

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



PROYECTO DE TÍTULO

“Desarrollo, simulación e implementación de un banco de prueba para variadores de frecuencia, controlado por drive regenerativo”

Autores

Fernando Barahona Suazo

Claudio Quevedo Pérez

Proyecto de Seminario para Optar al Título de Ingeniero Civil en Automatización

Concepción - Chile, Octubre de 2016

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



PROYECTO DE TÍTULO

“Desarrollo, simulación e implementación de un banco de prueba para variadores de frecuencia, controlado por drive regenerativo”

Autores

Fernando Barahona Suazo

Claudio Quevedo Pérez

Proyecto de Seminario para Optar al Título de Ingeniero Civil en Automatización

Docente guía: Dr. Eugenio Wernekinck Armstrong,

Docentes co-guía: Mg. Jaime Rohten, Ing. Juan Antipil Ibáñez

Concepción - Chile, Octubre de 2016

Índice

1. RESUMEN Y OBJETIVOS.....	4
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.2 RESUMEN.....	5
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
2.1 PROBLEMÁTICA	6
2.2 SOLUCIÓN PLANTEADA	7
3. VARIADOR DE FRECUENCIA.....	8
3.1 INTRODUCCIÓN.....	8
3.2 FUNCIONAMIENTO DE VARIADOR DE FRECUENCIA.....	9
3.3 MÉTODOS DE CONTROL.....	13
3.3.1 <i>Control Escalar</i>	13
3.3.2 <i>Control DTC</i>	16
3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	20
3.5 APLICACIÓN INDUSTRIAL.....	21
3.6 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN	22
4. SISTEMAS REGENERATIVOS.....	28
4.1 INTRODUCCIÓN.....	28
4.2 TIPOS DE FRENADO EN MOTORES.....	28
4.2.1 <i>Frenado contramarcha o contra corriente</i>	29
4.2.2 <i>Frenado dinámico</i>	29
4.2.3 <i>Frenado regenerativo</i>	30
4.3 VARIADOR REGENERATIVO	30
5. MOTORES DE INDUCCIÓN.....	32
5.1 INTRODUCCIÓN.....	32
5.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	36
5.3 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	40
5.4 DEFINICIÓN DE CUADRANTES.....	42
5.5 VENTAJAS E INCONVENIENTES	43
5.6 MODELO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	44
6. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	48
6.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	49
6.1.1 <i>Procesador:</i>	50
6.1.2 <i>Memoria:</i>	50
6.1.3 <i>Entradas y salidas</i>	51
6.1.4 <i>Alimentación</i>	52

6.2	UNIDAD DE PROGRAMACIÓN.....	52
6.3	FUNCIONAMIENTO.....	52
7.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DEL BANCO DE PRUEBA	54
7.1	INTRODUCCIÓN.....	54
7.2	OBJETIVOS.....	55
7.3	SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR DE FRECUENCIA A PRUEBA	55
7.4	SIMULACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA REGENERATIVO	59
7.5	SIMULACIÓN DEL BANCO DE PRUEBA	64
8.	IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBA.....	70
8.1	INTRODUCCIÓN.....	70
8.2	DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA	70
8.3	DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS.....	71
8.4	FABRICACIÓN DE BASE PARA LOS MOTORES	75
8.5	ACOPLADO DE MOTORES	76
	8.5.1 <i>Objetivo</i>	76
	8.5.2 <i>Descripción Técnica del acople</i>	77
	8.5.3 <i>Factor de Servicio</i>	78
	8.5.4 <i>Implementación</i>	78
8.6	PROGRAMACIÓN DE PLC A TRAVÉS DEL SOFTWARE “RS LOGIX 500”	81
8.7	PROGRAMACIÓN DE PANTALLA HMI A TRAVÉS DEL SOFTWARE “CRIMSON 2.0”	88
8.8	IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.....	93
9.	RESULTADOS.....	94
10.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	98
11.	CONCLUSIÓN.....	99
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	100

1. Resumen y Objetivos

1.1 Objetivos

- Objetivo principal:

Diseñar e implementar un banco de prueba para realizar mantención preventiva y correctiva a los variadores de frecuencia con carga, en el laboratorio de la empresa Electromática Service SPA.

- Objetivos Específicos:

- Diseño e implementación de un banco de prueba para variadores de frecuencia, empleando dos motores de inducción acoplados y VDF regenerativo.
- Implementación de control a través de PLC.
- Diseño e implementación de pantalla HMI para la configuración y supervisión de parámetros.

1.2 RESUMEN

En este seminario se presenta el diseño e implementación de un banco de prueba, para realizar mantenimiento preventivo y correctivo a los variadores de frecuencia, en el laboratorio de la empresa Electromática Service SPA, con el propósito de mejorar el actual sistema de mantenimiento.

El banco de prueba consiste en el montaje de un variador de frecuencia en mantenimiento a un motor asíncrono de 7,5 [kW], el cual está acoplado a otro motor asíncrono de 15 [kW], que representa un proceso, esta carga está directamente conectada a un variador de frecuencia regenerativo, con el fin de obtener control y estabilidad en el sistema, por otro lado también se aprovecha de regenerar parte de la potencia requerida. Esta estructura con regeneración permitirá el ensayo de equipos de mayor potencia.

Para lo descrito anteriormente, se realiza un estudio y la descripción de las características generales de todos los equipos, dispositivos y motores involucrados, se detalla la conexión y configuración a través del software de los variadores de frecuencia (Drive Windows), PLC (RsLogix500) y HMI (Crimson). Además se define el tipo de acoplado óptimo, en función del esfuerzo mecánico en la transmisión del eje, producido por los motores eléctricos.

El modelo, simulación y análisis de resultados del banco de prueba, se realiza por medio del software Matlab- Simulink, con el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de las variables, verificar la estabilidad y proyectar las capacidades en potencia del proyecto.

Por último se realiza la implementación del banco de prueba, se lleva a cabo utilizando los motores y equipos disponibles en el laboratorio de la empresa. Para la automatización del proceso se utiliza el PLC Allan Bradley SLC 500, además se desarrolla el diseño de una pantalla HMI, para la configuración y supervisión de parámetros, conectado en red con el PLC a través del protocolo Ethernet/IP.

2. Planteamiento del problema

2.1 Problemática

En Electromática Service SPA, empresa dedicada a la venta y mantención de equipos e instrumentación para el control de procesos industriales, actualmente se dispone de un laboratorio para realizar pruebas de mantención a los variadores de frecuencia, alimentados por una red eléctrica trifásica de 380 [V], con capacidad máxima de 60 [A]. Sin embargo, en esta red no se puede realizar pruebas con altas cargas, siendo esto una gran desventaja, ya que no permite evaluar el comportamiento real de los controladores y así poder obtener la corrección precisa de los parámetros.

Por otra parte, tampoco se cuenta con algún tipo de control de frenado para el motor, que permita generar carga en el variador de frecuencia, producto a ello, la mantención de estos equipos no garantiza su correcto funcionamiento en planta.

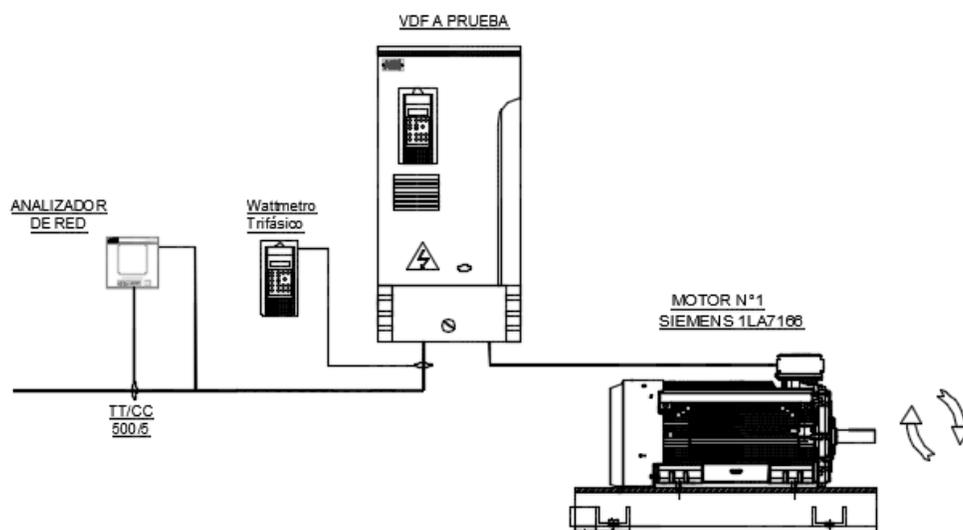


Figura N°1 “Diagrama general del sistema de mantención actual”

2.2 Solución Planteada

Un solución a ello es implementar un sistema regenerativo, que permita someter a pruebas con mayores cargas los variadores de frecuencia, para tener un ambiente más realista de lo que ocurre en planta, a través de la transformación de energía producida por fricción al frenar el motor, para producir carga y convertirla en energía eléctrica, por medio de un drive regenerativo.

Esta energía es inyectada nuevamente al variador, con el fin de abastecer la energía que se requiere entre la regenerada y la suministrada por la red, para controlar una carga estimada.

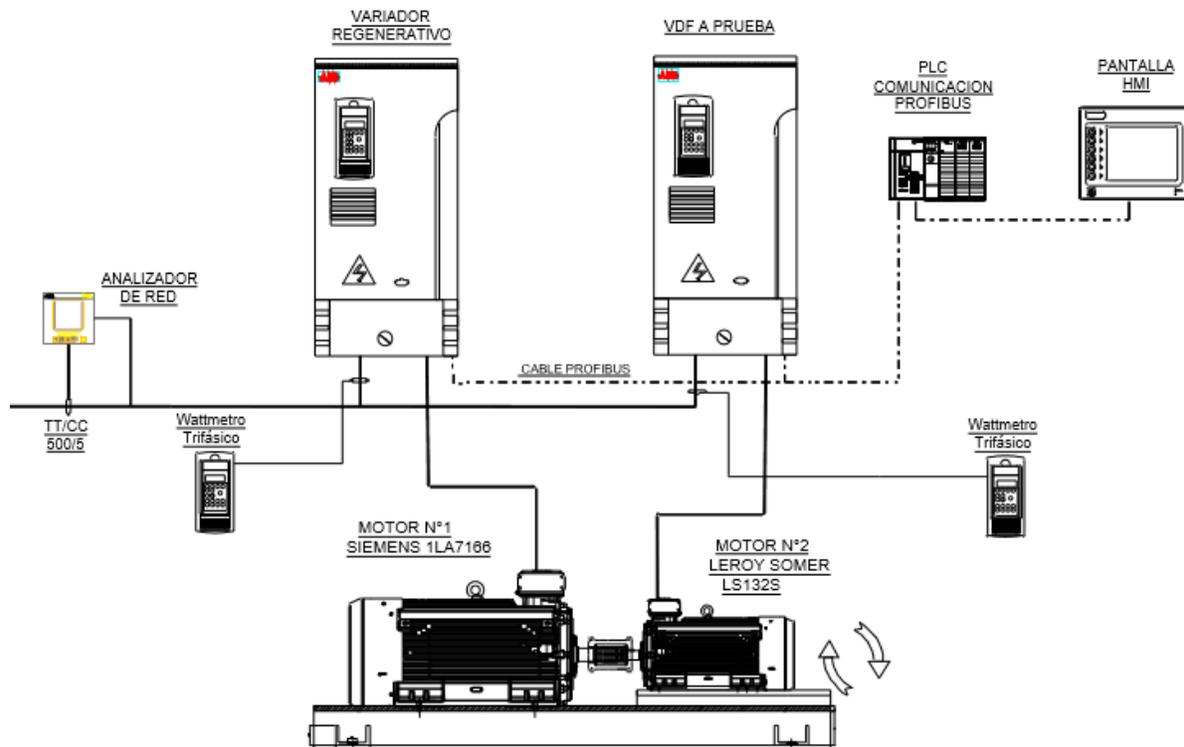


Figura N°2 “Diagrama general proyecto banco de prueba”

3. Variador de frecuencia

3.1 Introducción

Desde la revolución industrial, las empresas manufactureras, buscan impulsar la productividad de sus procesos, mejorar la eficiencia energética y reducir los costos de mantenimiento en base a la tecnología que, con el transcurso del tiempo se cuenta.

