Corriente de led en directo max= 50 [mA]

En la Fig. 5 se presenta el circuito con la conexión del pulso de disparo del circuito de control al de potencia mediante el MOC3021 y el Triac.

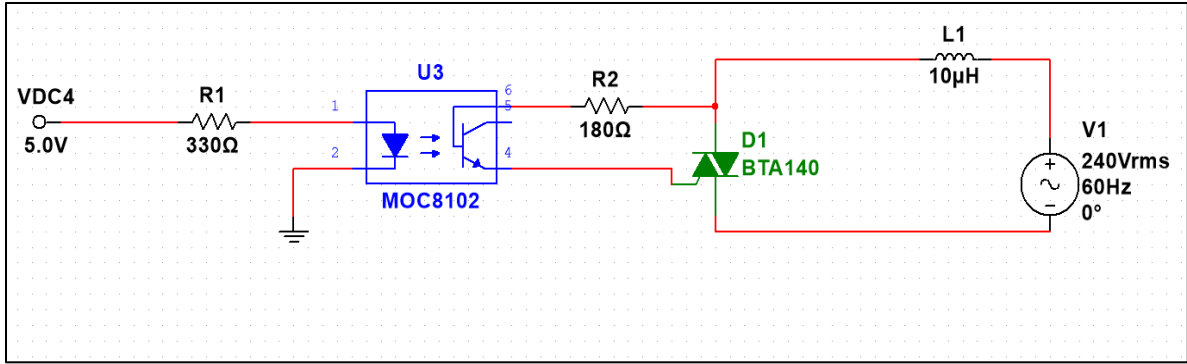


Fig 15. Circuito de opto acoplamiento MOC3021
Fuente: Autor

Para el cálculo de la R1 de la Fig. 15 se toma en consideración el voltaje de señal de salida del microcontrolador es de 5 [V] (Vcc) y la del led interno del MOC3021, por lo que se aplicó la Ecuación (1) para el cálculo de su resistencia.

- Voltaje de salida = 5 [V]
- Voltaje de led interno= 1.2 [V]
- Corriente de disparo led=10 [mA]

$$R1 = \frac{\text{Voltaje Salida} - \text{Voltaje Led}}{\text{Corriente de Disparo led}} = \frac{Vc - Vf}{If} \quad (1)$$

$$R1 = \frac{5v - 1.2v}{10mA} = 380[\Omega]$$

El valor calculado para la resistencia 1 se obtuvo con la corriente mínima de activación del led del optoacoplador, se seleccionó una resistencia de 330 [Ω] para que el valor de la corriente alcance en parte al valor limite especificado.

Para el cálculo de la R2 de la figura x, se calcula el valor pico de la corriente, se considera el valor del voltaje de alimentación RMS de la fuente obteniéndose en la Ecuación (2).

$$V_{RMS} = 127 * \sqrt{3} = 220 [V] \quad (2)$$

La activación del triac se hace en la compuerta del Gate, esta activación se hará por pulsos que ingresaran por la compuerta, el valor pico de la corriente máxima en el triac que puede soportar es de 8A, este valor debe estar en coordinación con el valor de la corriente máxima que puede soportar el

optoacoplador en la salida correspondiente que es de un valor pico de 1.2 A; por lo que se asume será de 250mA(Ig). Aplicando la Ecuación 3 se determina el valor de R2.

$$R1 = \frac{V_{rms}}{I_G} \quad (3)$$

$$R1 = \frac{220 [v]}{250mA} = 880 [\Omega]$$

Por resistencias comerciales se elige una resistencia superior de 1 [KΩ].

2.3.3 Fuente de Alimentación

Dentro del módulo es necesario alimentar el microcontrolador con una fuente de voltaje DC, por lo que se optó por una mini fuente de voltaje AC/DC de 110/220 [V] a 5[V], que alimentó a los circuitos con corriente continua.



Fig 16. Mini Módulo de Fuente de Alimentación
Fuente: (Ebay, 2021)

2.4 Esquema General de Conexiones

En la Fig.17 permite la visualización general del esquema de conexiones, donde se presentan hacia donde se dirige la transmisión y recepción de datos para accionar un arranque.

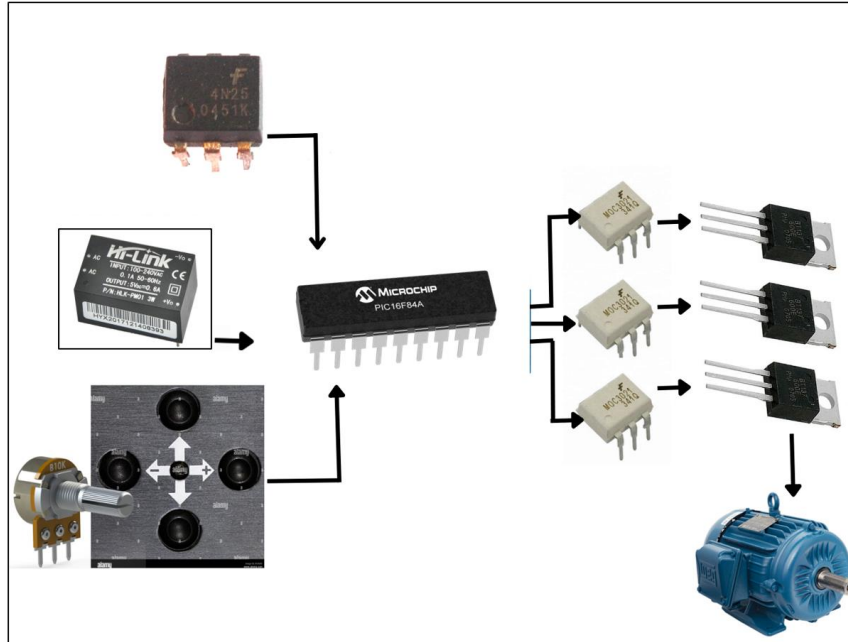


Fig 17. Esquema general de conexiones
Fuente: Autor

Mediante el software Multisim se simula la conexión de los elementos electrónicos de la parte de Potencia a la red trifásica, que adicionalmente también proporciona una visualización de los elementos en una placa PCB para su posterior implementación dentro del módulo. En la Fig.18 se observa la conexión a la red.

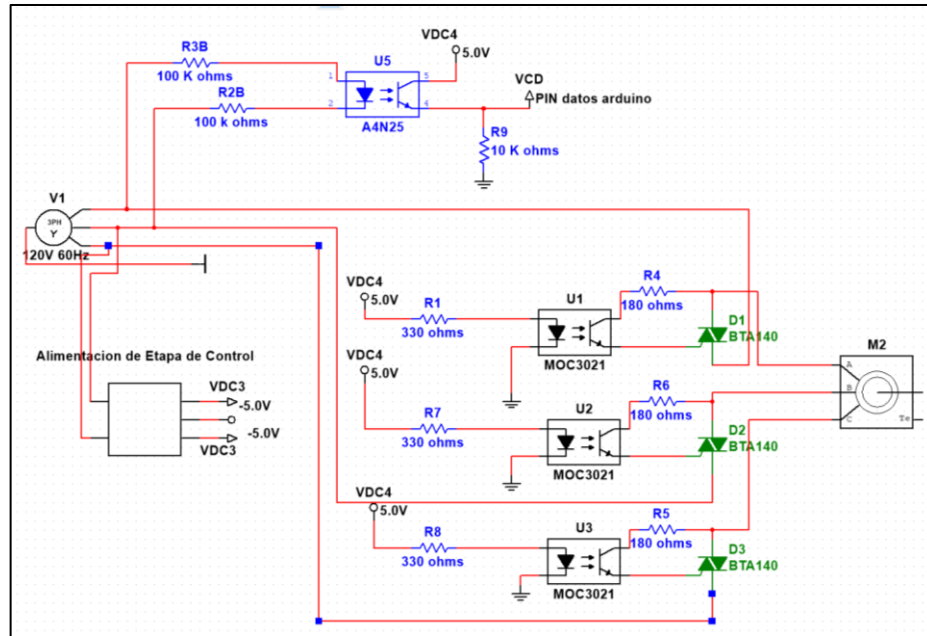


Fig 18. Simulación de conexión elementos de potencia en Multisim
Fuente: Autor

2.5 Funcionamiento del sistema

El Módulo está comprendido de 4 etapas de funcionamiento donde intervienen los circuitos previamente diseñados, estas fases ayudan con la descripción de funcionamiento y los procesos que cumplen en cada etapa, con la finalidad de cumplir con los objetivos del capítulo.

2.5.1 Primera Etapa

La primera etapa consiste en la adquisición de los cruces por cero provenientes de la red trifásica mediante un circuito detector 4N25 y el microcontrolador. El módulo obtiene las mediciones de las fases, y envía los datos hacia el microcontrolador. En esta etapa intervienen los siguientes componentes:

- Microcontrolador Atmega2560

- Circuito detector de cruce por cero (Optoacoplador 4N25)
- Red trifásica

Una vez el sistema ha sido puesto en marcha se realiza un censo de las variables de entrada para alcanzar el ángulo de disparo con la de la fase.

2.5.2 Segunda Etapa

Se realiza un censo de la variable de cruce por cero de una de las fases de la red, una vez identificada el cruce se procede mediante el microcontrolador a realizar una rampa de voltaje con la cual elevara el voltaje paulatinamente para el motor en un rango de 2milisegundos para los motores, para lo que previamente se seleccionan mediante los pulsadores su dirección de giro para el arranque.

En esta etapa intervienen:

- Pulsadores
- Optoacoplador
- PIC 16F84A

2.5.3 Tercera Etapa

Transmisión de pulsos PWM, una vez identificado el cruce por cero de una de las líneas de la red se procede a censar para sincronizarla con el disparo programado en el PIC16F84A, una vez iniciado el motor en uno de sus giros se procede a realizar una arranque en un tiempo de 20 ms, en caso de requerir el cambio de giro se espera un tiempo de 10s para que el motor detenga su marcha y al proceder nuevamente con su arranque no haya un desgaste mecánico por torque y sobrecalentamiento de los TRIAC's. En la presente etapa intervienen los siguientes componentes:

- Pulsadores

- MOC 3021
- TRIAC BT4061

2.5.4 Cuarta Etapa

Recepción de señal PWM en TRIAC's acoplados a la red trifásica para realizar el corte de la onda según el ángulo de disparo. Se acciona el motor trifásico con un arranque para diferentes potencias.

En esta etapa intervienen los siguientes elementos:

- Motor
- TRIAC's

2.6 Diseño del Módulo del Arrancador Suave

Se diseñó la parte física del módulo del arrancador suave con el software AutoCAD con medidas reales de los elementos. Usando materiales necesarios, en la Fig.19 se muestra el diseño estructural del sistema de generación.

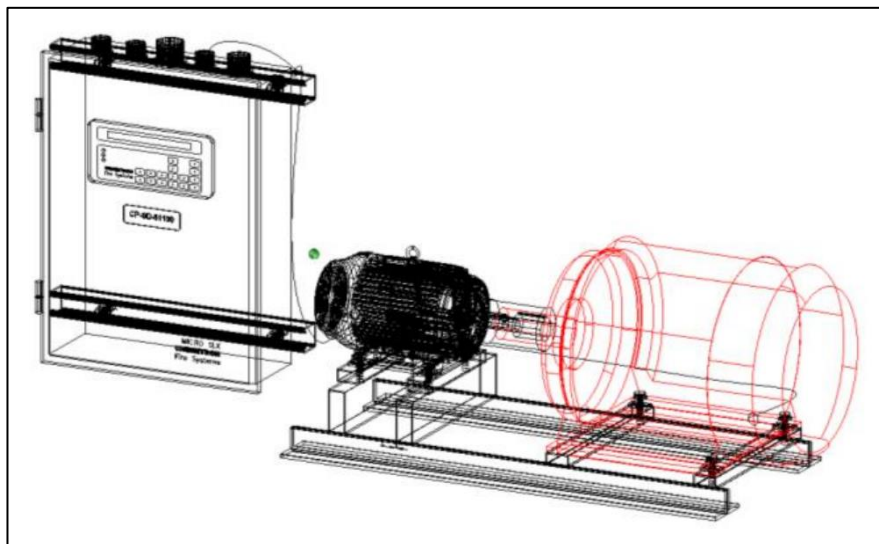


Fig 19. Diseño de la estructura externa del Módulo
Fuente: Autor

2.6.1 Desarrollo de Software

El programa desarrollado para el microcontrolador de Arduino Mega 2560 tiene como principal función controlar la activación de los TRIAC's, en referencia de los cruces por cero de la red trifásica, previamente detectado por un optoacoplador de alto voltaje, una vez sincronizado y detectados los cruces, se realiza la activación del motor mediante un pulsador de arranque, al etapa de control es encargada de enviar las señales PWM y navegar mediante los pulsadores para la activación del motor en diferentes potencias.

El LCD es el encargado de la visualizar el menú donde se encuentran los diferentes tipos de arranques que se deseen ejecutar. El menú está compuesto un menú para la selección de motores con arranque en vacío y con carga, el motor en vacío tiene una configuración dado por el desarrollador con un tiempo de arranque de 5 segundos, y para el menú del motor con carga cuenta con el potenciómetro para fijar el ángulo de disparo del triac según el usuario, en coordinación con la onda senoidal de la red. El diagrama de la Fig. 20 describe el proceso.

Los controles en el tablero son encargados de enviar la señal mediante un pulsadores para activar el arrancador suave de los motores, este ejecuta un giro a la derecha o izquierda según se desee para los diferentes motores que contaran con un tiempo de dos segundos para generar las rampas de voltaje una vez presionado el pulsador de giro de motor, después de terminado el proceso se debe pulsar el paro del motor, para la inversión del giro el microcontrolador espera diez segundos antes de activar nuevamente el motor, ya que si de ser el caso de activar el motor seguido de un paro este tendrá que superar un torque (par) muy alto que provocaría desgastes mecánicos en los bobinados del motor y daños irreparables en el mismo, o en el peor de los casos daños en la etapa de potencia en los Triac's u optoacopladores.