Constantes trabajos de investigación e innovación han generado satisfactorios resultados que contribuyen al desarrollo industrial, específicamente en la forma de operar, es donde la automatización industrial juega un rol clave.

En diversas industrias se requiere llevar a cabo operaciones mecanizadas, por medio de movimientos controlados a través de equipos que manejan el comportamiento de actuadores, generalmente motores eléctricos trifásicos, para ello, habitualmente se hace uso de variadores de frecuencia.



Figura N°3 “Variador de Frecuencia”

Un variador de frecuencia o convertidor de frecuencia es un dispositivo para el control de velocidad de motores de inducción de corriente alterna, el cual se alimenta con un voltaje y una frecuencia constante, y como salida al motor, entrega un voltaje y una frecuencia variable, cuya principal ventaja es contar con una velocidad deseada manteniendo la capacidad de toque de los motores y lograr que el sistema se haga más eficiente, lo que provoca un importante ahorro de energía.

3.2 Funcionamiento de variador de frecuencia

El variador de frecuencia está compuesto básicamente por circuitos que incorporan rectificación de la fuente de voltaje de entrada, una etapa de filtrado a través de un banco capacitivo y por transistores de potencia IGBT (transistor bipolar), siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica suministrada por la red (380 [V], 50 [Hz]) en energía eléctrica de frecuencia variable controlada.

Esquemáticamente, se puede representar por medio de un diagrama de bloques:

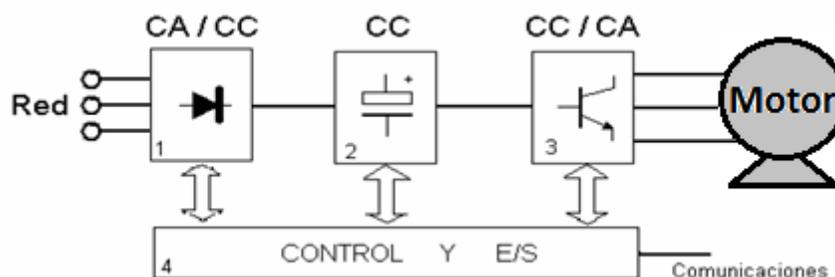


Figura N°4 “Diagrama de bloque de un variador de frecuencia”.

En la etapa rectificadora, se transforma la corriente alterna de cada fase en continua, con el propósito de que en la etapa de la inversión de continua pase nuevamente a alterna, con el propósito que se pueda generar frecuencias regulables con la cantidad mínima de armónicos, este ondulador de señal recibe el nombre de inversor.

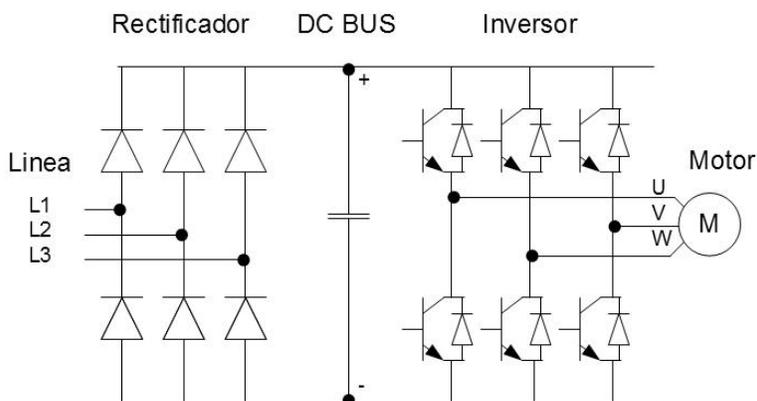


Figura N°5 “Circuito principal de un variador de frecuencia”.

En la figura N°5, se grafica el voltaje alterno que recibe el convertidor de frecuencia, el cual sus tres fases son convertidas a voltaje continuo, por medio de puentes rectificadores construidos por diodos.

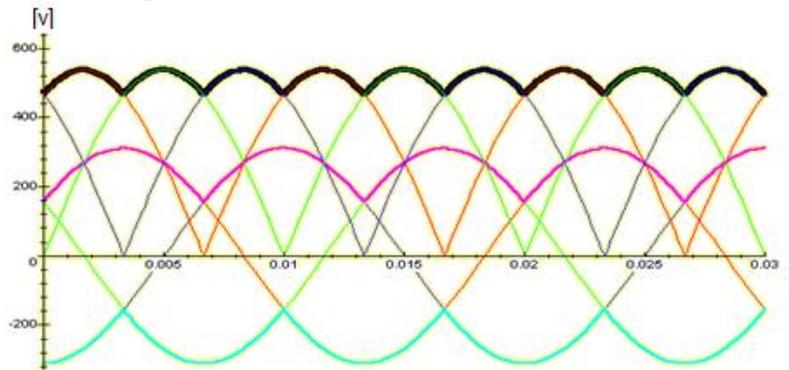


Figura N°6 “*Funcionamiento puente rectificador trifásico*”.

El fenómeno de la rectificación observada, se logra ya que los diodos se encuentran conmutando cíclicamente por las fases del voltaje alterno, lo que restringe al paso o bloqueo de la tensión, esta conmutación es denominada natural, ya que el funcionamiento se realiza dependiendo solo de la entrada sinusoidal para realizar esta conmutación.

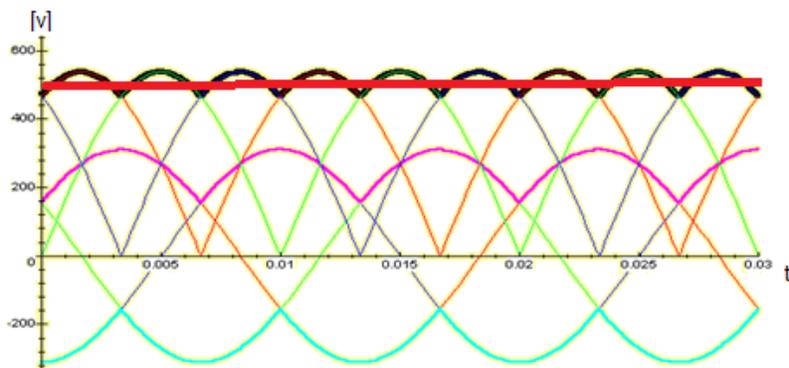


Figura N°7 “*Conversión AC/DC*”.

Luego de la rectificación de la señal de entrada, esta pasa por el DC Bus, el cual es el encargado de suavizar el voltaje rectificado y reducir las variaciones de señal rectificada (resultado en rojo, figura N°7). Esta etapa es fundamental, ya que es la que se utiliza en la etapa inversora.

Existen límites de operación en el DC Bus, en un rango de 500 a 560 [Vcc], del cual nos entrega información necesaria sobre el comportamiento del variador o una posible falla en él.

Uno de los tipos de rectificación que más se aplica en la industria de potencia es un rectificador de onda completa o puente de Graetz el cual está compuesto por seis diodos.

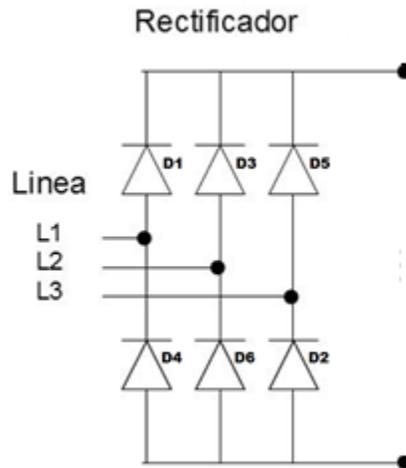


Figura N°8 “Rectificador trifásico puente de Graetz no controlado”.

Si al medir en el DC Bus, se encuentra por debajo de los 500 [Vcc], entonces el convertidor no es capaz de suministrar la energía necesaria a la etapa inversora, por lo que el motor no tendría un óptimo funcionamiento. Normalmente el equipo muestra una alarma de falla por bajo voltaje, esto se puede realizar porque el variador tiene control y protección en cada una de sus etapas, por lo que cualquier anomalía es detectada en un breve lapso de tiempo. Si se mide el DC Bus y se encuentra un elevado voltaje, nos estará indicando que el motor está generando energía hacia el variador, o sea estaría trabajando como generador eléctrico, pero si el variador no posee la característica de regenerativo, registra una falla.

Una vez realizado las etapas anteriores, se pasa a la etapa inversora, el cual está compuesta por transistores (IGBT), dispositivo semiconductor que opera como interruptor, controlado por una señal de disparo (pulsos) para generar una forma de onda cuadrada de voltaje continuo, en la que se cambia el ancho relativo respecto al periodo de la misma, este resultado de cambio es un ciclo de trabajo y es un proceso de conmutación llamado PWM (Modulación por ancho de pulso).

Principales parámetros que controla el variador de frecuencia:

Tensión de arranque inicial: es una variable que controla el variador de frecuencia para garantizar que el motor empiece a girar, que no exceda los valores característicos del motor y que no sobrecargue el variador de frecuencia, ya que en el arranque del motor se necesita una gran intensidad de corriente, por lo que es limitado y a la vez controlado, todo esto según los datos ingresados del motor en la programación de estos equipos.

Temperatura de trabajo del motor: los motores llevan incorporado un ventilador el cual cumple el objetivo de refrigerar al motor en condiciones normales pero al estar acoplado el ventilador al rotor del motor, esta regula la velocidad del motor y a la vez regula la velocidad del ventilador, por lo que a velocidades reducidas el ventilador no cumple su objetivo, por lo que la temperatura del motor aumenta, entonces hay que tener cuidado en la zona de trabajo que se encuentra el motor para que su temperatura no ascienda considerablemente.

Frenado: el frenado que proporciona el variador consiste en descender controladamente la velocidad, reduciendo la frecuencia que se aplica. Este descenso de velocidad es establecido como parámetro en unidades de tiempo.

Sentido de giro: otra de las características esenciales del variador es que puede hacer girar el motor en ambos sentidos. Al estar en marcha el motor y realizar un cambio de sentido, este no es brusco, sino que lo realiza mediante rampas de desaceleración, parada y aceleración controlada.

3.3 Métodos de control

El variador de frecuencia, es capaz de programarse según el tipo de proceso al cual será implementado, dado que algunos requieren de un perfil simple de velocidad constante en motores, y otros requieren un tipo de respuesta más precisa y rápida al torque, por ejemplo, la implementación de un motor en un ascensor o la producción de materiales en bobinas (rollos de alambre, papel, cartón, etc).

Estos métodos son programados en el menú de configuración del variador, llamado control escalar, el cual su variable de referencia es en Hertz que hace directo control con la velocidad del motor en [Hz], o a través de DTC “control directo de torque” del cual su variable de referencia es directamente la velocidad del motor en [rpm].

3.3.1 Control Escalar

El control escalar es una forma común para el control de velocidad de los motores. En este tipo de control, el motor se alimenta con una frecuencia variable de las señales generadas por modulación de ancho de pulso de un inversor. La relación v/f se mantiene constante para obtener así un par constante en todo el rango de operación de los motores. Dado que las variables de entrada se controlan, se conoce esto como control escalar, esta solución se convierte en un recurso a bajo costo y fácil de implementar, siendo así el control escalar ampliamente utilizado.

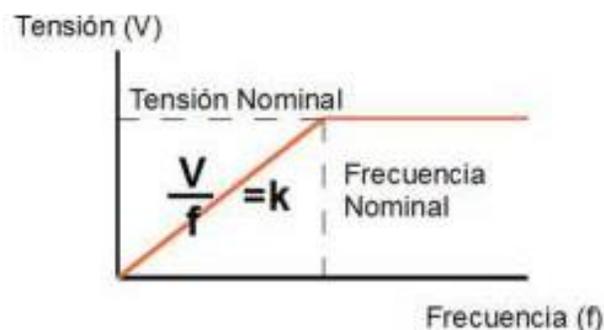


Figura N°9 “relación voltaje/frecuencia en control escalar”.

La velocidad de referencia impone una frecuencia y el variador calcula la tensión para mantener el flujo constante. Sin embargo si no efectuamos ninguna compensación la

velocidad real varía con la carga (deslizamiento), limitando la exactitud de funcionamiento. Las señales generadas por los inversores son producto de la modulación por ancho de pulsos (o Pulse width modulation PWM), es un tipo de modulación de señal de voltaje, el que es utilizada para enviar información o modificar la cantidad de energía que requiere la carga. Es común utilizar esta modulación en circuitos digitales que necesitan emular una señal análoga. El tipo de señales de salida es de forma cuadrada o sinusoidal y el cambio de ciclo de trabajo de este tipo de modulación representada en porcentaje es:

$$D = \frac{\tau}{T} * 100\%$$

Donde:

D = Ciclo de trabajo

τ = tiempo en que la señal es positiva

T = Periodo

Para realizar la modulación de la señal de voltaje alterno, se cambia el ciclo de trabajo de tal manera que el promedio de este cambio sea el voltaje de la señal sinusoidal, que se requiera obtener. Los valores entregados por la modulación PWM se encuentran entre 0 [V] y el máximo que soporte el dispositivo de esta modulación.

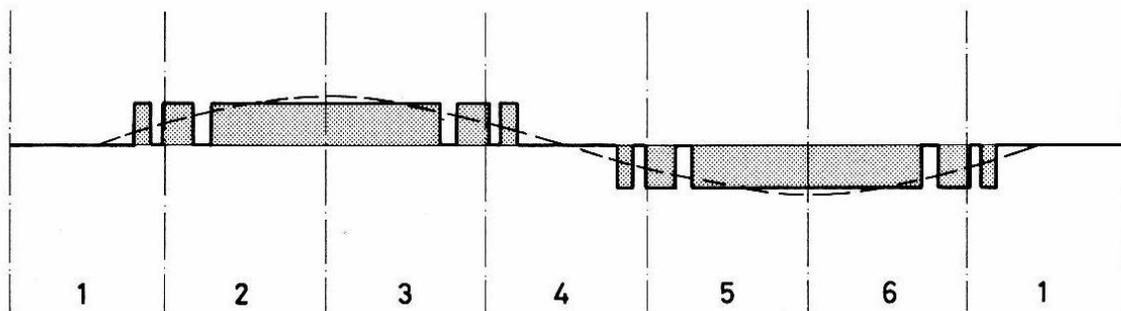


Figura N°10 “Modulación PWM en una señal alterna”

Por lo que, al observar la figura superior, a través del promedio de los anchos de pulso se obtiene la señal sinusoidal que es entregada a la salida, por lo que a través de estos anchos de pulsos, se logra poseer el control de la magnitud y la periodicidad de estos patrones, controla la frecuencia de la onda, y así controlar la velocidad del motor.

Se debe tener en consideración que los variadores de frecuencia industriales poseen una etapa de control, que es la encargada de activar y desactivar los IGBT que entregan la señal de salida correspondiente a la velocidad que se desea. Además esta etapa de control tiene la característica que permanentemente está vigilando todas las variables necesarias y que ante cualquier perturbación innecesaria es corregida, al no ser así, el equipo señala una falla.

Una vez que la señal de entrada pasa por cada una de las etapas descritas, llega al motor, y cargando los parámetros del motor, el variador de frecuencia puede controlar la velocidad en el eje del motor trifásico, que depende del número de polos magnéticos y la frecuencia, esta relación de velocidad está dada por la siguiente ecuación:

$$Nm = \frac{120 * f(1 - s)}{P}$$

Donde:

Nm = Velocidad mecánica (rpm).

f = frecuencia de alimentación (Hz).

s = deslizamiento (adimensional).

P = número de polos.

Cada motor fabricado es diseñado para que trabaje en una velocidad nominal de trabajo, pero mediante el variador de frecuencia se puede proporcionar frecuencias superiores a la de trabajo, por lo que su velocidad puede ser mayor a la velocidad nominal, pero al lograr estas velocidades el torque que entrega no es el mismo y este comportamiento está dada por la siguiente expresión:

$$T = 9550 * \frac{P}{n} \quad o \quad T = K * \left(\frac{U}{f}\right)^2$$

Donde:

T = par motriz

$K = 9550 = \text{constantes}$

U =Tensión aplicada al estator

f =frecuencia [Hz]

P =potencia del motor [watts]

n =velocidad del motor [RPM]

Cabe señalar que, operando un motor a baja velocidad a través del control escalar, por lo general bajo los 20[Hz], el torque producido por el motor, es inferior al torque generado a través del control DTC.

3.3.2 Control DTC

Para corregir este problema la mayor parte de los variadores funcionan mediante Control Vectorial de Flujo. El variador trabaja en bucle abierto pero identificando las variables del motor:

- Tensión nominal.
- Intensidad nominal.
- Factor de potencia.
- Velocidad nominal en r.p.m.

El control directo de par describe la manera en la que el control del par y de la velocidad se basan directamente en el estado electromagnético del motor, del cual controla las variables de control reales de par y flujo electromagnético del motor.

Dado que el par y el flujo son parámetros que se controlan de forma directa, no es necesario utilizar un modulador, como en el caso de un modulador PWM, para controlar la frecuencia y la tensión. Con ello, se elimina el intermediario y se acelera considerablemente la respuesta del accionamiento ante cambios en el par requerido. Además, el DTC ofrece un control preciso del par sin necesidad de utilizar un dispositivo de retroalimentación en cualquier motor jaula de ardilla asincrono, gracias al sofisticado modelo de motor y a la habilidad de realizar 40.000 cálculos por segundo, un accionamiento DTC sabe con exactitud lo que está haciendo el eje del motor.

Una característica de DTC que contribuye a un uso eficaz de la energía es la denominada optimización del flujo del motor. Con esta función, la eficacia del accionamiento completo (es decir, el regulador y el motor) mejora de forma considerable en las aplicaciones de bombas y ventiladores. Por ejemplo, con una carga del 25% hay hasta un 10% de mejora del uso eficaz de la energía total. Con una carga del 50% la mejora puede ser del 20%. Esto tiene un impacto directo sobre los costes de funcionamiento. Esta función también reduce de forma notable el ruido del motor en comparación con el ruido generado por la frecuencia de conmutación de un accionamiento PWM convencional.

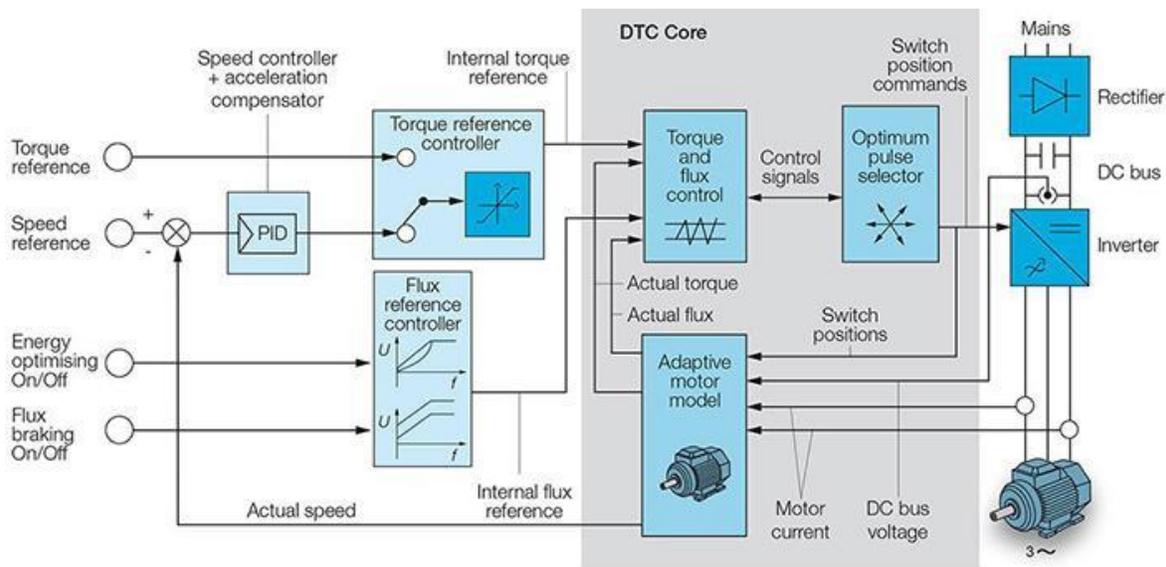


Figura N°11 “Bloques del control directo del par DTC”

El diagrama de bloques muestra que el DTC tiene dos secciones fundamentales: el bucle de control del par y el bucle de control de velocidad. A continuación se detalla estos bloques, en cada una de las fases y como se integran entre sí.

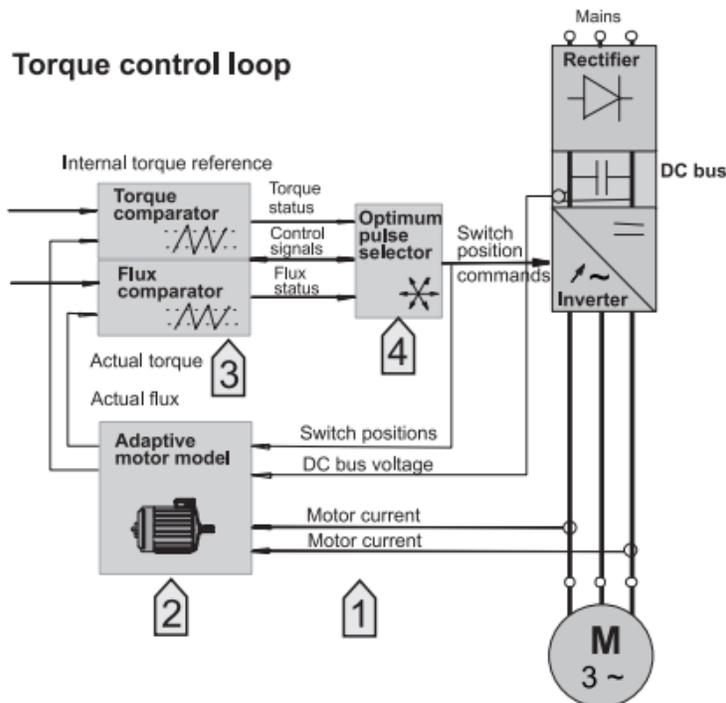


Figura N°12 “Bucle de control del par”

Fase 1: Durante el funcionamiento normal, se miden simplemente dos intensidades de fase del motor (ejemplo fase a y c) y la tensión de bus de CC, junto con las posiciones de los conmutadores del inversor.

Fase 2: La información medida del motor alimenta al modelo de motor adaptable. Antes de iniciar el accionamiento DTC, el modelo de motor recibe información sobre el motor, que se recoge durante la marcha de identificación del motor. A este proceso se le denomina autoajuste y, junto con la inercia del motor, se determinan datos tales como la resistencia del estator, la inductancia mutua y los coeficientes de saturación. La identificación de los parámetros del modelo de motor puede efectuarse sin que gire el eje del motor. La calibración extremadamente precisa del modelo de motor se logra cuando la marcha de identificación incluye también el accionamiento del eje del motor durante algunos segundos. La velocidad del eje también se calcula en el modelo de motor.

Fase 3: La información para controlar los conmutadores de alimentación se produce en el comparador de par y en el de flujo. Tanto el par real como el flujo real se alimentan a los comparadores, donde son comparados cada 25 microsegundos con un valor de referencia del par y del flujo. Las señales de estado del par y del flujo se calculan utilizando un método de control de histéresis de dos niveles. A continuación, estas señales se alimentan al selector de pulsos óptimos.

Fase 4: Para determinar la lógica de conmutación del inversor, en el selector de pulsos óptimos se encuentra el procesador más avanzado de señales digitales de 40MHz (DSP). Además, todas las señales de control se transmiten por enlaces ópticos para conseguir una transmisión de datos de alta velocidad. Esta configuración ofrece una gran velocidad de procesamiento de modo que, cada 25 microsegundos, se suministra un pulso óptimo a los dispositivos de conmutación del semiconductor del inversor para alcanzar o mantener un par preciso del motor. La combinación correcta de los conmutadores se determina en cada ciclo de control. No existe un patrón determinado de los conmutadores. El DTC también es denominado conmutación “justo a tiempo”, porque, a diferencia de los accionamientos

PWM convencionales, donde hasta el 30% de todos los cambios de conmutación son innecesarios, en el DTC, todos y cada uno de los conmutadores son necesarios y se utilizan. Con ello se obtiene una respuesta extremadamente rápida en el eje que es necesaria para que el modelo de motor pueda actualizar esta información. Es gracias a esta velocidad de procesamiento que se obtienen cifras tan elevadas de rendimiento.