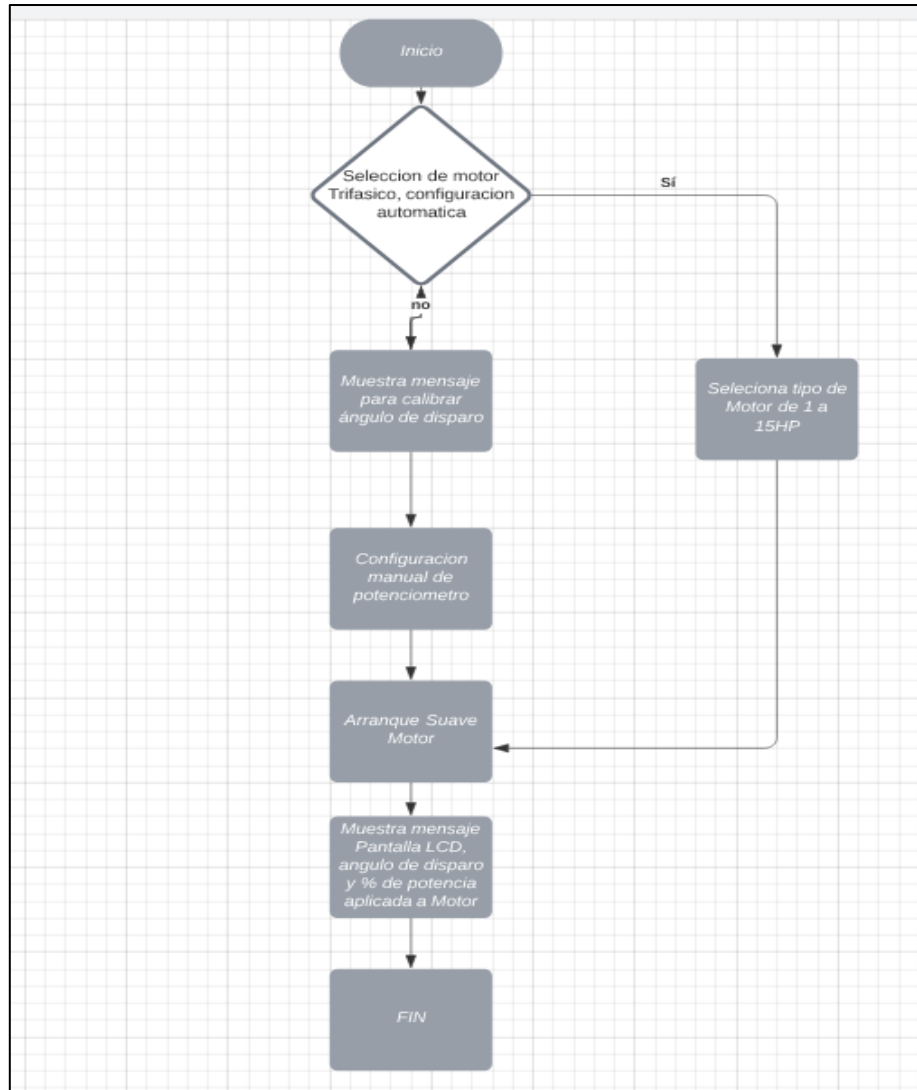


Fig 20. Diagrama de flujo del menú Principal
Fuente: Autor

2.7 Simulaciones

La simulación de la etapa de potencia se realizó en el software de Matlab-Simulink ya que la visualización de las corrientes de arranque en Multisim, no se observó el control por parte del Triac, en Simulink no cuenta con la parte de control, por lo que se simuló un generador de pulsos para el Triac, con las mismas características presentadas en la parte de control (Multisim).

En la Fig. 21, se simuló la parte de potencia del arrancador suave con un arreglo de SCR en antiparalelo.

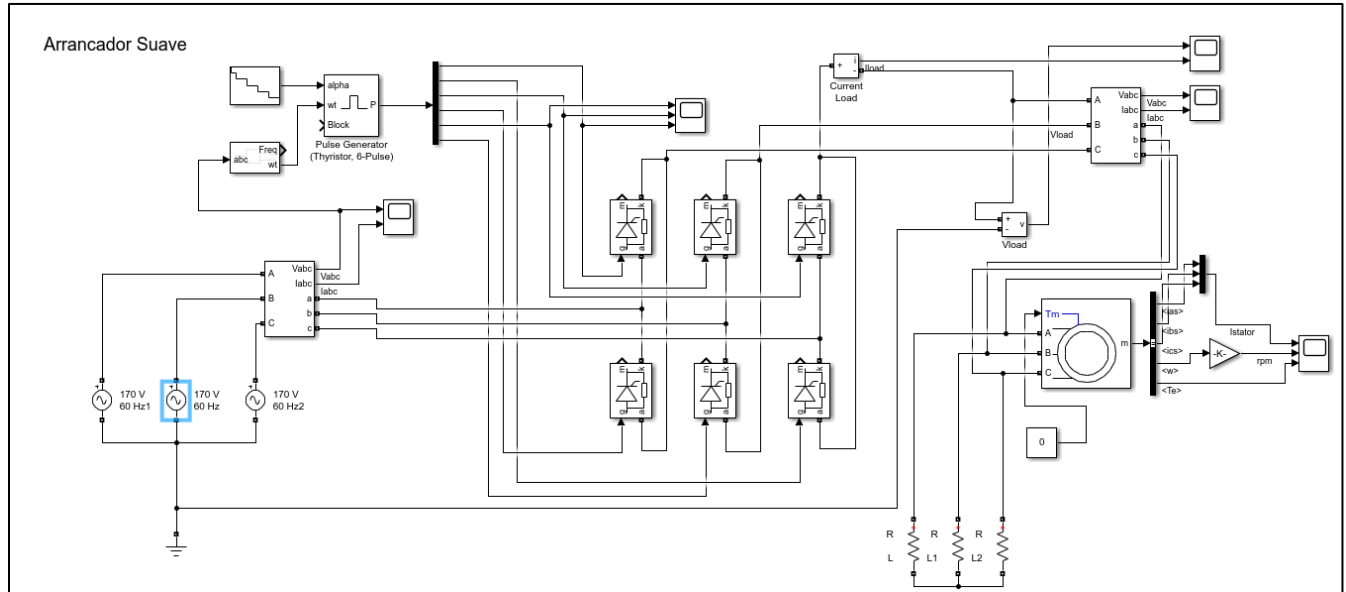


Fig 21. Simulación de arrancador suave
Fuente: Autor

Para el control del ángulo de disparo se diseñó un tren de pulsos que envía las señales a los SCR, conectando un motor asíncrono de 1 HP con las siguientes características de la Fig. 22.



Fig 22. Datos de Placa Motor Trifásico
Fuente: (Ebay, 2021)

En la Fig. 23, se observa el arranque del motor con conexión directa a la línea trifásica, las mediciones se realizaron en el estator del motor, donde las corrientes de arranque, las revoluciones por minuto(rpm), y el torque (T_e) producido mediante este tipo de arranque toman valores elevados en cada uno de estos parámetros, evidenciándose un arranque directo y sus desventaja los primeros momentos de su arranque, con un consumo excesivo de voltaje y como fuerza innecesaria presentes en este tipo de arranques.

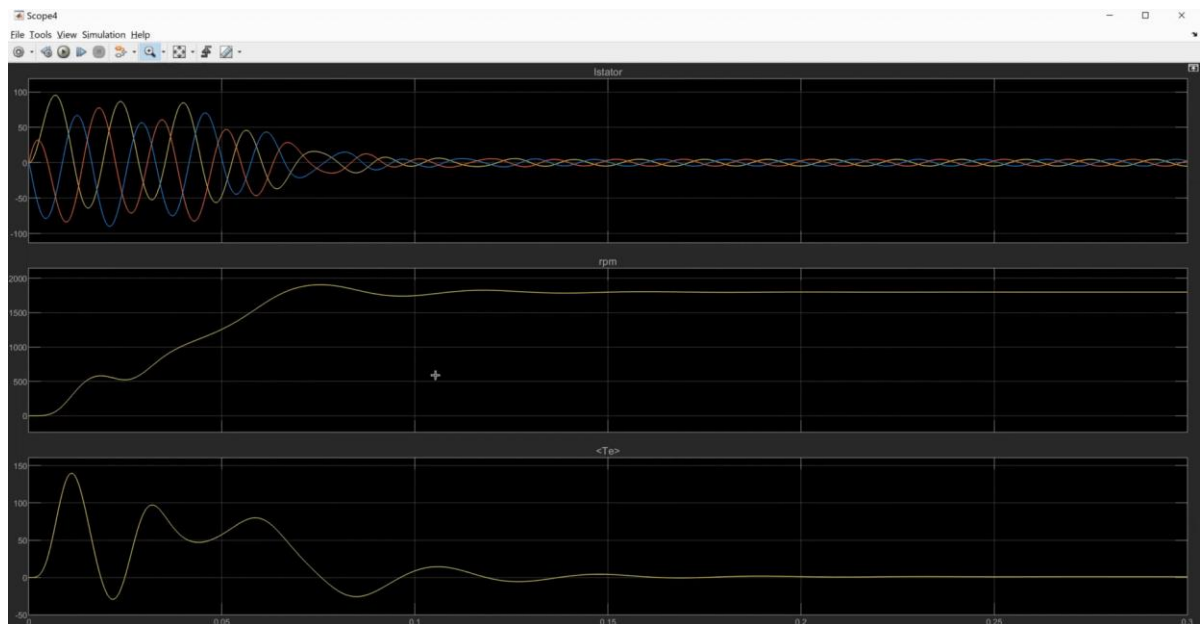


Fig 23. Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque directo
Fuente: Autor

En la Fig.24 se observar las gráficas de corrientes, las revoluciones por minuto, y el torque dentro del estator, donde se observa un incremento gradual de los valores, debido al acoplamiento de un arrancador suave.

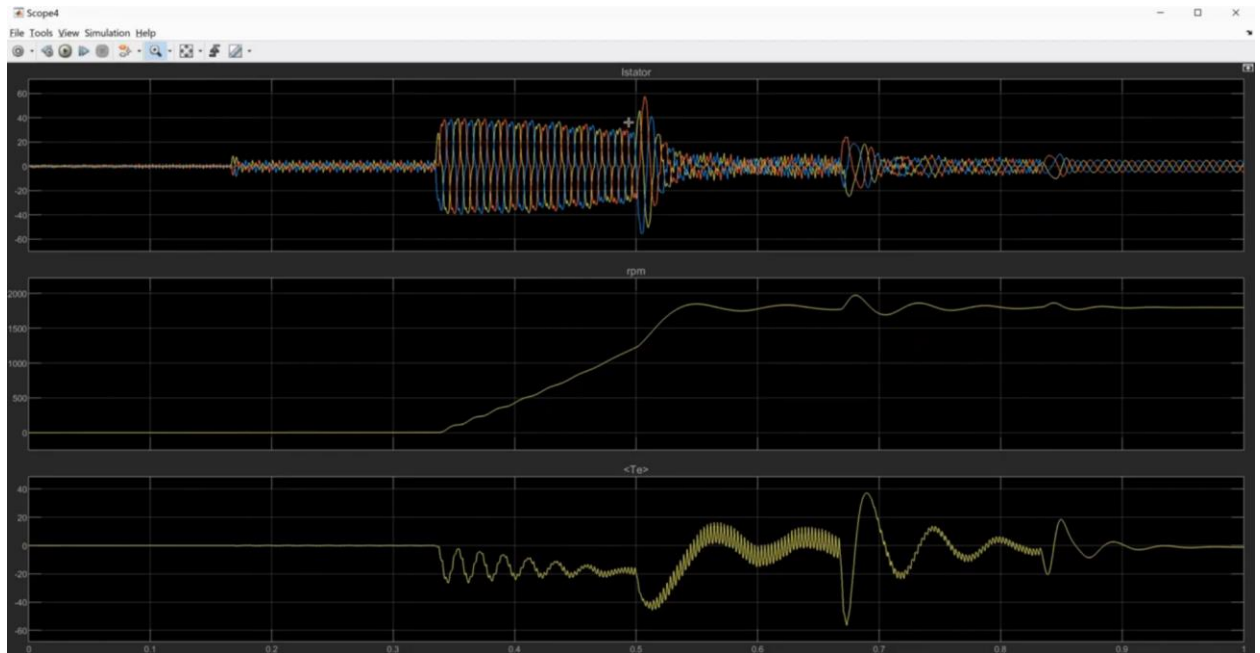


Fig 24. Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque suave
Fuente: Autor

Debido al microcontrolador el motor arranca a los tres segundos de haber pulsado su arranque, y en la Fig.25 se puede observar la distorsión de las fases R, S y T; controlando el voltaje de entrada del motor mediante una rampa de voltaje, donde se observa el control y asenso de cada una de las fases hasta estabilizarse, evitando así un arranque directo y brusco que provoca típicas caídas de tensión.

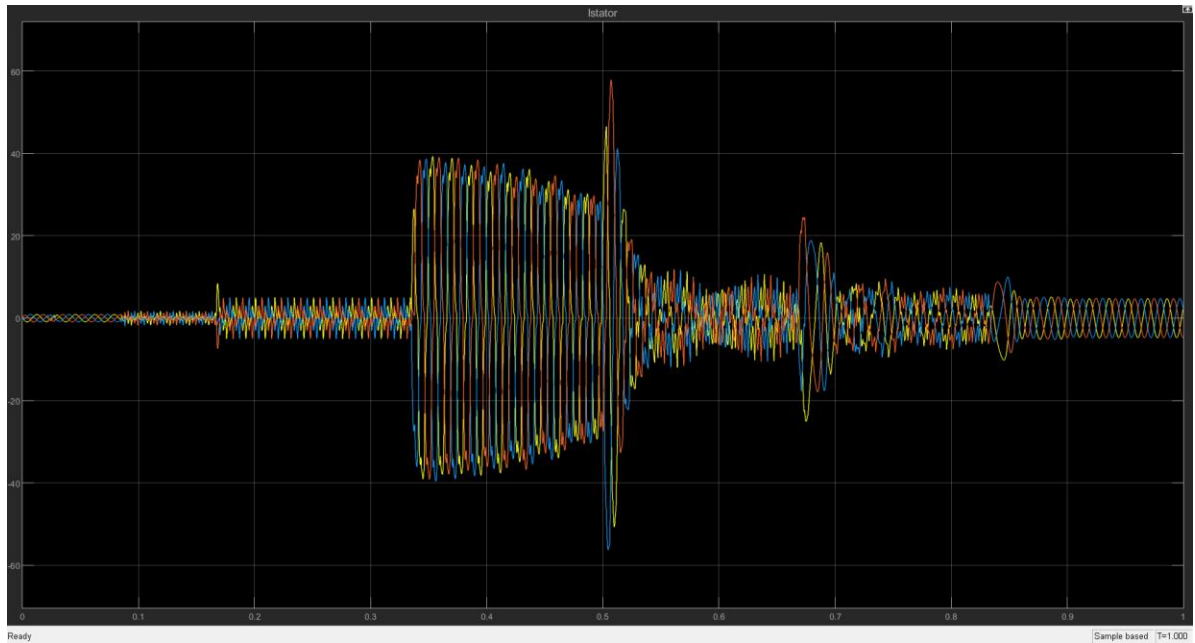


Fig 25. Grafica corriente estator, rpm, y torque del motor en arranque suave
Fuente: Autor

En la grafica del las revoluciones por minuto(RPM) de la Fig.26 se observa de igual manera un asenso progresivo del giro del motor, evitando asi una cantidad fuerza inecesaria al momento del encendido del motor, llas revoluciones por minuto se estabilizand despues de los primeros 5 segundos trasncurridos y una ves terminada las rampas de voltaje este llega a tener las 1200 rpm aproximadas de un motor de seis polos.