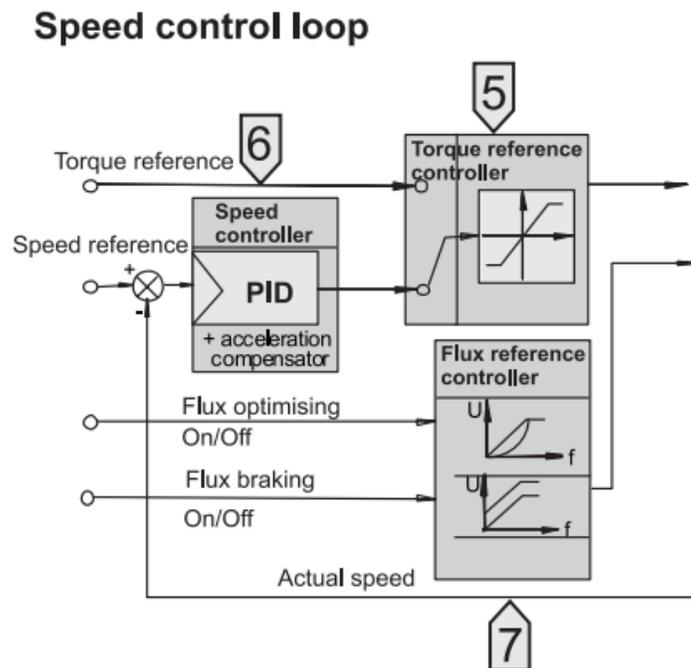


Figura N°13 “Control de velocidad”

Fase 5: En el regulador de la referencia del par, el valor de salida de control de la velocidad está limitado por los límites de par y la tensión de bus de CC. También incluye el control de la velocidad para casos en los que se utiliza una señal de par externa. La referencia de par interna de este bloque se alimenta al comparador de par.

Fase 6: El bloque regulador de la velocidad se compone de un regulador PID y de un compensador de aceleración. La señal de referencia de velocidad externa se compara con la velocidad real producida por el modelo de motor. La señal de error se alimenta entonces tanto al regulador PID como al compensador de aceleración. El valor de salida es la suma de los valores de salida de ambos.

Paso 7: El regulador de la referencia de flujo puede dar un valor absoluto del flujo del estator al bloque comparador de flujo. La capacidad de controlar y modificar este valor absoluto ofrece una manera fácil de realizar muchas funciones del inversor, tales como la optimización del flujo y el frenado del flujo.

3.4 Ventajas y desventajas del variador de frecuencia

- **Ventajas:**
 - Permite variar y controlar la velocidad.
 - Reemplaza sistemas mecánicos reductores de velocidad.
 - Optimiza el consumo de energía en función a la velocidad del motor.
 - Evita sobre-intensidades en las partidas del motor, controlado por el tiempo y la corriente en ese instante. Además de controlar la partida y parada dependiendo de la carga que posea.
 - El par se controla a cualquier velocidad, evitando saltos o bloqueos del motor ante cualquier variación en la carga.
 - Posee una comunicación mediante bus industrial, esto permite conocer el estado en tiempo real del variador y el motor.
 - Ayuda en la protección del motor, del variador y de la línea.
 - Robusto y confiable en la operación continúa de un proceso.

- **Desventajas:**
 - Instalación, programación, mantención y cualquier problema debe realizarse con personal especializado.
 - Si no posee buena aislación, puede derivar ruidos e interferencias en la red eléctrica.

3.5 Aplicación Industrial

Los variadores de frecuencia se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como dispositivo de control de velocidad de los motores, usados para el accionamiento de ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipo de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadoras, tornos y fresadoras, etc. Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. El uso de variadores de frecuencia como dispositivo de control está reemplazando ampliamente el uso de motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua, ya que permite controlar otras variables utilizadas en los procesos industriales, como ejemplo el control de torque. También es altamente útil para monitorear y modificar estados desde una sala de control, a través de sus puertos de comunicación, sin la necesidad de programar o modificar estados desde el mismo variador.

A continuación se ilustra como ejemplo una aplicación industrial en la que se utiliza variadores de frecuencias en el proceso industrial.

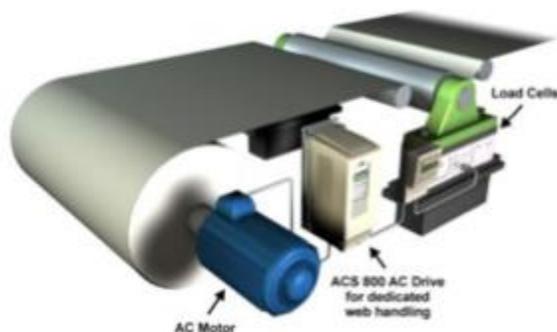


Figura N°14 “Control bobinadora (Winder)”

El objetivo de la aplicación es controlar el proceso de enrollado de una línea de laminado de papel, sin depender del diámetro del rollo, que es variable durante todo el proceso, ni en el ángulo de partida del motor, todo esto en función de la velocidad de línea que es constante.

Básicamente consta de una celda de carga, que mide esfuerzo mecánico de la línea de producción de papel, instalado con el objetivo de mantener una tensión constante en el

proceso, esta traduce la magnitud física a una señal análoga, enviada a una tarjeta de conversión de potencia y posterior al variador de frecuencia, quien comanda la velocidad del motor para este proceso.

3.6 Software de Programación

Es importante contar con una herramienta que permita establecer una comunicación gráfica de todas las funciones existentes que nos entregan los variadores de frecuencia en tiempo real, una solución que ofrece para la industria la marca ABB es un software para los equipos de la serie ACS800, llamado DriveWindows, el cual entrega operaciones que permite navegar, supervisar variables del variador, realizar copias de seguridad, restaurar funciones, guardar editar y descargar parámetros de información configurada según el proceso, entre otras.

DriveWindows es una herramienta de interfaz moderna de puesta en servicio y mantenimiento, basada en OPC. El servidor OPC es un aplicación que nos permite crear una interfaz de comunicación por un lado con una o más fuentes de datos utilizando protocolos nativos (PLCs, DCSs, etc) y por otro lado con clientes OPC (SCADAS, HMIs), esta comunicación es Cliente OPC y Servidor OPC es bidireccional, lo que permite que el cliente pueda leer y escribir en los dispositivos a través de este servidor permitiendo realizar:

- Operación de Control (marcha, paro, referencias, etc.)
- Monitorear señales y parámetros
- Modificar parámetros
- Visualizar fallas y controles
- Realizar todas las funciones de red.

Otra función que soporta OPC es conectar los controladores como maestro/esclavo, dando origen a conectar los equipos de dos formas, el cual dependiendo del tipo de conexión que se realice es la cantidad de equipos que se pueden enlazar al mismo software:

1.-Conexion Local:

La conexión local consiste en que el driver se conecta de forma directa al computador, esto se realiza mediante la conexión tipo directa, a través de distribuidor óptico y anillo.



Figura N°15 "Conexión de comunicación directa"

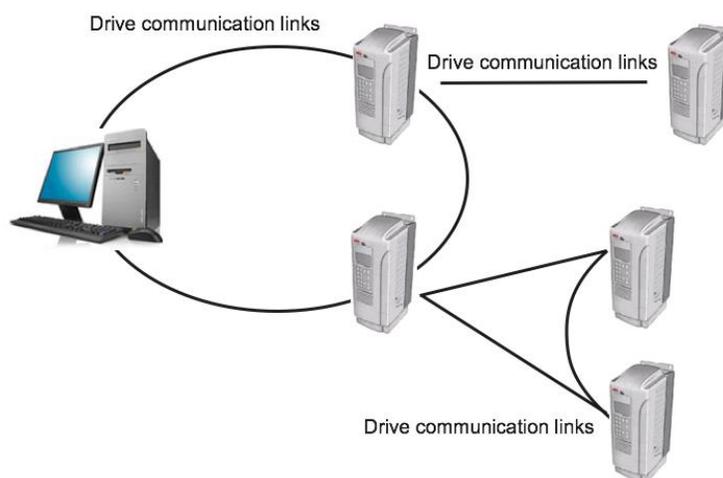


Figura N°16 "Conexión distribuidor óptico o tipo árbol"



Figura N°17 "Conexión tipo anillo"

Para que estas conexiones locales no tengan ningún problema, se debe tener conocimiento que cada drive conectado a la red debe poseer un numero identificador distinto, para evitar copias de identidad al momento de que el DriveWindows comienza con la comunicación entre los puntos.

2.- Conexión Remota:

Esta conexión da la posibilidad de conectar varias unidades a un mismo DriveWindow a una red remota, en este caso el PC remoto, actúa como servidor en el que el software posee acceso total a todas las unidades conectadas a la red.

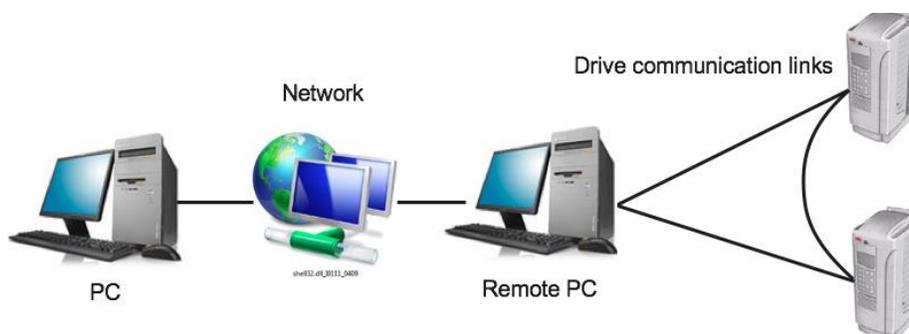


Figura N°18 “Conexión de comunicación remota”

Interfaz con el Usuario

Una vez instalada la aplicación DriveWindow se deben seguir los siguientes pasos:

Paso1: Iniciar DriveWindow, se debe seleccionar un servidor y aceptar.

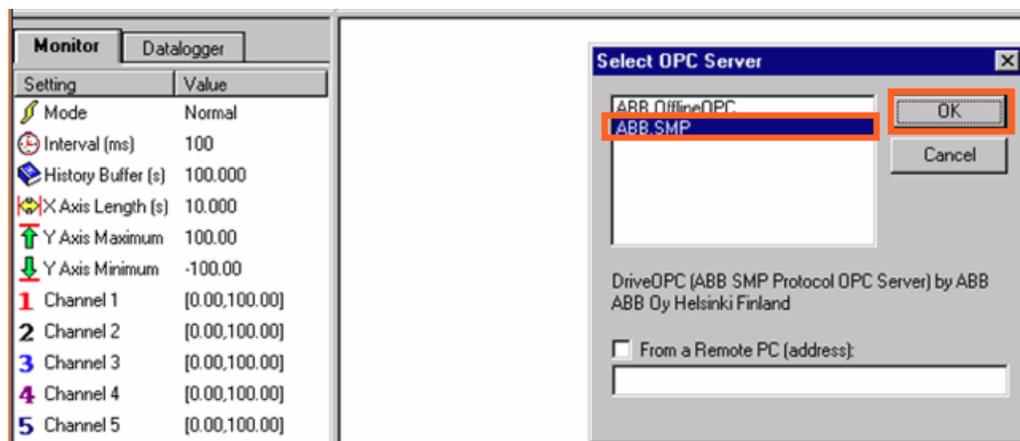


Figura N°19 “Selección del servidor OPC”

Paso2: Una vez iniciada el software nos mostrara lo siguiente:

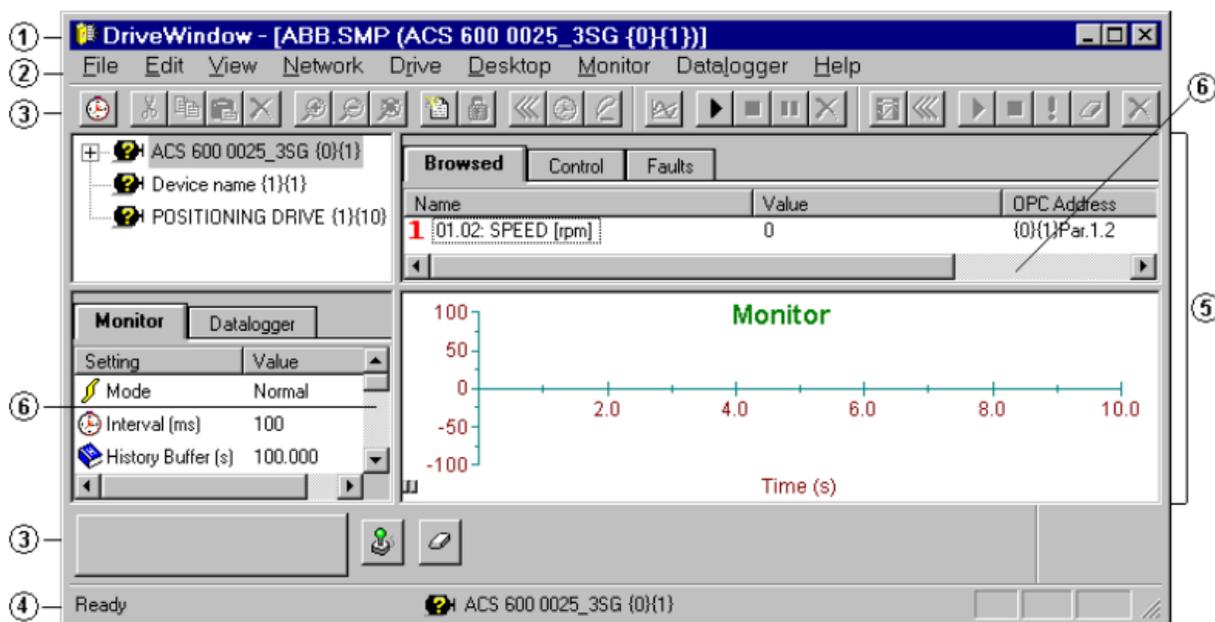


Figura N°20 “Interfaz Drive Windows”

La interfaz del usuario está compuesta por los siguientes elementos:

1. Barra de título, se visualiza el equipo que esta seleccionado para trabajar.
2. Barra de menús, contiene los principales menús (archivo, edición, ver, red, etc.)
3. Barra de herramientas, muestra las barras principales que son utilizadas comúnmente, además posee botones que toman el control del drive local/remoto, en el caso que se requiera el drive en remoto, el programa muestra la siguiente barra de herramientas:

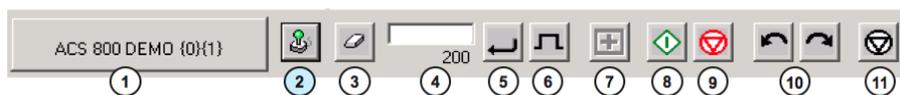


Figura N°21 “Barra de herramienta”

Donde:

- 1) Nombre y dirección de la unidad seleccionada
- 2) Botón para elegir local / remoto
- 3) Borrar registro de fallas.

- 4) Entrada de referencia frecuencia (escalar) y velocidad (DTC)
- 5) Ajuste de referencia
- 6) Botón de Paso (DW 2.1)
- 7) Reset
- 8) Start
- 9) Stop
- 10) Sentido de rotación
- 11) Botón de parada

4. Barra de estado, indica el estado del motor seleccionado, la representación visual nos indica:

-  Fallo y sentido (hacia delante).
-  Fallo y sentido (no hacia delante).
-  Sin funcionamiento, advertencia y sentido (hacia delante).
-  Sin funcionamiento, advertencia y sentido (no hacia delante).
-  Sin funcionamiento y sentido (hacia delante).
-  Sin funcionamiento y sentido (no hacia delante).
-  En funcionamiento, advertencia y sentido (hacia delante).
-  En funcionamiento, advertencia y sentido (no hacia delante).
-  En funcionamiento y sentido (hacia delante).
-  En funcionamiento y sentido (no hacia delante).
-  Otro estado (la indicación de estado está fuera de línea o no es posible leer el estado, por ejemplo).

5. Área de Ventana: Visualiza las variables seleccionadas en tiempo real con valores numéricos e interpreta su comportamiento dinámico a través de una gráfica, de escala ajustable de las variables de manera independiente.

6. Desplazamiento de la ventana, con el fin de mostrar toda la información de la selección de lo que se requiera graficar, por ejemplo, ampliar la barra de monitor, en

la que se enlaza el canal “channel x” a una variable de monitoreo, por ejemplo revoluciones por minuto, % de par, voltaje del bus de continua, potencia, etc.

Monitor	
Setting	Value
 Mode	Normal
 Interval (ms)	100
 History Buffer (s)	100.000
 X Axis Length (s)	10.000
 Y Axis Maximum	100.00
 Y Axis Minimum	-100.00
1 Channel 1	1.00 * x + 0.00
2 Channel 2	1.00 * x + 0.00
3 Channel 3	1.00 * x + 0.00
4 Channel 4	1.00 * x + 0.00
5 Channel 5	1.00 * x + 0.00
6 Channel 6	1.00 * x + 0.00

Figura N°22 “Barra de herramienta”

- Mode: cambia modo de monitorización rápida o normal.
- Interval: permite cambiar el intervalo de la monitorización
- History: modifica el tamaño del buffer de historial del monitor, o sea la información almacenada por el monitor.
- X Axis length: Duración del eje X del gráfico.
- Y Axis maximum: Valor máximo del eje Y del gráfico.
- Y minimum: Valor mínimo del eje Y del gráfico.
- Channel 1 – Channel 6: Elemento a monitorizar, con un máximo de 6 variables que se deben seleccionar en los parámetros “Actual Signals”. En el caso que los valores graficados excedan los límites ingresados en Y axis maximum/minimum es necesario modificar la variable Value de cada Channel.

No es necesario vincular los 6 canales, solo las variables que se desean medir y monitorear.

4. Sistemas regenerativos

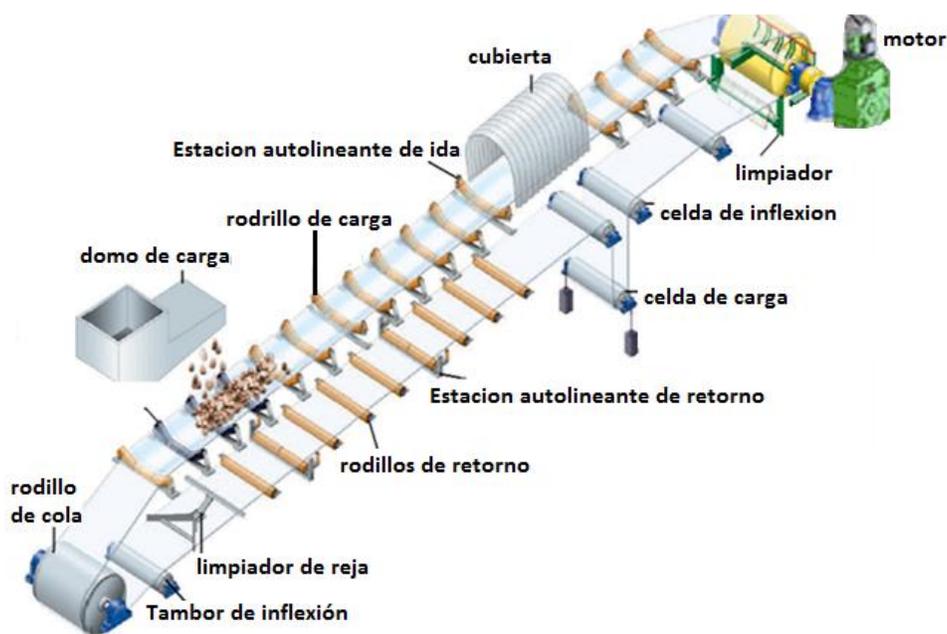


Figura N°23 “Freno Regenerativo en una cinta transportadora”

4.1 Introducción

Los sistemas regenerativos, han impulsado una gran ventaja respecto a la eficiencia energética y política ambiental en las empresas, ya que en ciertos procesos, por ejemplo, una cinta transportadora, que acarrea material desde un molino en altura hacia algún deposito a nivel de suelo, es posible aprovechar la inercia que nos entrega la cinta, controlando la velocidad, a través del frenado regenerativo, generando energía hacia la red y no desperdiciando la energía en mantener la velocidad con frenos mecánicos y disipando calor.

4.2 Tipos de frenado en motores

Si un motor eléctrico se desconecta de la línea de alimentación, debido a la inercia, este tarda algún tiempo en detenerse, también puede acelerarse o empezar a girar en sentido contrario después de estar detenido producto de la carga, todo depende del proceso al cual está implementado, por ejemplo en puentes grúa, montacargas, ascensores. Etc.

Cuando por necesidad del proceso, se desea que pare rápidamente después de desconectar el motor de la línea de alimentación, o bien, que se pueda disminuir su velocidad, se recurre a algún tipo o sistema de frenado que haga esto posible.

4.2.1 Frenado contramarcha o contra corriente

El sentido de giro del rotor de un motor trifásico asíncrono, se determina según el sentido que gira el campo magnético. Cuando el motor está funcionando en un sentido de giro determinado a velocidad de régimen, si se invierten la conexión de los conductores de fase del estator, el sentido de campo giratorio es opuesto al sentido de giro del rotor, y el deslizamiento resulta superior a la unidad. Esta circunstancia provoca un enérgico par de frenado, ya que el campo giratorio tiende a arrastrar al rotor en sentido contrario al de su marcha.

Como el frenado a contramarcha o contracorriente se opone a la inercia de la carga, este sistema puede emplearse eficazmente para conseguir rápidas desaceleraciones de motores que arrastran cargas de inercia, como por ejemplo en máquinas herramientas. En cambio, este sistema de frenado no puede utilizarse en máquinas elevadoras (grúas, montacargas, ascensores, etc.).

4.2.2 Frenado dinámico

El frenado dinámico en los motores de inducción, se obtiene al sustituir la alimentación de corriente alterna por una corriente continua. En tales condiciones, se produce un campo magnético estacionario con igual número de polos a los que tiene el motor con el campo giratorio de corriente alterna. Los conductores del rotor (jaula de ardilla) cortan el campo estacionario de c.c. Se generan tensiones acompañadas de corrientes en dichos conductores, en los cuales la energía eléctrica generada se disipa en forma de calor ($I^2 * R$). La efectividad o rapidez de la acción de este freno depende de la magnitud de la corriente aplicada. Pero en todo caso, esta magnitud no debe ser mayor de seis a ocho veces la corriente nominal del motor.

4.2.3 Frenado regenerativo

Este tipo de frenado se realiza en dos situaciones, la primera cuando la velocidad del rotor es mayor a la velocidad asincrónica nominal del motor en el mismo sentido de giro, producto de un proceso en donde la carga tiende a acelerar el motor, por ejemplo ascensores, grúas, cintas transportadoras etc., permitiendo que este motor cambie su función de motor a generador, logrando devolver energía a la fuente de alimentación., otra situación es cuando la carga “se lleva” al motor en sentido contrario teniendo al motor eléctricamente girando en un sentido, pero mecánicamente girando en sentido contrario. Básicamente el frenado regenerativo es una mejora del frenado dinámico, ya que la energía del freno dinámico se disipa en la resistencia, mientras que el regenerativo aprovecha esa energía inyectándola en la red eléctrica. Por lo tanto, en los sistemas regenerativos es importante el fenómeno que ocurre en los sistemas de frenados eléctricos, ya que la energía es aprovechada en el momento que se necesite frenar o disminuir la velocidad de los motores.

4.3 Variador regenerativo

Un variador de frecuencia regenerativo o convertidor de frecuencia regenerativo, es un dispositivo al igual que un variador de frecuencia común, controla la velocidad de motores de inducción de corriente alterna, el cual se alimenta con un voltaje y una frecuencia constante, y como salida al motor, entrega un voltaje y una frecuencia variable, cuya principal ventaja es contar con una velocidad deseada, manteniendo la capacidad de torque de los motores y el sistema se hace más eficiente, lo que provoca un importante ahorro de energía, sin embargo, incluye la particularidad que aprovecha la energía cedida por la carga, cuando la operación se encuentra en el II o IV cuadrante del motor, esa energía es capturada por medio del frenado regenerativo y transformada en energía eléctrica, la que a través de los IGBT, es sincronizada con la frecuencia de la red e inyectada en ella. Más adelante se explicará con mayor detalle cómo se logra este objetivo.