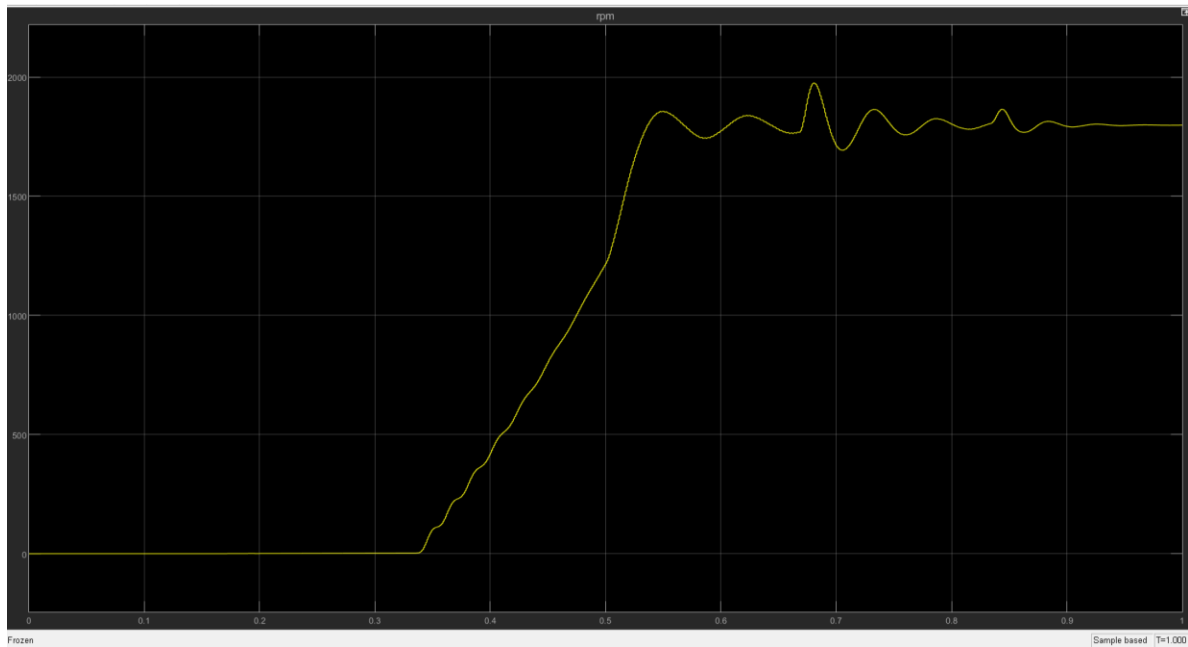


Fig 26. Estabilización de las revoluciones por minuto del motor con arranque suave
Fuente: Autor

En la Fig.27, se representa el torque que no es mas que la fuerza necesaria para mover el eje del motor que a diferencia del arranque directo este incluso tiene valores negativos, debido a que el motor los primeros segundos de su arranque esta estatico y en espera de la rampa de voltaje para tener el voltaje necesario para iniciarse, despues de los cinco segundos se observa un crecimiento del torque el cual comienza a estabilizarse.

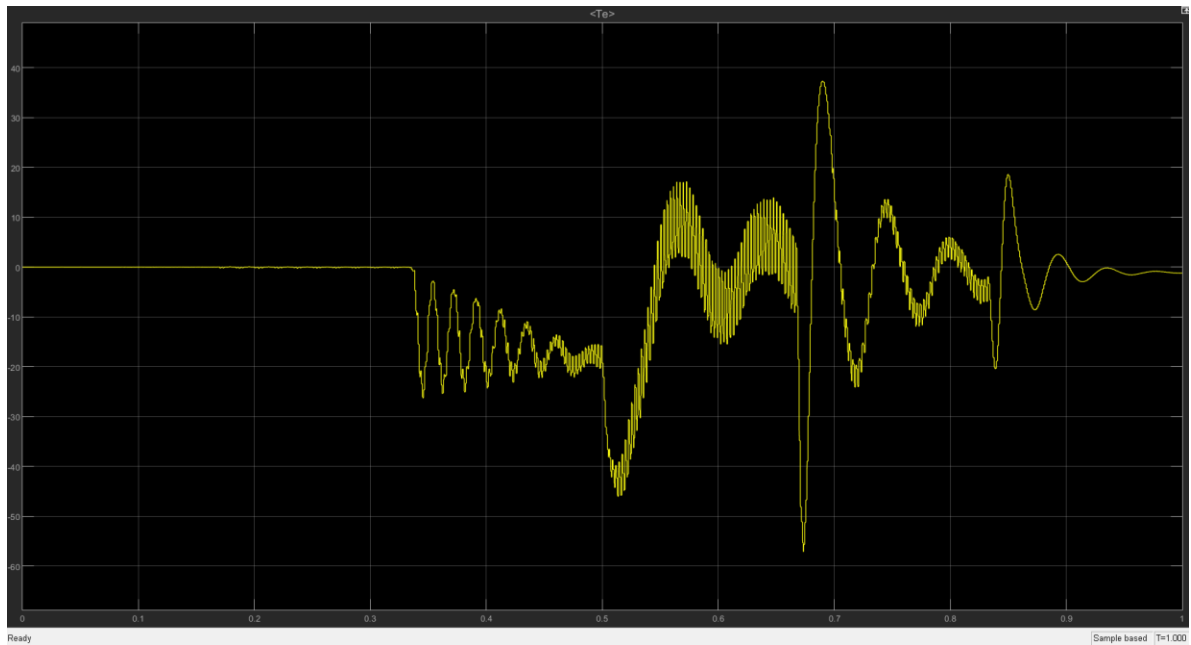


Fig 27. Grafica del par producido por un arranque suave.
Fuente: Autor

2.8 Conclusiones

Las simulaciones generadas en este capítulo mediante Matlab-Simulink demuestran una clara reducción de los picos corriente al momento de arrancar de un motor trifásico, proporcionando ventajas en la industria al implementar este tipo de arranque.

Las gráficas proporcionadas por parte de Matlab, se evidencia como un arranque directo afecta al consumo eléctrico, sin embargo, es necesario generar el recorte de la onda mediante un PWM sincronizado con la red la utilizando un detector de cruce por cero para el recorte de la onda senoidal a base de Triac's, la señal de pulsos fue generada por el microcontrolador de Arduino, previamente censando la señal mediante un optoacoplador que separe la parte de alta potencia con la del control.

El capítulo culmina con la adquisición de materiales de los elementos analizados según las características técnicas y los requerimientos del sistema.

CAPÍTULO 3

Implementación del Arrancador Suave con Control de Potencia variables

En este capítulo se detalla el proceso para la construcción del módulo y los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento del arrancador suave para motores trifásicos de diferente potencia de hasta 15 hp.

También cuenta con un manual de mantenimiento, de prácticas de laboratorio y el un manual de usuario donde se detalla el su adecuado uso tanto como manual y automático, procedimientos previos a su conexión al motor trifásico.

3.1 Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de este capítulo es el método en espiral lo que permite estar interactuando con los anteriores subtemas para ir encontrando una mejora del prototipo, esto debido a que se pueden presentar cambios en la implementación del módulo y validar su correcto funcionamiento del arrancador suave trifásico.

3.2. Implementación del Módulo

Para la implementación del módulo se tuvo en cuenta los dimensionamientos y estudios realizados dentro de los capítulos anteriores, en los cuales se mostró una previa la selección de materiales para la parte de control y fuerza. A continuación, se muestra el procedimiento que se siguió para la construcción del arrancador suave de motores trifásicos.

3.2.1. Descripción de Costo Comercial de los Componentes Eléctricos y Electrónicos para el Arrancador Suave.

Dentro de la adquisición de componentes se consideró los criterios técnicos y de diseño correspondientes a la tabla 1 y 2 del capítulo 2, adicionalmente se añadieron elementos de protección contra sobre corrientes con el fin de proteger el módulo del arrancador de la red eléctrica.

Tabla 8.
LISTA DE MATERIALES ADQUIRIDOS EN BASE A REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Materiales	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
Gabinete eléctrico 40x40x20	1	45	45
Breaker de Riel 3Px32A	1	25	25
Canaleta ranurada gris	1	3.50	4.50
Cable sucre 4x12	4	3.25	13
Placa de baquelita una cara	1	7.50	7.50
Arduino mega 2560	1	18.50	25.50
Optoacoplador 4N25	2	0.75	0.75
Puente de diodos	2	0.75	1.50
Resistencias	22	0.15	3.30
Triacs 41 A	3	2.45	7.35
Disipadores de calor	3	0.50	1.50
Borneras 2 polos	5	0.15	0.75
Optoacoplador MOC 3021	3	0.70	2.10
Pantalla Lcd 16x2	1	6.50	6.50
Modulo I2c	1	4.25	4.25
Pulsador NC	1	1.60	1.60
Pulsador NA	1	1.60	1.60
Potenciómetros	2	0.55	1.10
		Total	152.80

El total de los componentes electrónicos y materiales para el montaje del arrancador suave es de 152.80 dólares, pero a este se le añaden elementos varios, como tornillos, cables de conexión, y pequeñas herramientas para la construcción del módulo del arrancador.

3.3. Distribución y Montaje de Componentes Electrónicos

Para la distribución de los componentes electrónicos se utilizó el diagrama de fuerza y control de las Fig.15 y Fig. 16 respectivamente, las cual nos permitía identificar claramente este acoplamiento mediante Arduino mega, como también proteger la parte de alta con la de baja potencia dentro del gabinete de control, en la parte exterior instala la comunicación entre HMI, realizado mediante una pantalla Lcd, pulsadores para la selección del menú, instalándose potenciómetro para la selección del voltaje inicial de arranque y el tiempo en el que se desea realizarlo, se incluyeron un pulsador normalmente abierto y uno cerrado para iniciar el arranque y la parada respectivamente, para ellos se explica por separado el conexionado de cada etapa mencionada en el capítulo 2.

3.3.1 Construcción del Circuito del Detector de Cruce por Cero

Este circuito sirve para monitorear la señal de la red alterna cuando cambia de polaridad conocido de otro modo como el cruce por cero, para dos de las fases del sistema trifásico a 60Hz, por un lado, se conecta una fase con un puente de diodos que alimenta internamente un led infrarrojo y por el otro es alimentado el fototransistor interno que envía una serie de pulsos al controlador a través de una interrupción externa. En la Fig.28 se muestra el diagrama del circuito detector de cruce por cero.

a) Optoacoplador Moc 4N25

El optoacoplador 4N25 permite acoplar la red eléctrica convencional con el microcontrolador, ya que emplea un haz de luz para transmitir la señal, evitando así una conexión eléctrica, además cuenta con una velocidad de conmutación mucho más fiable y no genera pulsos de rebote al detectar un cruce por cero de la señal.

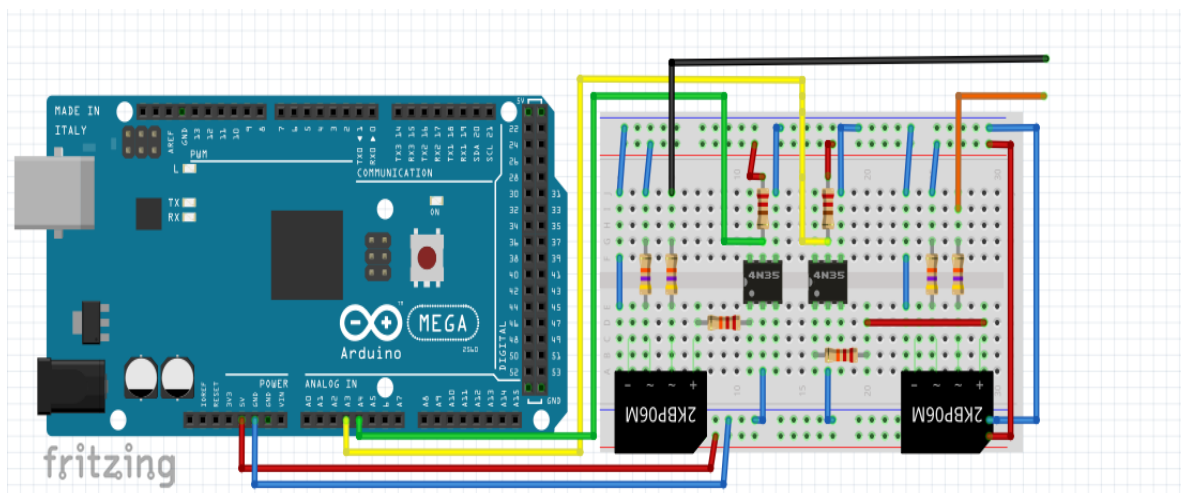


Fig 28. Detector de cruce por cero con Moc4N25
Fuente: Autor

Como se observa en la Fig.28 se añade un puente de diodos para rectificar la onda completa, y conectándola al optoacoplador 4n25 con las respectivas salidas de la señal se conectan a las entradas analógicas que censan la señal cuando cruce por cero la onda, a continuación, la Tabla 9 muestra los pines de conexión.

Tabla 9.
CONEXIÓN DE PINES DETECTORES DE CRUCE POR CERO

Placa detección de cruce por cero	Conexiones
VCC +	5v (Arduino mega 2560)
GND -	GND (Arduino mega 2560)
Señal de Detección fase R	A3(Arduino mega 2560)
Señal de Detección Fase S	A4(Arduino mega 2560)
Fase R (cable negro)	Sistema trifásico fase R
Fase S (cable naranja)	Sistema trifásico fase S

Se implementó dos detectores de cruce por cero para dos las fases (R y S), añadiéndole un puente de diodos para rectificar la onda completa para tener las señales de los semiciclos negativos.

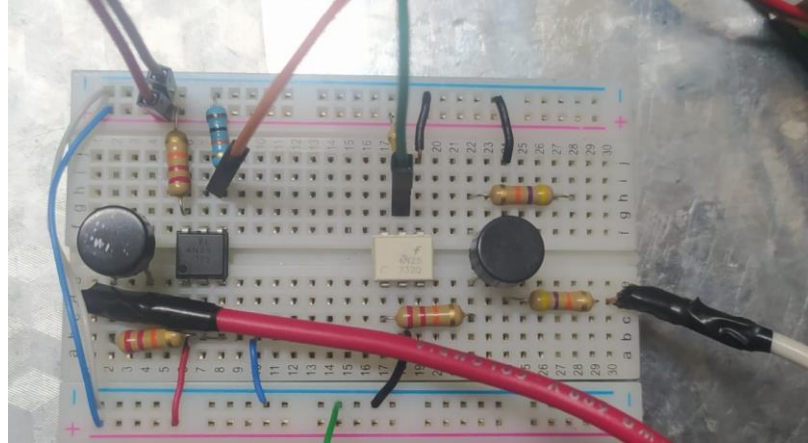


Fig 29. Implementación del detector de cruce por cero para fase R y S.
Fuente: Autor

El Moc 4N25 soporta una corriente de hasta 100mA, para calcular la resistencia del fototransistor se tiene:

$$V_{R1} = (127 * \sqrt{3}) - V_{led} \quad (4)$$

$$I_R = I_{led} \leq 100\text{mA}$$

$$R_1 = \frac{(127 * \sqrt{3}) - V_{led}}{I_{led}} \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{220 - 1.5}{10\text{mA}} = 21.85\text{k}\Omega$$

Se selecciona la resistencia disponible en el mercado de:

$$R_1 = 22\text{k}\Omega$$

La resistencia del transistor interno se coloca para limitar la corriente requerida del microcontrolador que es de 10K. Se utilizan un puente de diodos para tener un rectificador de onda completa que nos ayuda a detectar los cruces por cero de los semiciclos negativos, como se muestra en la Fig. 30.

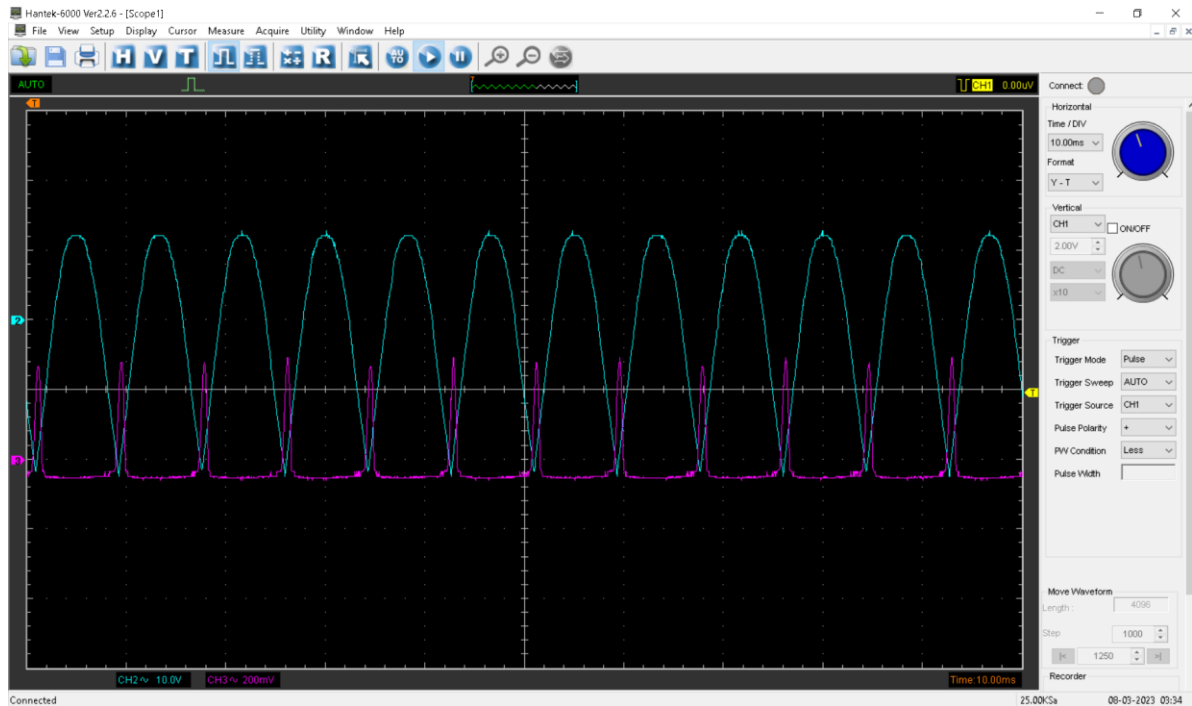


Fig 30. Pulso generado por el cruce por cero de 4N25
Fuente: Autor

Las detecciones del cruce por cero generan pulsos por cada uno de los semiciclos de la onda (Fig.30), estas son interrupciones externas que las censara el microcontrolador de Arduino se encargara de iniciar una variable de conteo para cada grado eléctrico que va desde 0 a 179 grados, ya que la onda senoidal se encuentra rectificadada para los semiciclos positivos y negativos.

b) Detección del grado eléctrico

Para realizar las interrupciones externas se necesita saber el comportamiento de la señal de corriente alterna, para lo cual se realiza un conteo desde los 0 grados hasta los 179 grados del semiciclo positivo, ya que desde los 180 esta empezara nuevamente su conteo para el semiciclo negativo, como se muestra en la Fig. 31. La señal se propaga en un tiempo conocido como periodo, por lo que es fundamental calcular el tiempo entre cada grado eléctrico, para que lo monitore el microcontrolador.

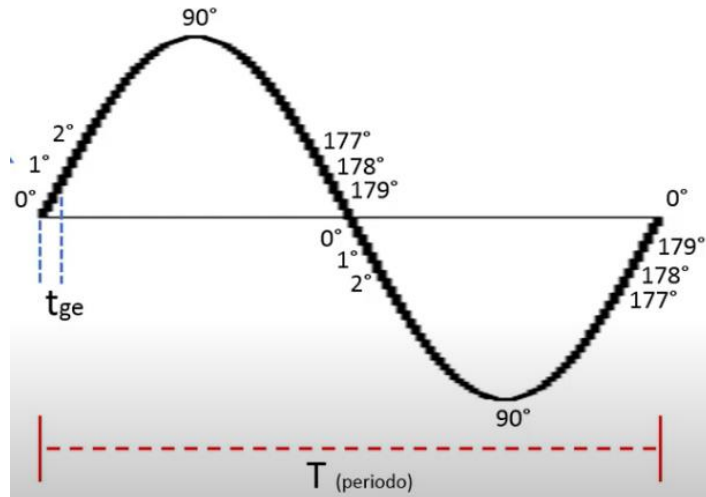


Fig 31. Grados eléctricos de corriente alterna
Fuente: (Jacob, 2021)

Teniendo en cuenta que la señal de voltaje en nuestro país es de 127 Vrms por fase a una frecuencia de 60HZ, de la cual a través de esta frecuencia obtenemos el periodo, ya que este es el inverso de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$T = \frac{1}{60} = 0,016666 \text{ s}$$

$$T = 16,666 \text{ ms}$$

Como resultado obtenemos el tiempo del ciclo de la señal, para conocer cada grado eléctrico, el tiempo que pasa entre cada uno, se divide el valor del tiempo entre 360 grados.

$$tge = \frac{0.016666}{360} \quad (7)$$

$$tge = 46,297 \mu s$$

$$tge = 46,3 \mu s$$

El incremento del grado eléctrico se la realiza por medio de una interrupción de timer, cada que pase los $46.3 \mu s$, este valor se inicializa cuando llegue una interrupción externa, que es mediante la detección del cruce por cero.

Para variar el grado eléctrico en el cual va a iniciar el disparo del triac se relaciona un potenciómetro con el pulso PWM para variar su duty cycle y pueda variar así el ángulo de conducción.

En la Fig.32 se observa la detección del cruce por cero de una de las fases y la activación del pulso PWM con el que inicia su arranque

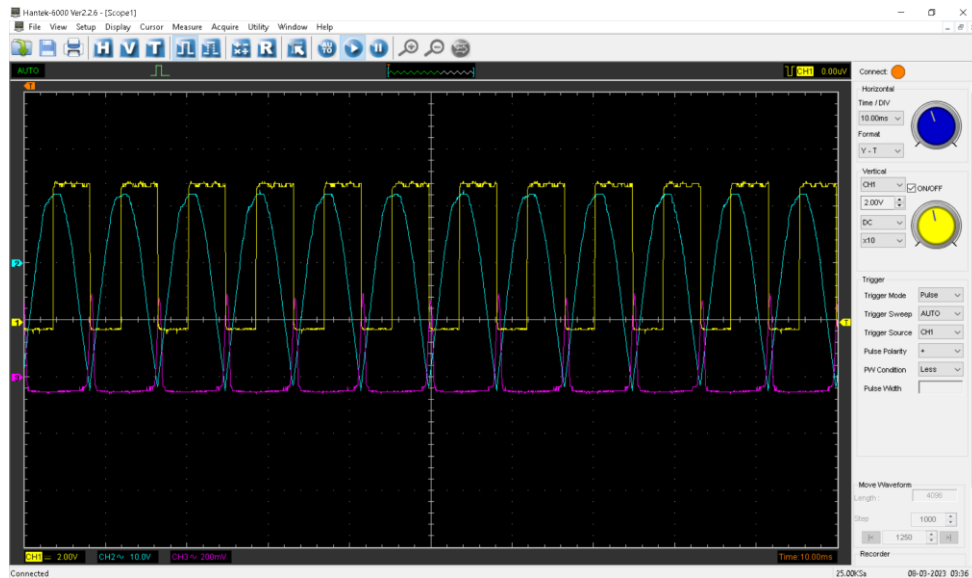


Fig 32. PWM generado después de detección de cruce por cero
Fuente: Autor

El pulso es gobernado por un potenciómetro con el que se regula el ancho de pulso, en este caso su ciclo de trabajo al iniciar el arranque es de un 25% en donde realiza el corte de la onda, como se puede observar en la Fig.33

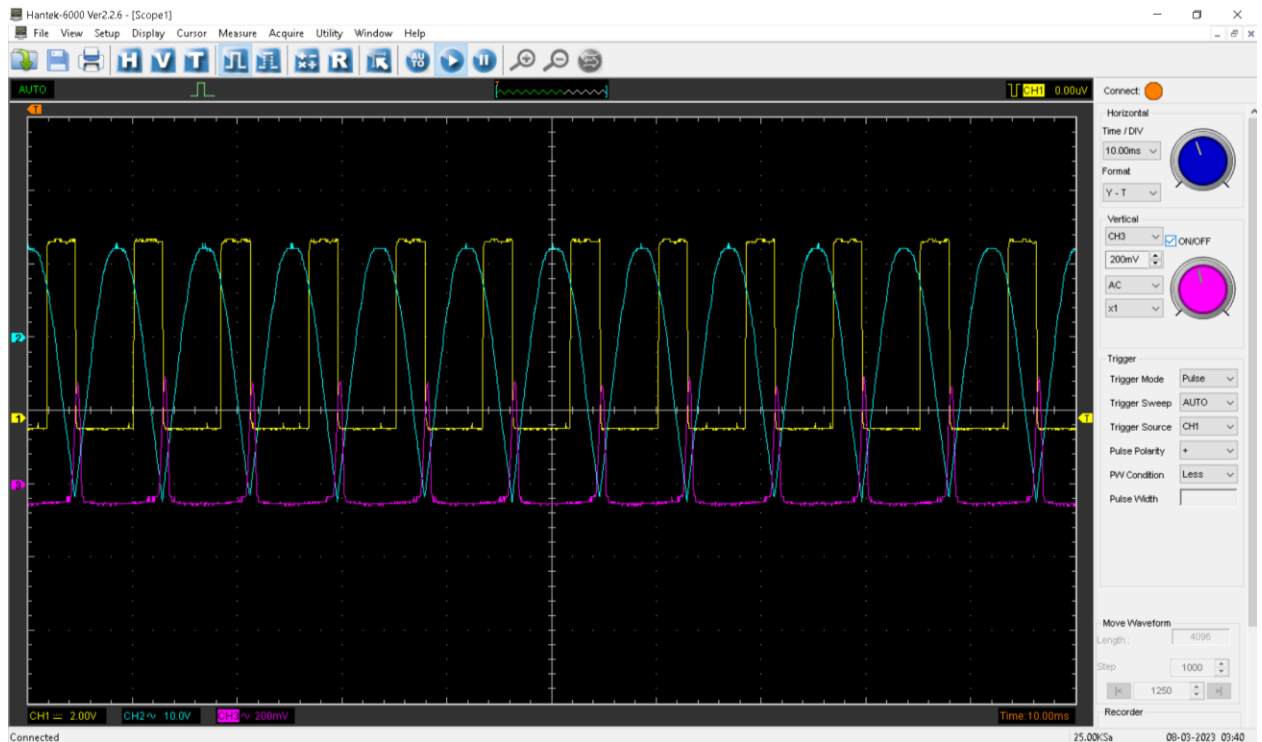


Fig 33. Duty cycle al 25 %
Fuente: Autor

Una vez detectado el cruce por cero de una de las fases se procede a modular el ancho de pulso mediante un potenciómetro para iniciar su arranque, el duty cycle esta aun 25 %, el cual hará el recorte de la onda al acoplarse al triac.

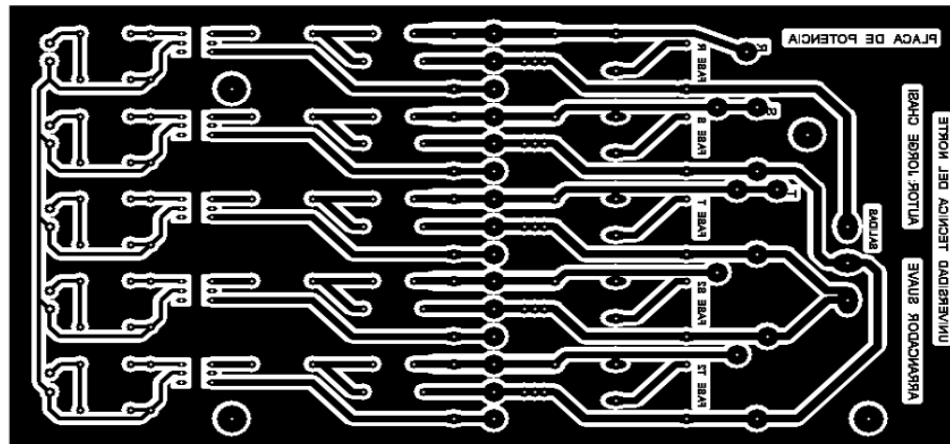
3.3.2. Construcción del circuito de fuerza

Para el montaje de componentes electrónicos en el circuito de potencia, comienza con la recepción de la señal PWM procedente del microcontrolador, la cual es conectada al optoacoplador MOC 3021, encargado de enviar la señal del pulso de disparo al pin gate del triac, para poder controlar la señal de corriente alterna para el control de arranque del motor.

a) Optoacoplador Moc 3021

b) Montaje de Triac

Mediante el método del planchado, se copia el circuito diseñado, en donde es necesario imprimir una copia en papel fotográfico, en la Fig.35 se observa el PCB.



70

El proceso de la etapa de potencia empieza con el diseño de la placa, en donde se encuentran implementado el optoacoplador 3021, hasta la salida de los Triacs en el que se conecta las cargas de los motores trifásicos, el diseño se lo realizó en el software PCB Wizar.