La siguiente figura representa el diseño electrónico del banco de prueba, del cual se presenta la estructura interna del variador de frecuencia a prueba (marco azul) y del variador de frecuencia regenerativo (marco rojo).

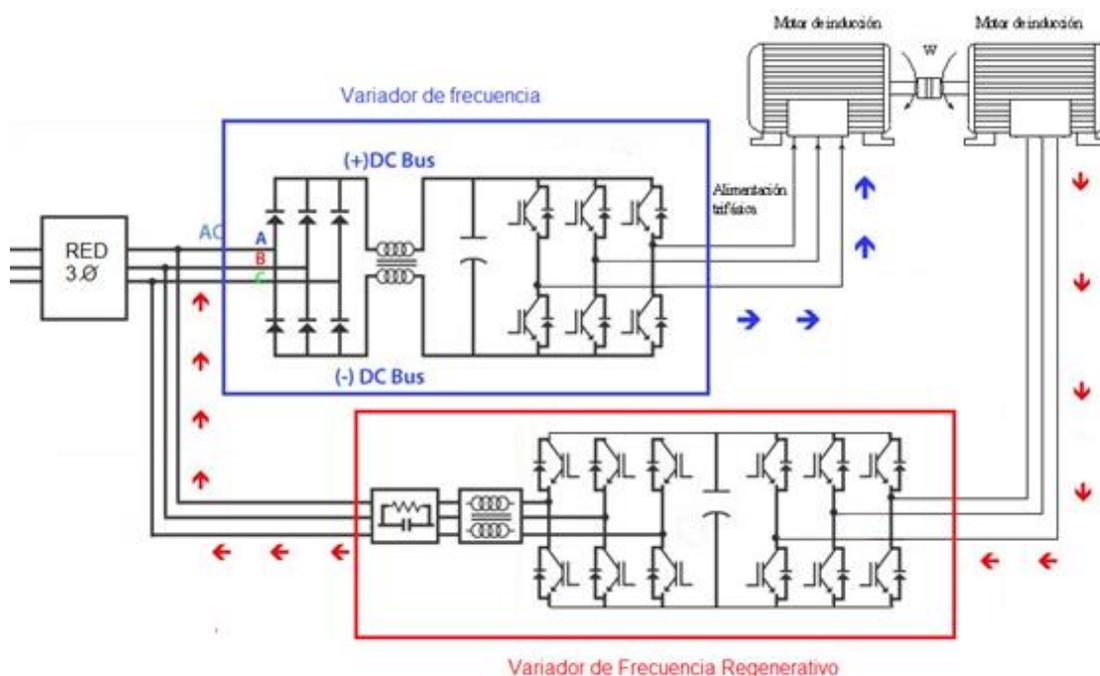


Figura N°24 “Diagrama Electrónico sistema regenerativo”

Si se compara en la figura N°24, el variador de frecuencia (azul) con el variador de frecuencia regenerativo (rojo), se observa que el drive regenerativo tiene doble puente de IGBT, ya que es capaz de convertir la entrada de voltaje alterno en voltaje continuo, que luego, a través de los IGBT transforma la tensión continua en una serie de pulsos realizados por la modulación PWM, el cual controla la amplitud y la frecuencia hacia el motor y también, en su modo de regenerador, es capaz de captar la energía cedida por el proceso (carga) a través del freno regenerativo y realizar el proceso inverso, entregando una tensión trifásica alterna con armónicos de corriente, que luego al pasar por los distintos procesos de rectificación, se obtiene un voltaje continuo, y posterior, a través de la modulación PWM, disparar los IGBT para que en su salida se obtenga una tensión sinusoidal que es inyectada sin desfases a la red.

5. Motores de Inducción

5.1 Introducción.

Faraday, Michael (1791–1867), científico británico, fue el que descubrió el principio de los dispositivos de rotación electromagnética, innovación propulsora para el motor eléctrico, él descubrió que la inducción es la generación de una corriente eléctrica en un conductor en movimiento en el interior de un campo magnético ffsico. A partir de ese descubrimiento se potenció el estudio sobre la electrónica. Para calcular la inducción magnética se tiene que aplicar la Ley de Faraday-Lenz, la cual relaciona la fuerza electromotriz (FEM), inducida sobre un conjunto de espiras con la variación del flujo magnético

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Dónde:

ε : Tensión inducida (V).

N : Número de espiras.

Φ : Flujo del campo magnético (Wb).



Figura N°25 “Motor eléctrico”

Los motores eléctricos son máquinas rotativas capaces de convertir la energía eléctrica en energía cinética, la mayoría de los motores eléctricos comprenden una parte estacionaria, el estator, y una parte giratoria, el rotor; la estructura del rotor y del estator se

ve diferente en función del tipo de máquina eléctrica utilizada, asíncrona y máquinas síncronas.

Según la naturaleza de la corriente eléctrica, quien es la fuente de energía de los motores eléctricos, se construye y clasifican en motores de corriente continua, (DC), y motores de corriente alterna (AC), de los cuales están diseñados en motores asíncronos (inducción) y motores sincrónicos, cada uno tiene su ventaja en relación al tipo de trabajo que se desea emplear.

Los motores de corriente alterna son un tipo de motor que por lo general, son los más usados en la industria, producto a que cumplen con ciertas características, tales como baja mantención, confiables, robustos, fáciles de controlar y un excelente rendimiento a un costo accesible. Los motores CA, tienen una estructura similar a los DC, considerando variaciones en la fabricación de los bobinados y el conmutador del rotor ya no es necesario, producto que el tipo de señal AC genera polaridad. Según su sistema de funcionamiento, si el rotor tiene la misma velocidad de giro que la del campo magnético rotativo, se dice que el motor es síncrono, y por el contrario, si el rotor tiene una velocidad de giro mayor o menor que dicho campo magnético rotativo, el motor es asíncrono de inducción.

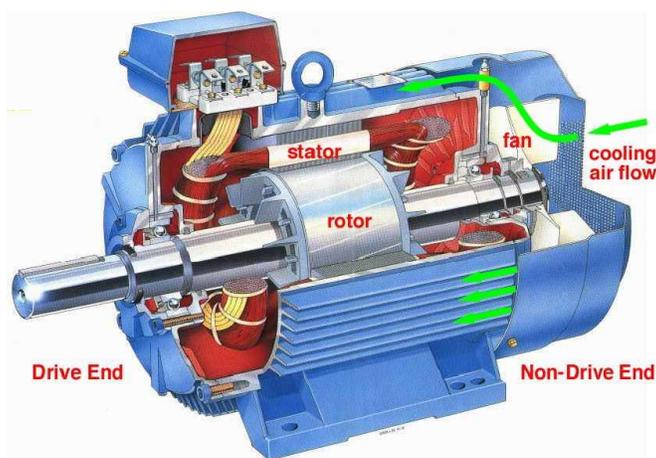


Figura N°26 “Arquitectura motor eléctrico AC”

El motor de inducción es el motor de corriente alterna más utilizada en aplicaciones industriales, se fabrican con propósito de alimentación trifásica, y operan en molinos, cintas transportadoras, bombas, sierras, etc., debido a su fortaleza y sencillez de construcción,

buen rendimiento, bajo costo y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha a velocidad constante.

Se basan en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio, están conformados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales denominados rotor y estator. El rotor puede ser de dos tipos, jaula de ardilla o bobinado, y en el estator se encuentran las bobinas inductoras.



Figura N°27 “Rotor de un motor de inducción”

Los elementos básicos del motor de inducción son el estator y el rotor; el estator es la parte estacionaria del circuito electromagnético del motor que se observa en la figura N°28, está compuesto por un cilindro de hierro con ranuras en el interior, en el que se instalan láminas de metal delgado que reducen las pérdidas de energía que se tendría al usar un núcleo sólido.

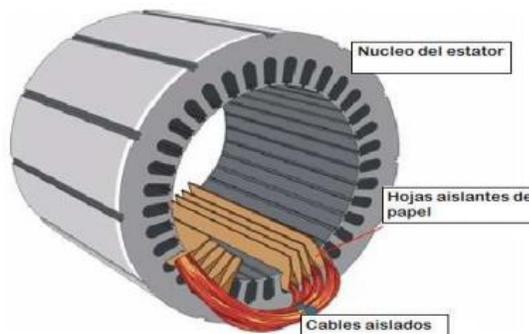


Figura N°28 “Núcleo del estator de motor jaula ardilla”

Las láminas de estator forman un cilindro hueco, y las bobinas que son aisladas se insertan en las ranuras del núcleo del estator, que al ser alimentadas cada grupo de bobinas junto al núcleo de acero que les rodea, se convierte en un electroimán.

El rotor es la parte giratoria del circuito electromagnético, es construido por un cilindro macizo de hierro laminado que en su superficie posee ranuras paralelas al eje.

El tipo de rotor que se construye comúnmente en este motor es el jaula de ardilla, ya que su rotor es fabricado por apilamiento de finas láminas de acero que forman un cilindro.

En vez de utilizar alambre como conductores, este tipo de rotor utiliza barras conductoras en las ranuras equidistantes entre sí, alrededor del cilindro, ya que son cortocircuitadas en cada extremo por estas barras y no en su interior.

Existen dos formas básicas de construcción de un rotor, una es la mencionada anteriormente, la jaula de ardilla y la otra, la doble jaula de ardilla, que se diferencia en que el rotor se compone por dos jaulas de ardilla, una interna y otra externa; la jaula de ardilla externa es más gruesa por lo que presenta una mayor resistencia que la jaula interna, este tipo de jaula posee la ventaja de que a velocidades baja o en el arranque posee un gran torque ya que la frecuencia de deslizamiento es alta, y la corriente en el rotor fluye en la jaula exterior, y a medida que el rotor acelera, la frecuencia de deslizamiento disminuye provocando que la corriente del rotor circule por la jaula interna produciendo un alto torque en la velocidad de trabajo.

5.1 Curvas características del comportamiento de los motores de inducción.

Consiste en la representación de la curva “Par-Velocidad” cuando un motor eléctrico de inducción está alimentado a su tensión y frecuencia nominales. Para velocidades superiores a la de sincronismo, la máquina se encuentra en funcionamiento como generador.

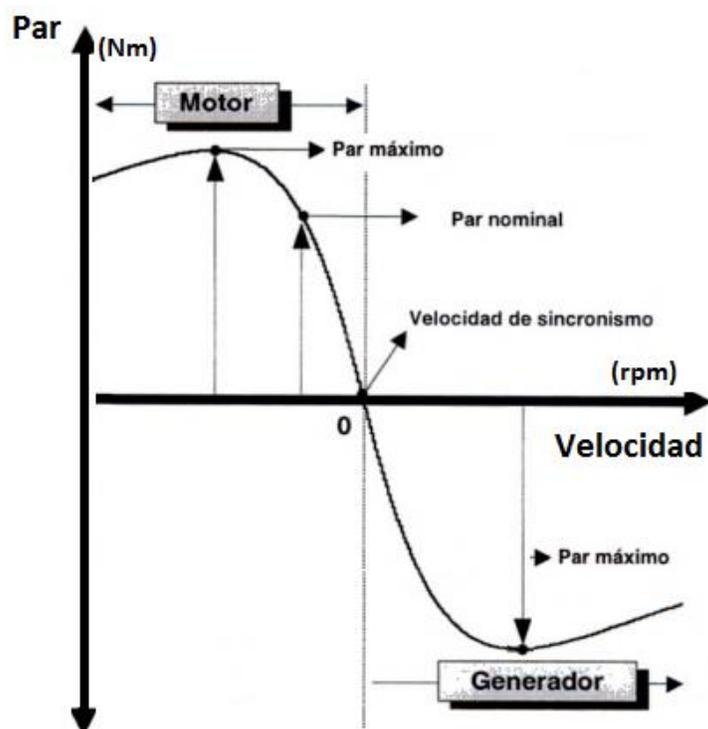


Figura N°29 “Par vs velocidad”

Se puede observar que el torque positivo generado por el motor está directamente relacionado a la velocidad positiva a la que el motor va a estar operando, logrando un par máximo a una velocidad inferior a la velocidad nominal.