Una vez impreso el circuito en la placa PCB se procede a la soldadura de los componentes anteriormente detallados, terminando como muestra la Fig.36.

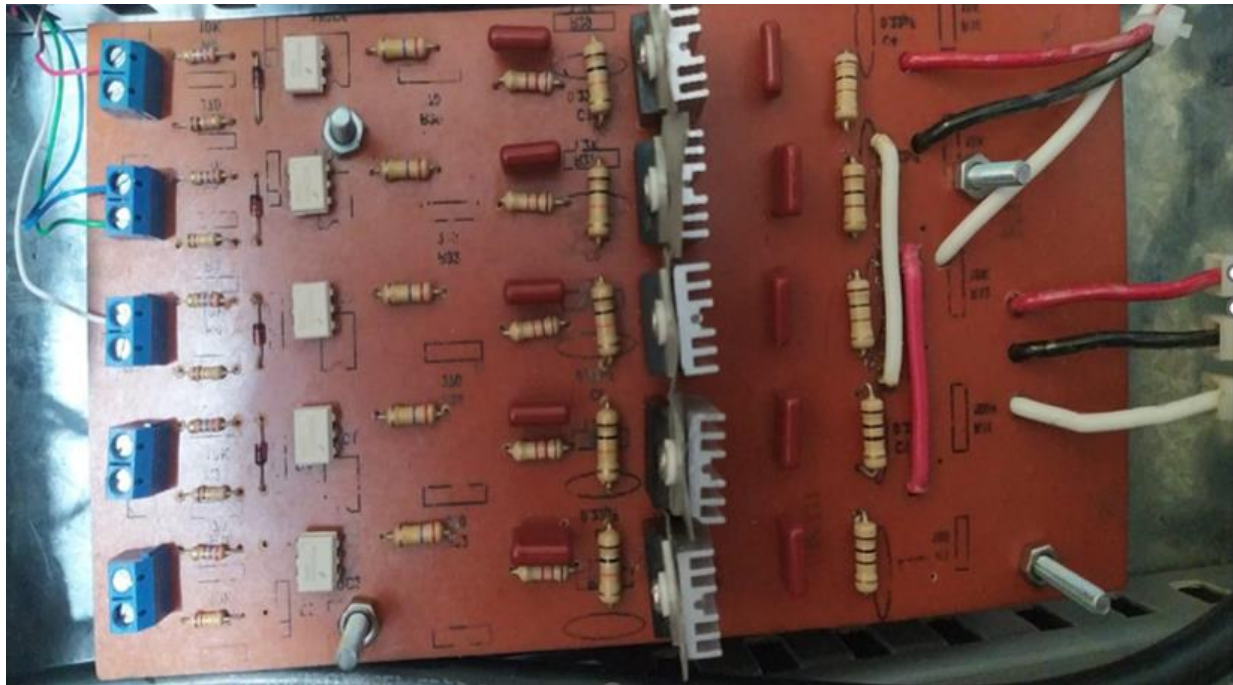


Fig 36. Tarjeta PCB de la etapa de potencia
Fuente: Autor

La tarjeta de potencia es encargada de recibir las señales PWM realizar el proceso del recorte de la onda senoidal mediante el Triac.

La red snubber evita las sobretensiones o transitorios de cargas inductivas que con el tiempo presentan problemas de funcionamiento o dañan en los equipos electrónicos, en este caso del triac que hace el proceso de acoplamiento con la parte de alta potencia, por lo que se optó por la colocación de una red de snubber que alargara la vida útil del circuito.

3.3.3. Implementación Interfaz HMI

La implementación de la interfaz HMI permite al usuario poder comunicarse con el módulo mediante pulsadores para la selección del tipo de arranque ya sea este en automático o manual donde se pueda seleccionar el voltaje inicial de arranque, al igual que su tiempo de arranque.

Esta etapa se la realizo mediante la pantalla Lcd 16x2 y un módulo de comunicación serial I2C con el cual reduce los pines de la pantalla hacia la conexión del microcontrolador, como se muestra en la Fig.37.

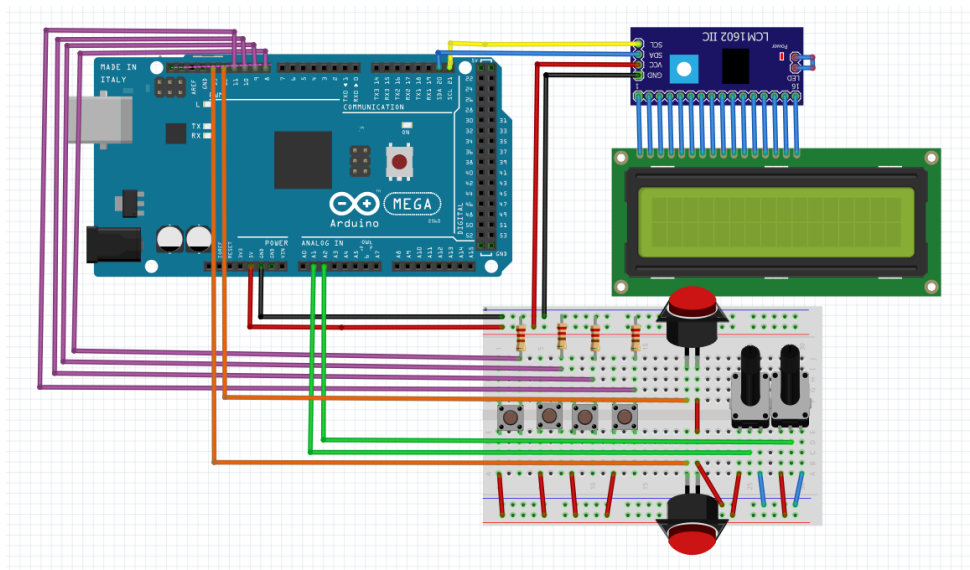


Fig 37. Simulación HMI en fritzing
Fuente: Autor

En la Tabla 10 se marcan los pines de conexión a los cuales está asociado la interfaz hombre máquina, con la que se tendrá constancia para el conexionado en el tablero de control, los pulsadores se encuentran conectados con una resistencia a tierra tipo Pull UP para tener lecturas fijas de las pulsaciones, evitando mal interpretaciones por el microcontrolador por perturbaciones del sistema.

Tabla 10.
CONEXIÓN DE PINES INTERFAZ HOMBRE MAQUINA

Elementos	Conexiones ARDUINO Mega 2560
Modulo I2C	
VCC +	5v (Arduino mega 2560)
GND -	GND (Arduino mega 2560)
Señal SDA	Pin 20 (Arduino mega 2560)
Señal SDL	Pin 21 (Arduino mega 2560)
Pulsadores	
Up	Pin8
Down	Pin9
OK	Pin 10
back	Pin 11
On	Pin 12
OFF	Pin 13
Potenciómetros	
Voltaje Inicial	Pin analógico A1
Tiempo de arranque	Pin analógico A2

Fuente: Autor

Una vez terminada la simulación de la interfaz se procede a la conexión en el tablero por lo que es necesario empotrar los componentes en los lugares correspondientes o perforaciones realizadas en el gabinete de control, como se observa en la Fig.38.



Fig 38. colocación elementos HMI en el Tablero
Fuente: Autor

Como se puede observar en la Fig.39 se detallan los elementos que se encuentran distribuidos en el gabinete con el fin de brindar la comunicación con el usuario para poder ingresar e interpretar los datos para el arranque de motores trifásicos.



Fig 39. Ubicación de los elementos de la Interfaz HMI
Fuente: Autor

3.3.4 Montaje en la Estructura de Aislamiento y Protección de los Componentes

En la Fig. 39, en el gabinete están los componentes de la interfaz hombre maquina conectados en la compuerta izquierda del gabinete, a la derecha se aíslan la parte de control con la de potencia para evitar perturbaciones en el sistema, y se encuentran aislados de la parte metálica del gabinete mediante canaletas, tornillos, Riel-din y cables aislados.

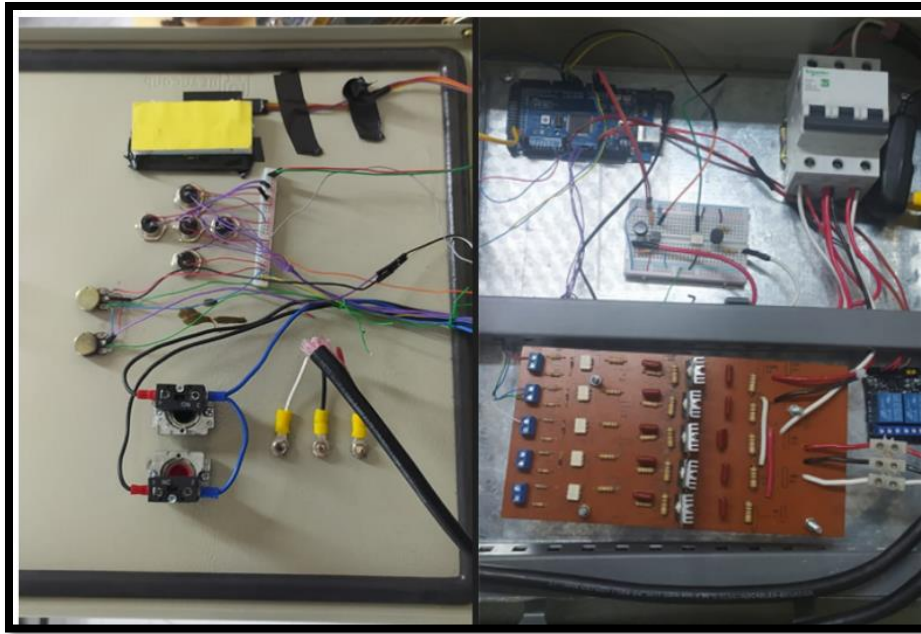


Fig 40. Conexiones Internas del arrancador suave
Fuente: Autor

Para proteger los circuitos se colocaron dentro de un gabinete eléctrico, en los cuales se añade la alimentación del arrancador suave y sus salidas, así de igual manera se instala en el gabinete un interruptor termo magnético de 20A 3 polos. El cual cumple la función de proteger contra cortocircuitos y sobrecargas a los elementos de potencia y control en caso de un posible daño. El modelo utilizado es EZ-9F56320 de marca Schneider Electric (Fig.41)



Fig 41. Termomagnético 3p x20 A
Fuente: Autor

3.4 Resultados

Para determinar el correcto funcionamiento del arrancador suave trifásico, se utiliza los equipos de medición existente en la carrera de CIELE, los cuales ayuda en la comprobación de un arranque progresivo de los motores trifásicos de diferente potencia.

Con la utilización de equipos de medición se comprueba los valores de voltaje de arranque y señal senoidal recortada.

3.4.1 Pruebas de Arrancador Suave con Motor Trifásico sin carga

Para las pruebas de funcionamiento del arrancador suave se lo realizó con una carga inductiva mediante un motor trifásico de 1HP (Fig.42) del laboratorio de potencia conectado en estrella. Para la visualización de la onda recortada en alta potencia se utilizó una punta diferencial conectada a cada una de las fases.



Fig 42. Datos de placa motor trifásico

Fuente: Autor

Para la prueba se seleccionó el modo manual del módulo donde se seleccionó un arranque con una potencia inicial al 40% en un tiempo de 4 segundos, con una sonda de alto voltaje configurada por 500V; el osciloscopio se calibró a 200mV por división y un tiempo por división de 5 000ms, donde se obtuvo las siguientes graficas.

En la Fig.43 se observa el recorte de la onda senoidal de la fase R, que en 4 segundos aumenta su corriente continuamente, pero porque son cargas inductivas necesitan una corriente de arranque más elevada por lo que se observa una deformación de la onda en el ángulo de conducción.

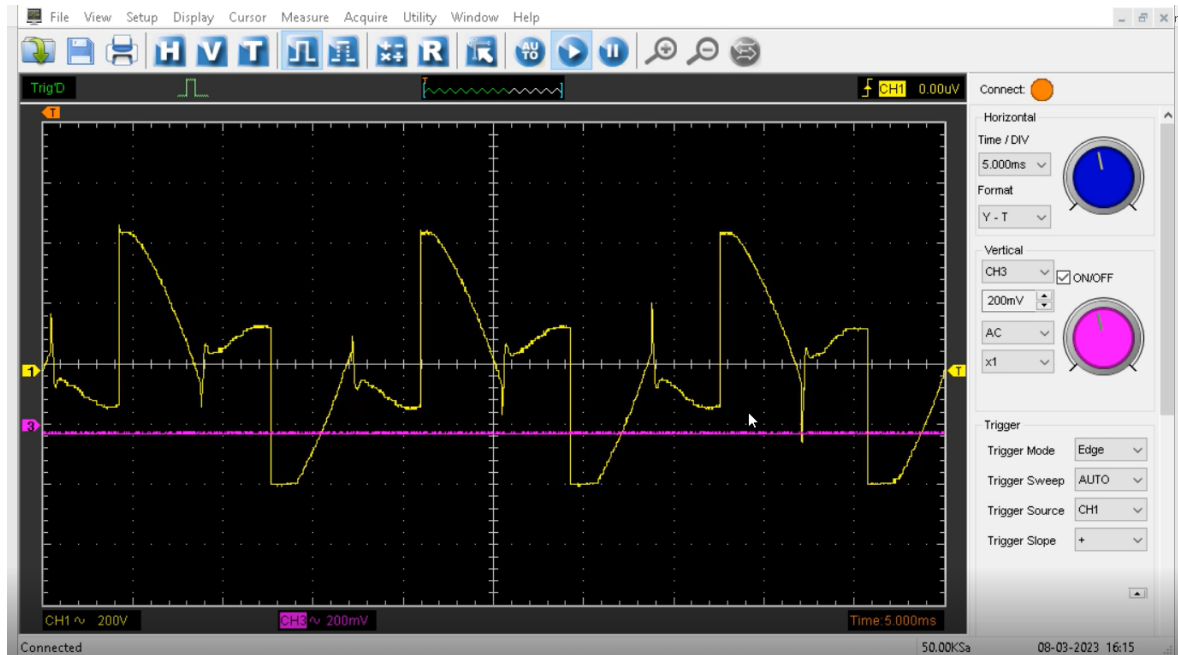


Fig 43. Onda senoidal Recortada – Fase R
Fuente: Autor

En la Fig.44 de la fase S se observa el mismo comportamiento de la onda en la cual esta tiende a deformarse para romper el par del motor, esta deformación se mantiene hasta alcanzar su voltaje y corriente nominales, una vez terminado el arranque la señal se acopla a la de la red, la señal una vez terminada el arranque será igual que la fase T.

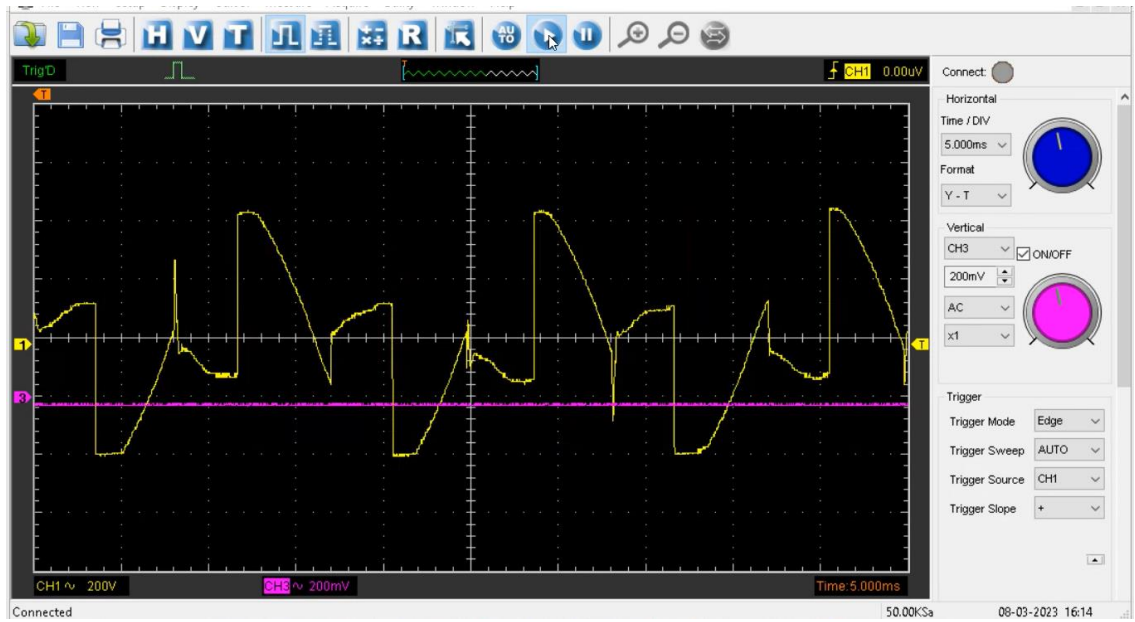


Fig 44. Onda senoidal recortada – Fase S
Fuente: Autor

En la Fig.45 se observa la fase T que mantiene la forma de onda constante, ya que esta es puenteada directo al motor trifásico.

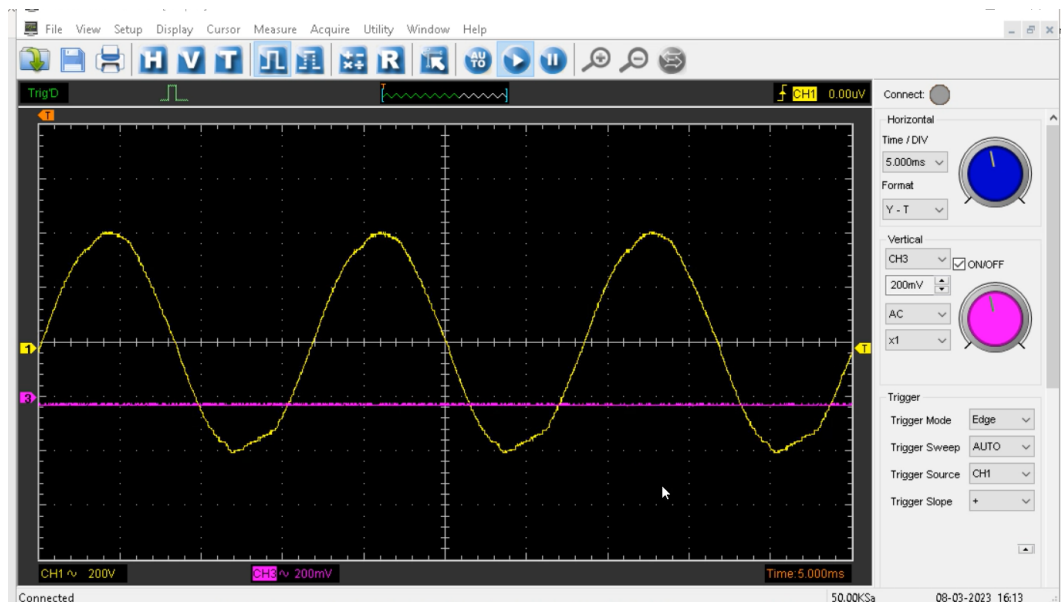


Fig 45. Fase T
Fuente: Autor

Como se puede observar en las Fig. 43, Fig. 44 y Fig. 45 se representan las fases R, S y T respectivamente, en donde se muestra un recorte de onda de voltaje en las fases R y S mediante el tren de pulsos generados por las interrupciones externas del cruce por cero de cada una de las fases, y sincronizando el corte de la onda, en este caso el corte de la onda fue de un 40% y este corte va reduciéndose en un tiempo de 4 segundos hasta complementar la onda senoidal.

Debido a que se reduce el voltaje durante los primeros segundos de arranque del motor y va creciendo paulatinamente en este tiempo, proporcionalmente también se reduce la corriente de arranque haciendo que esta se eleve según se eleve el voltaje.

3.4.2 Pruebas de Arrancador Suave con Motor Trifásico con carga

Para las pruebas de funcionamiento del arrancador suave de un motor trifásico con carga se lo realizó con un motor trifásico conectado a un generador DC del laboratorio de máquinas eléctricas (Fig.46). Para la visualización de la onda senoidal se utilizó una punta diferencial conectada a cada una de las fases.



Fig 46. Prueba del Módulo con Carga (Motor-Generador DC)
Fuente: Autor

Para la prueba se seleccionó el modo manual del módulo donde se seleccionó un arranque similar al de carga, con una potencia inicial al 50% en un tiempo de 3 segundos, con una sonda de alto voltaje configurada por 500V; el osciloscopio se calibró a 20V por división y un tiempo por división de 5 000ms, donde se obtuvo las siguientes graficas.

En la Fig.47 se observa el recorte de la onda senoidal de la fase R, que en un tiempo de 3 segundos aumenta su corriente continuamente, pero debido a que son cargas inductivas y adicionalmente cuentan con una carga del generador, el cual debe de romper un par más alto por lo que esta tiende a deformar su onda en el ángulo de conducción.

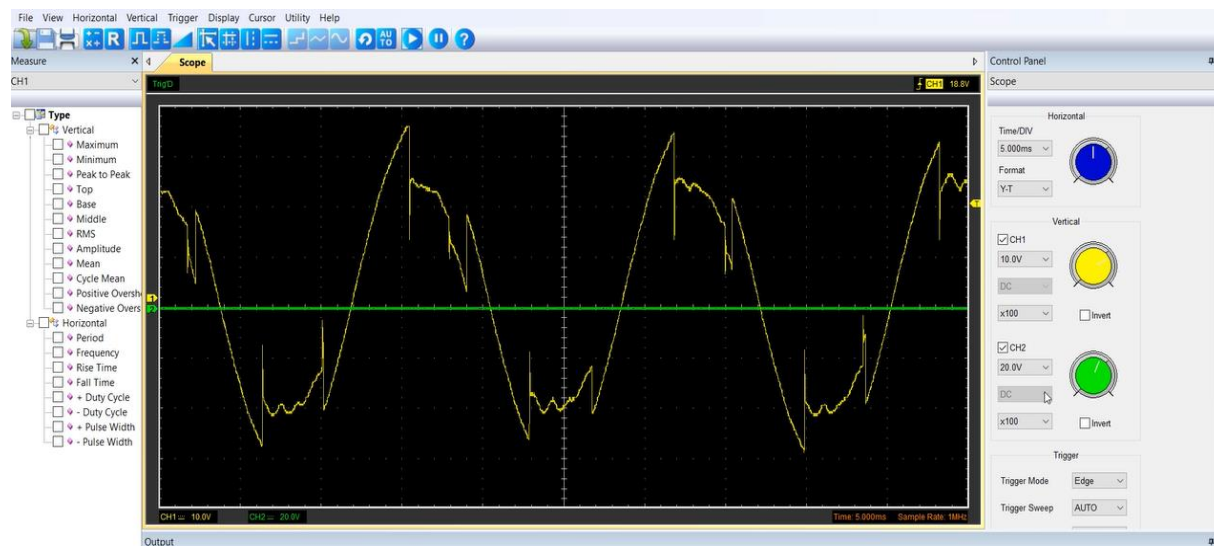


Fig 47. Fase R con carga (Motor-Generador)
Fuente: Autor

De forma similar sucede el mismo efecto de deformación de la onda senoidal en la Fig.48 en un tiempo de 3 segundos aumenta su corriente continuamente, sin embargo, debido al alto par que este necesita romper para mover el generador, la onda empieza a suministrar más voltaje para que el motor gire la carga.



Fig 48. Fase S con carga (Motor-Generador)
Fuente: Autor

Mientras el motor trifásico se encuentra acoplado a una carga el cual debe de romper una barrera de frenado debido a que su torque disminuye al estar conectado al generador, por lo que se observa en la Fig. 47 y Fig. 48, una deformación de la onda senoidal en la que el motor demanda mucha más corriente eléctrica en los primeros segundos de arranque y va creciendo paulatinamente hasta completar el tiempo de arranque seleccionado al arrancar el módulo.

Conclusiones

- Se implemento un módulo de arranque suave para motores trifásicos de diferente potencia, reduciendo los picos de corriente en el arranque, mediante un tren de pulsos acoplado a los Triacs y optoacopladores implementados en las fases R y S. Lo anterior se lo puede demuestra en las Fig. 43 y Fig. 44 con el recorte de la onda senoidal.
- La implementación en la industria de los arrancadores suaves minimiza los gastos de energía consumida, afectado directamente a las ganancias de empresas industriales que dispongan de motores trifásicos, evitando el accionamiento de los mismo en secuencia con el propósito de evitar estos picos de corriente, sin embargo perdería tiempo al realizar un accionamiento secuencial de cada uno, con el arrancador suave acoplado al motor se puede accionar todos a la vez sin las preocupaciones de un alto consumo eléctrico.
- Mediante las gráficas obtenidas en las pruebas realizadas con el arrancador suave, se observa el recorte de la onda de voltaje, es decir que por el hecho de ir incrementando el voltaje paulatinamente desde un valor bajo, hasta completar su onda, hace que la corriente no suba drásticamente al momento de arrancar el motor trifásico.
- Para su fácil manejo e interpretación se presenta una Interfaz Hombre Máquina con la cual se puede accionar el dispositivo, el usuario puede seleccionar el ángulo de disparo con el que iniciara el arranque, así como el tiempo en el que se realiza dicha acción.

Recomendaciones

- Se sugiere para futuras investigaciones, implementar una alarma informativa que visualice en la pantalla LCD, los valores de corriente y voltaje durante el arranque, mediante sensores acoplados a los terminales del motor.
- Los motores por lo general en aplicaciones en la industria utilizan cambios de giro y en ocasiones frecuencia, por lo que para futuros cambios en la tarjeta de potencia con el fin de utilizar estas funciones se recomienda el rediseño del software de la etapa de control.
- En los motores trifásicos se pueden realizar conexiones internas en los bornes de los bobinados motor, ya sean estos en delta o estrella afectan el funcionamiento del arranque por lo que se recomienda revisar de manera correcta la conexión en los bornes del motor, ya que al conectarlos en estrella que la reducción de la corriente será aún más significativa.

Referencias

- Abraham, G. (17 de Junio de 2020). *Automatizacion para todos* . Obtenido de Utilizar un Display LCD con Arduino: <https://www.automatizacionparatodos.com/display-lcd-con-arduino/>
- Araya, E. (1 de 10 de 2017). *ARRANQUE Y CONTROL DE LA VELOCIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN*. Obtenido de SILO.TIPS: <https://silo.tips/download/arranque-y-control-de-la-velocidad-de-motores-trifasicos-de-induccion-resumen#>
- Arduino Get Started. (2021). *Arduino Get Started*. Obtenido de Arduino-LCD: <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-lcd>
- Autycom. (29 de Abril de 2021). *AUTYCOM Innovacion Inteligente* . Obtenido de Qué es un simulador de procesos y cuáles son sus ventajas en la industria: <https://www.autycom.com/simulador-de-procesos-que-es-y-cuales-son-sus-ventajas/>
- canalMOTOR. (3 de 06 de 2020). *Noticia anteriorNoticia siguiente*. Obtenido de MAPFRE: <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/motor-asincrono/#>
- Cavallo, C. (14 de 08 de 2020). *¿Qué es un motor de rotor bobinado y cómo funciona?* Obtenido de THOMAS: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/what-is-a-wound-rotor-motor-and-how-does-it-work/>
- COSMOS. (s.f.). *Arracadores de Estado Sólido*. Obtenido de COSMOS: <https://arracadoresdeestadosolido.com/>
- CPI. (12 de enero de 2018). *Elementos de proteccion para motores guardamotores*. Obtenido de Introducción y Conceptos Preliminares: <https://www.cpi.com.ar/notas/elementos-de-proteccion-para-motores-guardamotores/#:~:text=Comercialmente%20los%20guardamotores%20se%20eligen,m%C3%BAltiple%20de%20la%20corriente%20nominal.>

- Ebay. (22 de Febrero de 2021). *Ebay*. Obtenido de Baldor Reliance Electric Super E Motor Spec 36H294S268G1 5HP 230/460V 1750RPM: https://www.ebay.com/itm/Baldor-Reliance-Electric-Super-E-Motor-Spec-36H294S268G1-5HP-230-460V-1750RPM-/264908918341?_ul=DO
- Echevería, D., & Villanueva, J. (2008). Diseño y construcción de un arrancador suave aplicando a un motor de inducción trifásico. *Diseño y construcción de un arrancador suave aplicando a un motor de inducción trifásico*. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga.
- Electrical Academia. (2020). *Torque Speed Characteristics of Induction Motor*. Obtenido de Electrical Academia: <https://electricalacademia.com/induction-motor/torque-speed-characteristics-induction-motor/>
- Frailé, J. (2016). *Máquinas Eléctricas* (6ta ed.). (J. L. Jurado, Ed.) Madrid: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A.
- García, S. (12 de Junio de 2020). *Cómo conectar una pantalla LCD 16x02 con controlador I2C a Arduino*. Obtenido de <https://blog.330ohms.com/2020/06/12/como-conectar-una-pantalla-lcd-16x02-con-controlador-i2c-a-arduino/>: <https://blog.330ohms.com/2020/06/12/como-conectar-una-pantalla-lcd-16x02-con-controlador-i2c-a-arduino/>
- hilkar. (2020). *Autotransformadores para Arranque de Motores*. Obtenido de hilkar: <http://www.hilkar.com/>
- Jacob, D. (29 de Octubre de 2021). Control de ángulo de disparo del Triac. *Control de ángulo de disparo del Triac*.
- Latorres, E. (08 de 03 de 2023). *Enrique Latorres projects and ideas*. Obtenido de proyecto arduino display I2c -LCD con biblioteca de malpartida: https://enrique.latorres.org/es_ES/2017/10/20/arduino-i2c-lcd-display-project-with-malpartida-library/