Cuando la máquina trabaja como generador, en este caso el par es negativo, es decir tomará la potencia mecánica de una fuente externa (proceso) a través del eje, lo cual presenta como particularidad su capacidad de producir energía con una cierta dependencia de su velocidad de giro.

La figura N°30 amplía la proyección de la operación de los motores eléctricos asíncronos a variadas frecuencias.

A medida que las frecuencias son mayores a la nominal (50 Hz), el par máximo comienza a descender, esto se debe a que la corriente en el motor empieza a disminuir, reduciendo considerablemente su eficiencia.

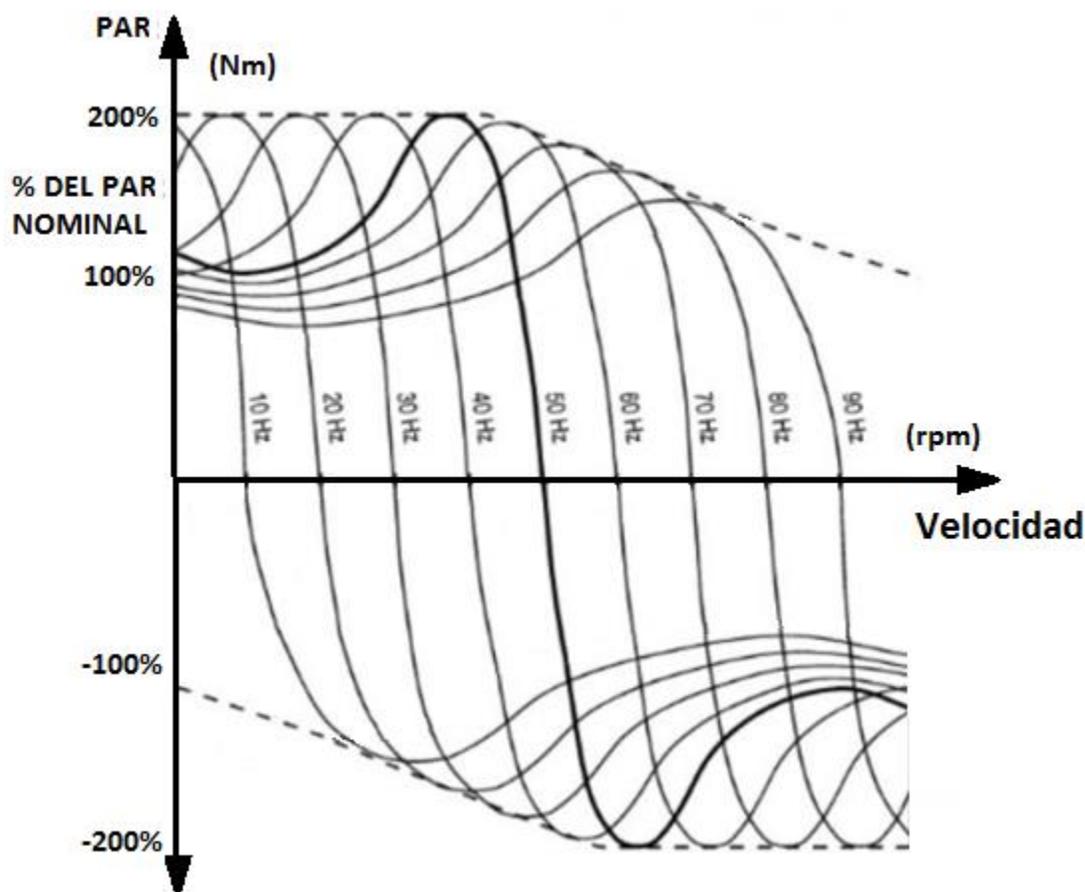


Figura N°30 “Relación Par-Velocidad, a frecuencia variable”

Caso contrario ocurre cuando el actuador trabaja como generador (par negativo), este puede generar de manera eficiente partiendo de los 50(Hz). Favorece operar a una velocidad mayor a la nominal para alcanzar un torque máximo negativo, si el objetivo es generar la máxima energía.

- Funcionamiento a par constante: la característica de la carga en estado estacionario requiera más o menos par, no teniendo en cuenta la velocidad de trabajo, la curva de funcionamiento sería el siguiente:

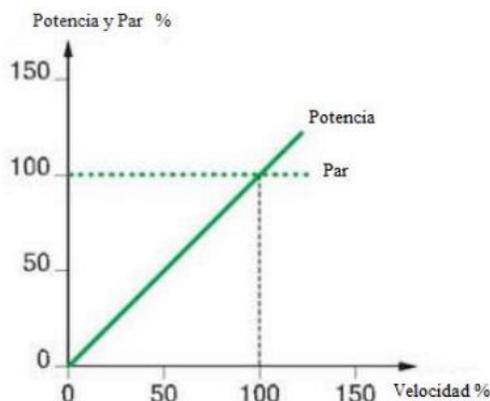


Figura N°31 “Par constante”

En la figura N°31, se denomina funcionamiento a par constante cuando las características de la carga son tales que, en régimen permanente, el par solicitado es constante, en cualquier velocidad de operación. Un ejemplo de esto, son el funcionamiento de las cintas transportadoras, ya que a veces es necesario que se aplique un gran torque a bajas revoluciones, este tipo de procesos se controla comúnmente mediante el método DTC.

- Funcionamiento a par variable: el tipo de carga nos pide que el par requerido aumente con la velocidad, para esta característica no es necesario un gran par al arranque como en el caso anterior, por lo que se puede distinguir varias formas incrementar el par:

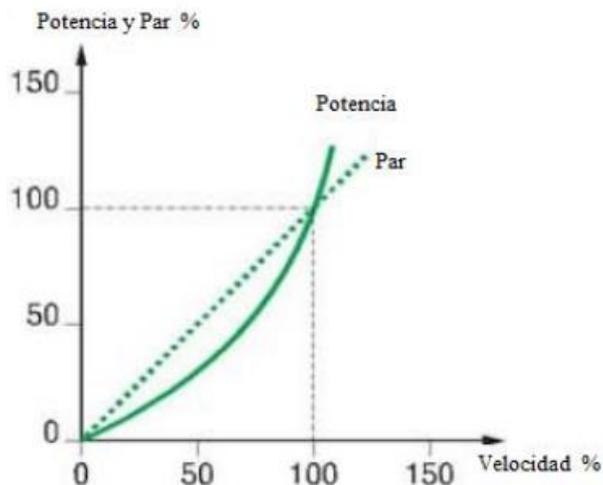


Figura N°32 “Par Lineal”

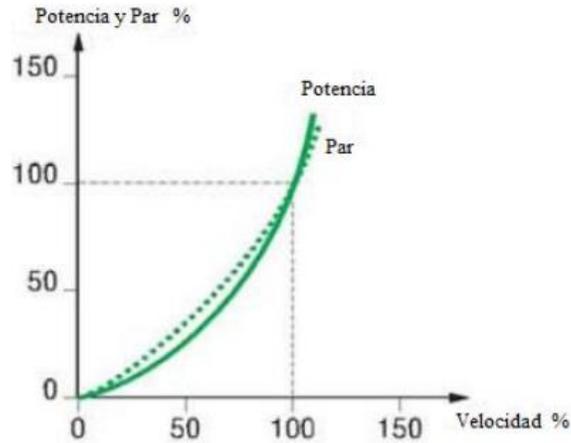


Figura N°33 “Par cuadrático”

De la figura N°32 el comportamiento par es lineal respecto a la velocidad, mientras que la figura N°33 demuestra un comportamiento par cuadrático con la velocidad. Uno de los procesos que necesitan motores con el funcionamiento a par variable son bombas y ventiladores, en que es necesario que el torque aumente con la velocidad.

- Funcionamiento a par variable: para algunas características de cargas es necesario que el par se reduzca cuando la velocidad aumente, este funcionamiento se caracteriza porque la potencia es constante cuando el par del motor es inversamente proporcional a la velocidad, pero es necesario tener en cuenta que existe un rango de funcionamiento del motor, ya que el motor se encuentra fabricado con un par máximo y una mínima corriente para que exista velocidad. Entonces el funcionamiento está descrito a continuación:

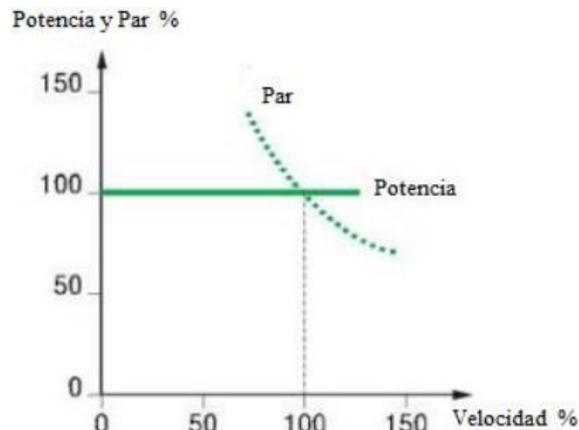


Figura N°34 “Par que disminuye con la velocidad”

5.3 Funcionamiento del motor de inducción

El funcionamiento del motor de inducción es a través de la generación de campo magnético, el cual se aplica una corriente alterna trifásica sobre las bobinas inductoras del estator que inducirán un campo magnético, generando corriente en el rotor que a su vez, inducirá un campo magnético giratorio a la velocidad sincrónica con respecto al estator, logrando producir un par motor que hace que el rotor gire. Por lo que al alimentar el motor con la red trifásica ($0^\circ, 120^\circ$ y -120° ángulos de desfase entre línea de la red) crean tres campos magnéticos pulsantes giratorios, producidos por la corriente sinusoidal que circula en el interior, desfasadas temporalmente por las tres bobinas, logrando producir un par motor giratorio controlado por este desfase de la entrada. Estos campos que son creados en el interior del motor, poseen distintas características según los valores nominales para lo que fueron diseñados, pero al ver que el campo magnético producido rota, y por consiguiente, la velocidad de rotación del campo se encuentra relacionada directamente con la frecuencia de la tensión de la fuente.

El rotor al ser la parte móvil del motor y ser ubicado dentro del estator, los devanados inductores del estator crean un campo magnético que rota alrededor del rotor, por lo que el movimiento relativo entre el campo y la rotación del motor induce una corriente eléctrica proporcional al campo en su interior. Alternadamente estas corrientes que fluyen longitudinalmente en los conductores reaccionan con el campo magnético generado por el estator, lo que provoca que exista una fuerza que actúa de forma tangente al rotor dando como resultado que el rotor gire a una velocidad menor. Los conductores que se inclinan levemente a lo largo de la longitud del rotor reducen el ruido y las fluctuaciones del esfuerzo de torsión que pudieran resultar a algunas velocidades.



Figura N°35 “Rotor de un motor de inducción”

La velocidad de campo producida por las corrientes que circulan en el estator es llamada velocidad síncrona y el deslizamiento es la cercanía que se encuentra la velocidad del flujo en el rotor de la máquina a la velocidad de campo. Este deslizamiento es determinado por la siguiente expresión:

$$s = \frac{\eta_d}{\eta_{sinc}}$$

$$\eta_d = \eta_{sinc} - \eta_m$$

$$s = \frac{\eta_{sinc} - \eta_m}{\eta_{sinc}}$$

Dónde:

s : deslizamiento del motor

η_d : Velocidad de deslizamiento [Rpm]

η_{sinc} : Velocidad síncrona del motor [Rpm]

η_m : Velocidad mecánica del motor [Rpm]

Como se puede observar, el deslizamiento depende directamente de la velocidad síncrona del motor y de la velocidad del motor en cualquier instante de tiempo. El deslizamiento es uno de los parámetros más importantes en los motores de inducción ya que a partir de este se pueden obtener otros parámetros como: la velocidad del motor y la frecuencia en el rotor a cualquier velocidad, estos parámetros se obtienen:

$$\eta_m = \eta_{sinc} (1 - s)$$

$$f_r = s * f_e = \frac{p}{120} (\eta_{sinc} - \eta_m)$$

Dónde:

s : deslizamiento del motor

p : número de polos

f_r : Frecuencia rotor [Hz]

f_e : Frecuencia estator [Hz]

5.4 Definición de Cuadrantes

Para poder apreciar las posibilidades de funcionamiento de un determinado accionamiento de un motor, se utiliza una representación de la característica mecánica de cuatro cuadrantes, con este se permite relacionar las variables de velocidad y par del motor, que determinan según la región de operación si el actuador se encuentra en modo motor o generador, en directa relación del sentido de giro e influencia de carga del proceso.