- Learnchannel-TV. (11 de 2019). *Soft Starter – arrancador suave*. Obtenido de Learnchannel-TV.com:
<https://learnchannel-tv.com/es/drives/3-phase-inductance-motor/starting-methods/softstarter/>
- Lozano, R. (6 de enero de 2020). *Talos Electronics*. Obtenido de Pantalla LCD Libreria actualizada!:
<https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/pantallas-lcd-libreria-actualizada>
- Motorex. (7 de 10 de 2019). *Diferencias entre motores eléctricos de Corriente Continua y Corriente Alterna*.
Obtenido de Motorex: <http://www.motorex.com.pe/blog/cual-es-la-diferencia-entre-los-motores-electricos-ca-y-cc/>
- Passas, C. (21 de 07 de 2017). *Métodos de arranque de motores de inducción de tres fases*. Obtenido de Puro Motores: <https://www.puromotores.com/13121283/como-funciona-una-arrancador-magnetico>
- Power Electronics. (2006). *COMPARATIVA FRENTE AL ARRANQUE ESTRELLA – TRIÁNGULO*. Obtenido de Power Electronics: <https://power-electronics.com>
- Risoul. (23 de Julio de 2021). *Blog de Risoul*. Obtenido de Arrancadores suaves: funcionamiento, beneficios y aplicaciones: <https://www.risoul.com.mx/blog/arrancadores-suaves-funcionamiento-beneficios-y-aplicaciones>
- RODRÍGUEZ, B. J. (2016). DISEÑO DE SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO UTILIZANDO VARIADOR DE FRECUENCIA Y MOTOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR DE JAULA DE ARDILLA. *DISEÑO DE SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO UTILIZANDO VARIADOR DE FRECUENCIA Y MOTOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR DE JAULA DE ARDILLA*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, Guatemala.
- Rodriguez, F. (13 de Junio de 2019). *Fidias Rodriguez Electrónica y Programación*. Obtenido de Como programar un ATTiny85 con el programador USBTinyISP: <https://fidiasrodriguez.com/como-programar-un-attiny85-con-el-programador-usbtinyisp/>

Schneider Electric España S.A. (1 de 06 de 1999). *Arranque de los motores asíncronos trifásicos*. Obtenido

de Schneider Electric España S.A.:

https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2018/REF.%2018-2018%20-%20OFICIAL%20TALLER%20B%20-%20PLANTA%20PAYSAND%C3%9A%20-%20PERFIL%20ELECTRICIDAD/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/ARRANQUE%20DE%20MOTORES%20AS%C3%8DNCRONOS%20TR

SENSORICX. (17 de 11 de 2020). *SCR ¿QUE ES Y COMO FUNCIONA?* Obtenido de SENSORICX EL SITIO WEB

DE LA TECNOLOGÍA.: <https://sensoricx.com/electronica-de-potencia/la-guia-maxima-scr/>

Tan, C. (8 de Septiembre de 2021). *ALL3DP*. Obtenido de Esp32 vs Arduino: The Differences:

<https://all3dp.com/2/esp32-vs-arduino-differences/#:~:text=In%20terms%20of%20connectivity%2C%20most,more%20suitable%20for%20IoT%20projects.>

Teja, R. (5 de Abril de 2021). *Electronics Hub*. Obtenido de What are the Differences Between Raspberry

Pi and Arduino?: <https://www.electronicshub.org/raspberry-pi-vs-arduino/#:~:text=The%20main%20difference%20between%20them,supply%2C%20programming%20and%20IO%20Connectivity.>

Tuervas.com. (s.f.). *El Motor Asíncrono*. Obtenido de Tuervas.com:

<http://endrino.pntic.mec.es/jhem0027/maquinaasincrona/motorasincrono7.htm>

Unit Electronics. (30 de Abril de 2020). *Unit Electronics*. Obtenido de ¿Cuál tarjeta de desarrollo elegir?:

<https://uelectronics.com/cual-tarjeta-de-desarrollo-elegir/#:~:text=ATTINY85-,Digispark%20es%20una%20tarjeta%20de%20desarrollo%20basada%20en%20el%20microcontrolador,un%20PC%2C%20laptop%2C%20etc.>

Uranga, E. (15 de 02 de 2018). *Arranque estrella-triángulo de un motor*. Obtenido de todoexpertos:
<https://www.todoexpertos.com/preguntas/8jh55e3ahhjj8ao9/arranque-estrella-triangulo-de-un-motor>

Vandelvira, A. D. (2011). *Motores de Corriente Alterna*. J.Garrigós.

Viego, P., Gómez, J. S., & Sousa, V. (2017). Recommendations about the Use of Soft Starters for Energy Saving in Induction Motors at Partial Loads. *Revista ESPACIOS*, 22.

Visitronica. (2020). *Visitronica*. Obtenido de TRIAC BTA41-600B TOP-3 (ORIGINAL):
<https://www.vistronica.com/componentes-activos/triac-bta41-600b-top-3-detail.html>

Anexos

Anexo A.- Código Detector de Cruce por Cero y Activación de Triacs

```
#include <TimerOne.h>          // Incluir Librería TimerOne
volatile int i=0;              // Variable usada por el contador.
volatile boolean cruce_cero=0; // variable que actúa como switch al detectar cruce por cero.
int Triac = 3;                 // Salida conectada al optoacoplador MOC 3021.
int dim;                       // Controla la intensidad de iluminación, 0 = ON; 83 = OFF
int T_int = 100;               // Tiempo en el cual se producen las interrupciones en uso.
int POT;
void setup() {
  //Serial.begin(9600);
  pinMode(Triac, OUTPUT);      // Configurar como salida.
  attachInterrupt(0, deteccion_Cruce_cero, RISING); // Realiza una interrupción al detectar el cruce
por cero en el pin 2
  Timer1.initialize(T_int);    // Inicializa la librería con el tiempo deseado.
  Timer1.attachInterrupt(Dimer, T_int); // En cada interrupción ejecuta el código Dimer.
}
void deteccion_Cruce_cero()
{
  // Si existe un cruce por cero entonces la variable "cruce_cero" cambia a TRUE...
  cruce_cero = true;          //...reseteando el valor de "i", y colocando la salida conectada al Triac en
estado...
  i=0;
  digitalWrite(Triac, LOW);
}

void Dimer()
{
  if (cruce_cero == true ){
    if (i>=dim ) {
      digitalWrite(Triac, HIGH);
      i=0;
      cruce_cero=false;
    }
    else
    {
      i++;
    }
  }
}

void loop ()
{
  POT = analogRead(A0);
  dim = map(POT,0,1023,0,83);
}
```

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x20,16,2);
int lectura;
int lectura2;

//Pines i/o
#define buttonUp 8
#define buttonDown 9
#define buttonSelect 10
#define pinFoco A3
#define pinPwm 6

//Variables
int menu = 0;
int brillo = 0;
int tiempo ;
int menuMotor = 0;
int nivel = 0;
bool estadoFoco = false;
int grados = 0;

void setup() {
  pinMode(buttonUp, INPUT);
  pinMode(buttonDown, INPUT);
  pinMode(buttonSelect, INPUT);

  pinMode(pinFoco, OUTPUT);
  pinMode(pinPwm, OUTPUT);

  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("UTN Electricidad");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Arrancador Suave");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" Menu Principal ");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}

void loop() {

```

```

while(true){
  if(digitalRead(buttonUp)){
    menu++;
    if(menu >= 3){
      menu = 3;
    }
    delay(300);
  }

  if(digitalRead(buttonDown)){
    menu--;
    if(menu <= 0){
      menu = 0;
    }
    delay(300);
  }

  if(digitalRead(buttonSelect)){
    lcd.clear();
    delay(300);
    break;
  }
  switch (menu){
    case 0:
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("1_Manual   <");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("2_Automatico   ");
      break;

    case 1:
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("1_Manual   ");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("2_Automatico <");
      break;
  }
}

/*****/
switch (menu){
  case 0:
    while(true){
      if(digitalRead(buttonUp)){
        brillo = brillo ++;
        if(brillo >= 255) {
          brillo = 255;
        }
      }
    }
  }

```

```

    delay(200);
}

if(digitalRead(buttonDown)){
    brillo = brillo --;
    if(brillo <= 0) {
        brillo = 0;
    }
    delay(200);
}

if(digitalRead(buttonSelect)){
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Encendiendo ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(".....Motor.....");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    delay(100);
    break;
}
brillo=analogRead(A0);
tiempo=analogRead(A1);
int porcentaje = map(brillo, 0, 1023,40,100);
int tiempoS = map(tiempo, 0, 1023,0,10);
analogWrite(pinPwm, brillo);
analogWrite(pinPwm, tiempo);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Voltaje: ");
lcd.print(porcentaje);
lcd.print("% ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Tiempo: ");
lcd.print(tiempoS);
lcd.print("s ");
}
break;

case 1:
while(true){
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Automatico ");
    if(digitalRead(buttonUp)){
        estadoFoco = true;
        delay(300);
    }

    if(digitalRead(buttonDown)){

```

```

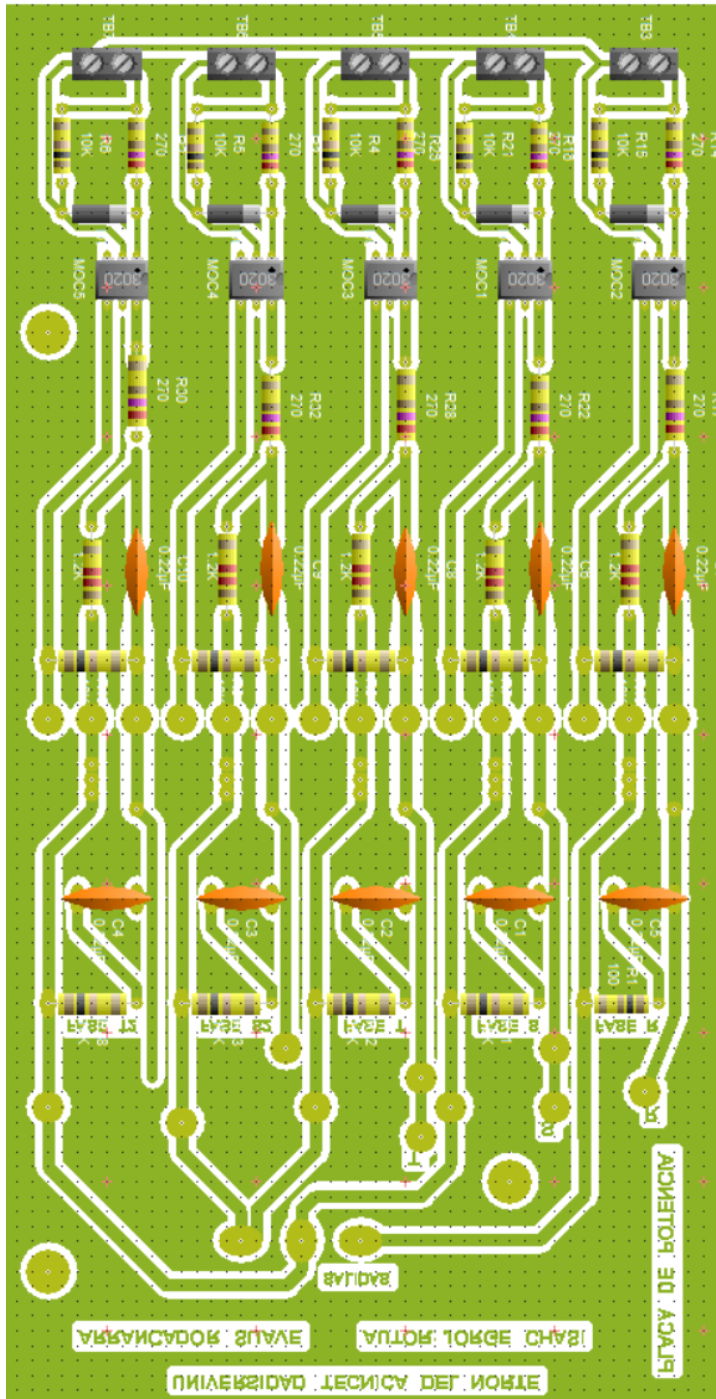
    estadoFoco = false;
    delay(300);
}

if(digitalRead(buttonSelect)){
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Encendiendo ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(".....Motor.....");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    delay(500);
    break;
}

digitalWrite(pinFoco, estadoFoco);
lcd.setCursor(0,1);
if(estadoFoco) {
    lcd.print("Estado: ON ");
}else{
    lcd.print("Estado: OFF");
}
}
break;
}
}

```

Anexo C.- Tarjeta de Potencia (Esquemático de conexión)



Anexo D.- Hoja de Especificaciones Fototransistor 4N25

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

GENERAL PURPOSE 6-PIN PHOTOTRANSISTOR OPTOCOUPLEDERS

4N25
4N37

4N26
H11A1

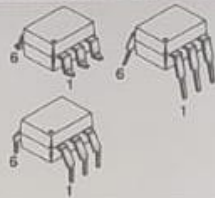
4N27
H11A2

4N28
H11A3

4N35
H11A4

4N36
H11A5

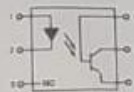
WHITE PACKAGE (-M SUFFIX)



BLACK PACKAGE (NO -M SUFFIX)



SCHEMATIC



Pin 1: ANODE
Pin 2: CATHODE
Pin 3: NO CONNECTION
Pin 4: EMITTER
Pin 5: COLLECTOR
Pin 6: BASE

DESCRIPTION

The general purpose optocouplers consist of a gallium arsenide infrared emitting diode driving a silicon phototransistor in a 6-pin dual in-line package.

FEATURES

- Also available in white package by specifying -M suffix, eg. 4N25-M
- UL recognized (File # E90700)
- VDE recognized (File # 94766)
 - Add option V for white package (e.g., 4N25V-M)
 - Add option 300 for black package (e.g., 4N25.300)

APPLICATIONS

- Power supply regulators
- Digital logic inputs
- Microprocessor inputs

GENERAL PURPOSE 6-PIN PHOTOTRANSISTOR OPTOCOUPLEDERS

**4N25
4N37**

**4N26
H11A1**

**4N27
H11A2**

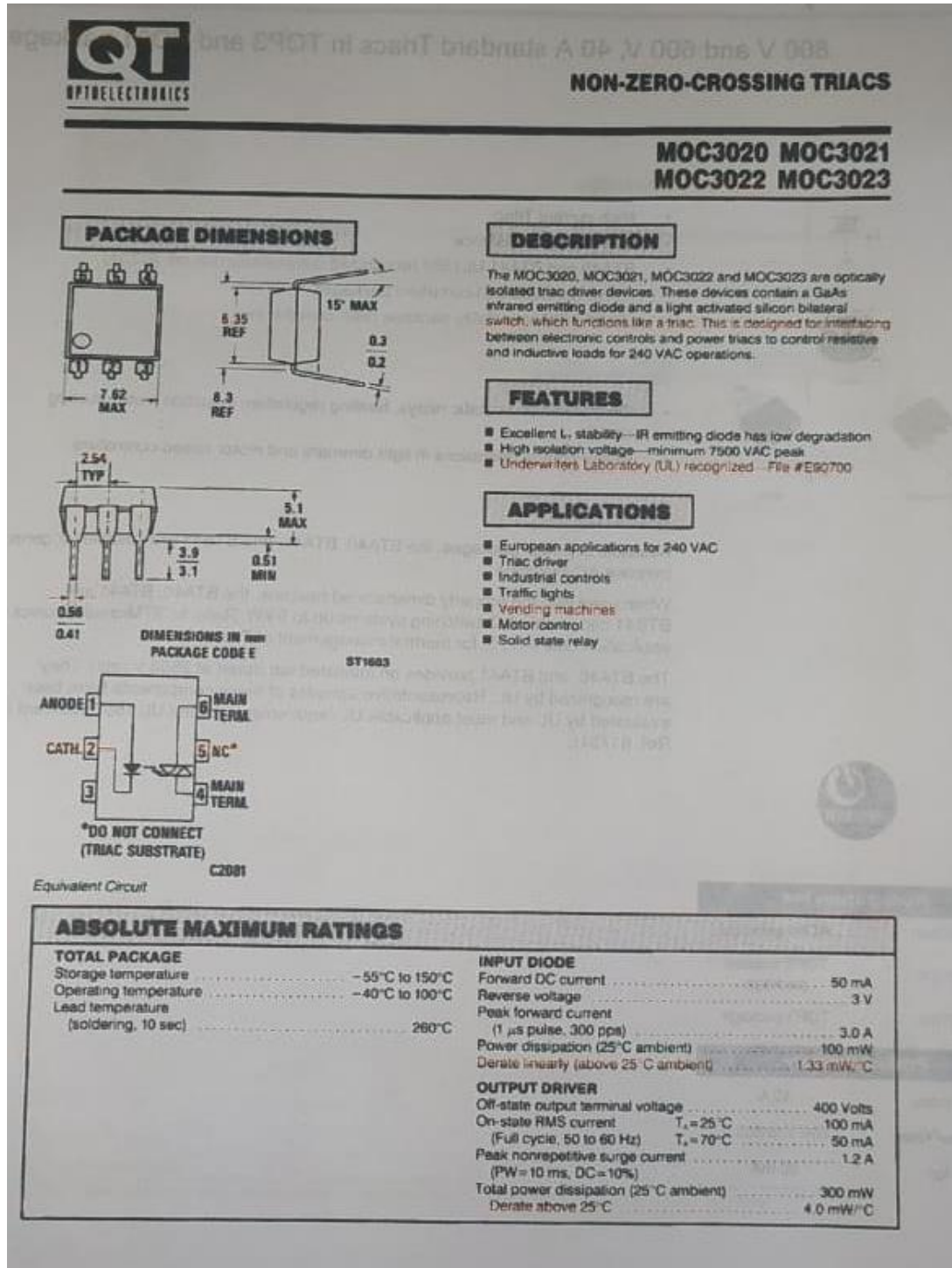
**4N28
H11A3**

**4N35
H11A4**

**4N36
H11A5**

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)			
Parameter	Symbol	Value	Units
TOTAL DEVICE			
Storage Temperature	T_{STG}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	T_{OPR}	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
Wave solder temperature (see page 14 for reflow solder profiles)	T_{SOL}	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
Total Device Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	250 3.3 (non-M), 2.94 (-M)	mW
EMITTER			
DC/Average Forward Input Current	I_F	100 (non-M), 60 (-M)	mA
Reverse Input Voltage	V_R	6	V
Forward Current - Peak (300 μs , 2% Duty Cycle)	$I_F(pk)$	3	A
LED Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	150 (non-M), 120 (-M) 2.0 (non-M), 1.41 (-M)	mW mW/ $^\circ\text{C}$
DETECTOR			
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	30	V
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	70	V
Emitter-Collector Voltage	V_{ECO}	7	V
Detector Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	150 2.0 (non-M), 1.76 (-M)	mW mW/ $^\circ\text{C}$

Anexo E.- Hoja de Especificaciones Moc 3021



ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS (25°C Temperature Unless Otherwise Specified)

INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
INPUT DIODE						
Forward voltage	V_f		1.2	1.50	V	$I_f = 10 \text{ mA}$
Junction capacitance	C_j		50		pF	$V_r = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$
Reverse leakage current	I_r			100	μA	$V_r = 3.0 \text{ V}$
OUTPUT DETECTOR						
Peak blocking current, either direction	I_{peak}	—	10	100	nA	$V_{\text{peak}} = 400 \text{ V}$, Note 1
Peak on-state voltage, either direction	V_{peak}	—	2.5	3.0	Volts	$I_{\text{peak}} = 100 \text{ mA Peak}$

Note 1: Test voltage must be applied within dv/dt rating.

TRANSFER CHARACTERISTICS

DC CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
LED trigger current (current required to latch output)	MOC3020	I_{tr}	—	30	mA	Main terminal voltage = 3.0 V, $R = 150\Omega$
	MOC3021	I_{tr}	—	15	mA	
	MOC3022	I_{tr}	—	10	mA	
	MOC3023	I_{tr}	—	5	mA	
Holding current	I_h	—	100	—	μA	Either direction

TRANSFER CHARACTERISTICS

CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
dv/dt RATING						
Critical rate of rise of off-state voltage	dv/dt	—	12	—	V/ μs	Static dv/dt, $T_a = 85^\circ\text{C}$ (see Fig. 3)
Critical rate of rise of commutating voltage	dv/dt	—	0.2	—	V/ μs	Commutating dv/dt, $I_{\text{peak}} = 15 \text{ mA}$ (see Fig. 4)

ISOLATION CHARACTERISTICS

CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
Isolation voltage	V_{iso}	5300			V_{RMS}	$I_{\text{iso}} < 1 \mu\text{A}$, 1 Minute
	V_{iso}	7500			V_{PEAK}	$I_{\text{iso}} < 1 \mu\text{A}$, 1 Minute
Isolation resistance	R_{iso}	10^{11}			ohms	$V_{\text{iso}} = 500 \text{ VDC}$
Isolation capacitance	C_{iso}		0.5		pF	$f = 1 \text{ MHz}$

Note 1: Ratings apply to either polarity of pin 6 — referenced to pin 4. Voltages must be applied within dv/dt rating.

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTIC CURVES
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified)

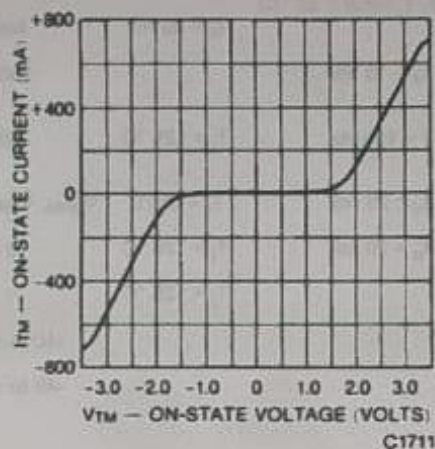


Fig. 1. On-State Characteristics

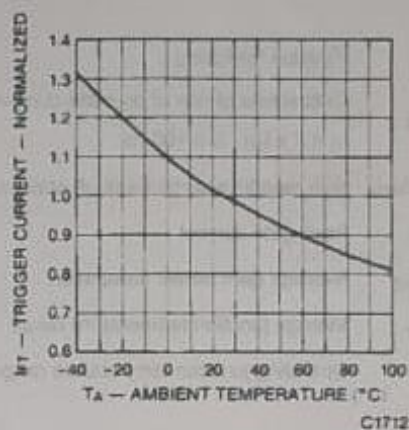
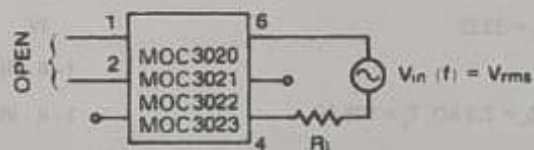


Fig. 2. Trigger Current vs. Temperature

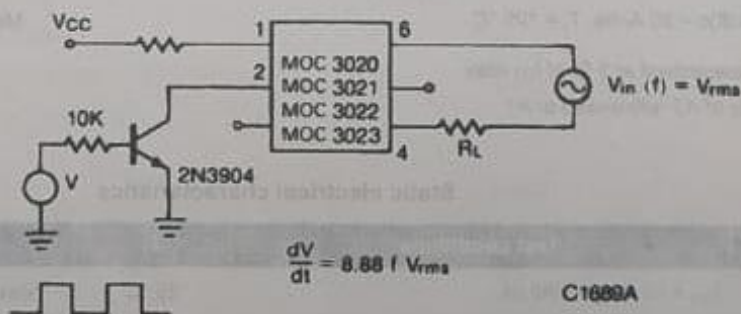
TEST CIRCUITS FOR dV/dt MEASUREMENTS



$$\frac{dV}{dt} = \omega V_{peak} = 2\pi f \times 1.414 V_{rms}$$

$$= 8.88 f V_{rms}$$

Fig. 3. Static dV/dt



$$\frac{dV}{dt} = 8.88 f V_{rms}$$

C1689A

Fig. 4. Commutating dV/dt

Anexo F.- Hoja de Especificaciones Triac BT41600V



life.augmented

BTA40, BTA41, BTB41

Datasheet

800 V and 600 V, 40 A standard Triacs in TOP3 and RD91 package






Features

- High current Triac
- Low thermal resistance
- BTA40 and BTA41 UL1557 recognized components (file ref: 81734)
- RoHS (2002/95/EC) compliant packages
- UL-94, V0 flammability package resin compliance

Applications

- On/off function in static relays, heating regulation, induction motor starting circuits
- Phase control operations in light dimmers and motor speed controllers

Description

Available in power packages, the BTA40, BTA41, and BTB41 are suitable for general purpose AC switching.

When used with the properly dimensioned heatsink, the BTA40, BTA41 and BTB41 can enable AC switching systems up to 9 kW. Refer to STMicroelectronics application note AN533 for thermal management of Triacs.

The BTA40, and BTA41 provides an insulated tab (rated at 2500 V rms). They are recognized by UL. Representative samples of these components have been evaluated by UL and meet applicable UL requirements for the UL 1557 standard (file Ref. 81734).



Product status link	
BTA40	RD91 package
BTA41	TOP3 isolated package
BTB41	TOP3 package

Product summary	
$I_{T(RMS)}$	40 A
V_{DRM}/V_{RRM}	600 V to 800 V
I_{GT}	50 mA

www.st.com

DS2111 - Rev 12 - February 2023
For further information contact your local STMicroelectronics sales office.

Characteristics

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameters	Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (180° conduction angle) BTA40, BTA41 $T_c = 80\text{ °C}$ BTB41 $T_c = 95\text{ °C}$	40	A
I_{TSM}	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, T_j initial = 25 °C) $t_p = 16,7\text{ ms}$ $t_p = 20\text{ ms}$	420 400	A
I^2t	I^2t value for fusing $t_p = 10\text{ ms}$	1000	A ² s
di/dt	Critical rate of rise of on-state current $I_G = 2 \times I_{GT}$, $t_r \leq 100\text{ ns}$ $f = 120\text{ Hz}$ $T_j = 125\text{ °C}$	50	A/ μ s
V_{DSM}, V_{RSM}	Non repetitive surge peak off-state voltage $t_p = 20\text{ ms}$ $T_j = 25\text{ °C}$	$V_{DRM}, V_{RRM} + 100$	V
I_{GM}	Peak gate current $t_p = 20\text{ }\mu$ s $T_j = 125\text{ °C}$	8	A
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation $T_j = 125\text{ °C}$	1	W
T_{stg}	Storage junction temperature range	-40 to +150	°C
T_j	Operating junction temperature range	-40 to +125	°C

Table 2. Electrical characteristics ($T_j = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified) - standard (4 quadrants)

Symbol	Parameters	Quadrant	Values	Unit
$I_{GT}^{(1)}$	$V_D = 12\text{ V}, R_L = 33\text{ }\Omega$	I - II - III	Max. 50	mA
		IV	Max. 100	
V_{GT}	$V_D = V_{DRM}, R_L = 3,3\text{ k}\Omega, T_j = 125\text{ °C}$	I - II - III	Max. 1.3	V
V_{GD}		I - II - III	Min. 0.2	
$I_H^{(2)}$	$I_T = 500\text{ mA}$	I - II - III	Max. 80	mA
I_L		I - III - IV	Max. 70	
	$I_G = 1,2\text{ }I_{GT}$	II	Max. 160	mA
$dV/dt^{(2)}$			Min. 500	
$(dV/dt)_c^{(2)}$	$V_D = 67\text{ \% }V_{DRM}$ gate open, $T_j = 125\text{ °C}$		Min. 10	V/ μ s
	$(di/dt)_c = 20\text{ A/ms}, T_j = 125\text{ °C}$			V/ μ s

1. Minimum I_{GT} is guaranteed at 5 % of I_{GT} max.
2. For both polarities of A2 referenced to A1

Table 3. Static electrical characteristics

Symbol	Test conditions	T_j	Value	Unit
$V_{TM}^{(1)}$	$I_{TM} = 60\text{ A}, t_p = 380\text{ }\mu$ s	25 °C	Max. 1.55	V
$V_{TO}^{(1)}$	threshold on-state voltage	125 °C	Max. 0.85	V
$R_D^{(1)}$	Dynamic resistance	125 °C	Max. 10	m Ω
I_{DRM}/I_{RRM}	$V_T = V_{DRM}, V_T = V_{RRM}$	25 °C	Max. 5	μ A
		125 °C	Max. 5	mA

1. For both polarities of A2 referenced to A1

NOMBRE DEL TRABAJO

Jorge Chasi_Trabajo de Grado.docx

AUTOR

Jorge Chasi

RECuento DE PALABRAS

14358 Words

RECuento DE CARACTERES

76523 Characters

RECuento DE PÁGINAS

101 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

20.9MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 4, 2023 12:03 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 4, 2023 12:05 PM GMT-5**● 5% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base c

- 5% Base de datos de Internet
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossr
- 4% Base de datos de trabajos entregados

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado