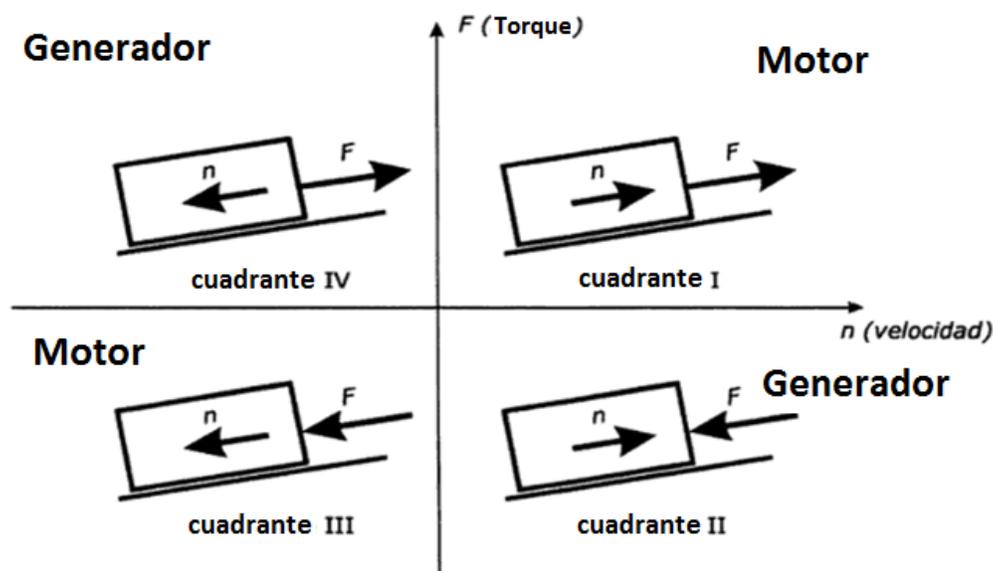


Figura N°36 “Comportamiento del motor en cuadrantes torque vs velocidad”

De la figura superior se obtiene el comportamiento del motor en su capacidad de generador y carga.

El primer cuadrante se tiene la representación de la fuerza aplicada “ F ” (torque) y el desplazamiento rotacional “ n ”, el cual tienen el mismo sentido, por lo que resulta fácil concluir un consumo de energía, ya que actúa como motor.

En el segundo cuadrante el torque aplicado está en sentido contrario al desplazamiento rotacional del eje del motor, lo cual se interpreta como el resultado de que la carga adquiere mayor velocidad y se pretende a través torque del motor, frenar la carga,

en este caso la energía es cedida por el proceso, dado que el trabajo aplicado tiene un valor negativo, por lo tanto el accionamiento es generador.

En el tercer cuadrante se da el caso contrario al primer cuadrante, ya que el motor está forzando a través del torque que la velocidad sea negativa, existiendo un consumo de energía para generar el proceso, lo cual el accionamiento es motor.

En el cuarto cuadrante se puede dar el ejemplo de querer frenar la carga que va en descenso, lo cual al igual que en el segundo cuadrante, se produce un trabajo aplicado con un valor negativo, por lo tanto el accionamiento es generador.

5.5 Ventajas e inconvenientes

Actualmente, en sectores de manufactura de industria, donde se necesita desarrollar variados procesos, la generación de movimiento es indispensable, por ello es necesario contar con maquinaria eficiente, confiable, robusta, compacta y con amplio rango en potencia, por ello, quienes satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio, desde arrancar, acelerar, mover, o frenar, hasta sostener y detener una carga son los motores eléctricos.

Como estos motores usan energía eléctrica, se les pueden considerar actuadores limpios, que apenas contaminan, si los comparamos con motores de combustión, con actuadores neumáticos o los hidráulicos.

Los motores eléctricos son los más dinámicos a variación de potencia y son capaces de operar desde la posición de reposo a la deseada a través de control, dentro de los parámetros establecidos en su fabricación.

Por otra parte, la dependencia de contar con un suministro eléctrico no siempre es accesible o rentable, lo cual para procesos o sistemas móviles no es precisamente su función, sin embargo, está en estudio el uso de baterías compactas para la capacidad de potencia que se requiere, por ejemplo, los vehículos híbridos.

5.6 Modelo del motor de inducción

Para realizar el modelo del motor de inducción, es necesario entender y comprender su funcionamiento, por lo que su comportamiento es similar al del transformador, ya que cuando se alimenta por uno de sus bornes, tanto primario o secundario, estos inducen en el otro borne una tensión, definida por una relación entre el número de espiras del primario dividido entre el número de espiras del secundario:

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Dónde:

V_p : Voltaje primario

V_s : Voltaje secundario

N_p : Número de espiras primario

N_s : Número de espiras secundario

Al momento de conectar una carga a este, produce una corriente que alimenta dicha carga, esa misma condición aparece cuando en el motor se conecta una fuente de alimentación en el estator, esta produce una inducción de campo magnético al rotor, provocando que circule una corriente en él.

Como el rotor se encuentra cortocircuitado en uno de sus extremos, esta corriente produce un torque que es capaz de mover el rotor, por lo que la velocidad con que se mueve el rotor es directamente proporcional a la corriente que se induce en él, y a la vez a la corriente de alimentación.

A continuación se realizara el modelo del motor inductivo según la figura N°37

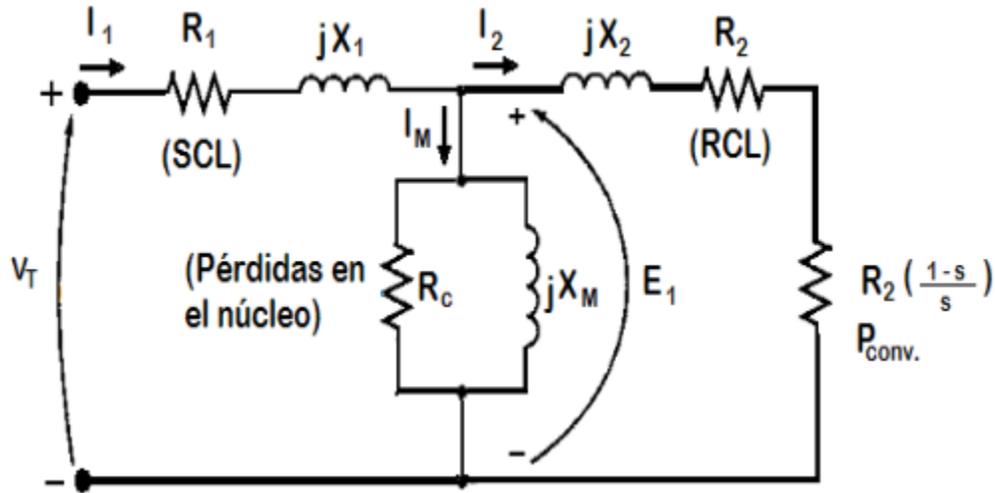


Figura N°37 “Modelo del motor de inducción”

Dónde:

V_T : Voltaje terminal del estator

I_1 : Corriente de línea

I_2 : Corriente rotor

I_m : Corriente de magnetización

R_1 : Resistencia del estator

R_2 : Resistencia en rotor

R_c : Resistencia del nucleo

jX_1 : Reactancia de dispersion en estator

jX_2 : Reactancia de dispersion en rotor

jX_m : Reactancia de magnetización

E_1 : Perdidas en el nucleo

En la Figura N°38 se observa el modelo equivalente por fase del motor de inducción, en el que se representa un conjunto de elementos los que determinan las potencias tanto eléctricas como mecánicas en el motor, mostrado a continuación:

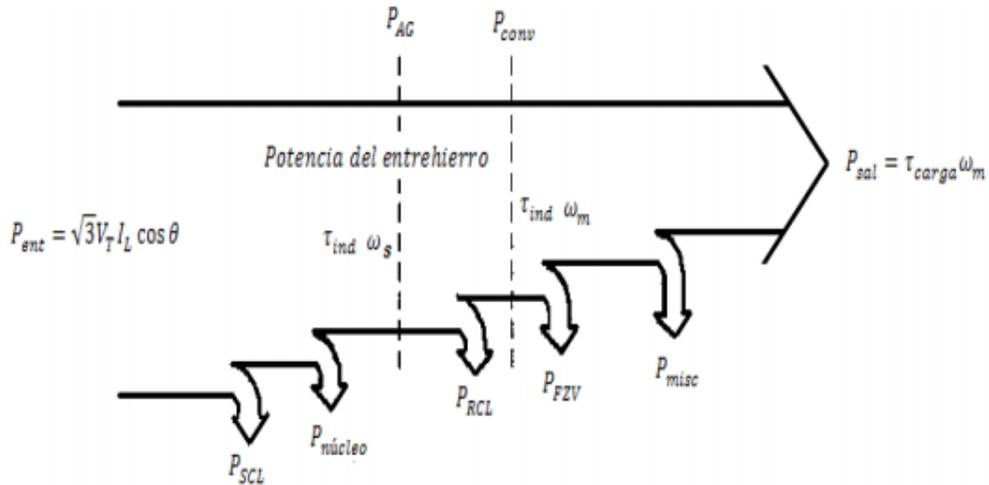


Figura N°38 “Diagrama de potencias modelo: motor de inducción”

Dónde:

- P_{ent} : Potencia de entrada del motor
- P_{nucleo} : Potencia en el nucleo
- P_{ag} : Potencia entrehierro
- P_{rcl} : Potencia(cobre) en el rotor
- P_{conv} : Potencia convertida
- P_{scl} : Perdidas(cobre) en el estator
- P_{FZV} : Perdida por friccion y ventilacion
- P_{misc} : Perdidas rotacionales
- P_{sal} : Potencia de salida motor

Realizando un balance de potencia, donde toda la potencia que entra más las perdidas nos entregan la potencia de salida del motor.

$$\sum Potencias - \sum potencias de Perdidas = Potencia salida del motor$$

El motor de inducción es descrito por las siguientes ecuaciones, el cual representan su comportamiento en cualquier instante de tiempo mientras el motor trifásico sea equilibrado.

$$V_S = R_S \cdot i_S + L_{SS} \cdot \frac{d}{dt} i_S + L_{SR(\theta)} \cdot \frac{d}{dt} i_R + \frac{\partial}{\partial \theta} L_{SR(\theta)} \cdot i_R \frac{d\theta}{dt}$$

$$V_R = R_R \cdot i_R + L_{RR} \cdot \frac{d}{dt} i_R + L_{RS(\theta)} \cdot \frac{d}{dt} i_S + \frac{\partial}{\partial \theta} L_{RS(\theta)} \cdot i_S \frac{d\theta}{dt}$$

En esta ecuación anterior, V_S es la tensión en el estator y V_R la tensión en el rotor, que en el caso del motor jaula ardilla es igual a 0.

RS y RR representa matricialmente las resistencias del estator y rotor, que son:

$$R_S = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix}$$

$$R_R = \begin{bmatrix} R_R & 0 & 0 \\ 0 & R_R & 0 \\ 0 & 0 & R_R \end{bmatrix}$$

L_{SS} y L_{RR} , representan matricialmente las inductancias del estator y rotor, respectivamente

$$L_{SS} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix}$$

$$L_{RR} = \begin{bmatrix} L_R & M_R & M_R \\ M_R & L_R & M_R \\ M_R & M_R & L_R \end{bmatrix}$$

$L_{SR(\theta)}$ y $L_{RS(\theta)}$, representan matricialmente las inductancias mutuas entre el estator y rotor, que dependen del ángulo (θ), que son calculados por:

$$L_{SR(\theta)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$L_{SR(\theta)} = L_{RS(\theta)}^t$$

Una vez comprendido el motor matemáticamente, estos motores de inducción tienen dos formas básicas de construcción: rotor bobinado y jaula de ardilla.

6. Controlador Lógico Programable

El PLC (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo electrónico programable, que se diseñó para ser utilizado en la industria, con el objetivo de controlar máquinas y procesos, ya que posee un tiempo de respuesta prácticamente instantánea. El PLC utiliza memorias programables para el almacenamiento de las instrucciones que se guardan tales como funciones lógicas, secuencias, temporizaciones, conteos y funciones aritméticas.

El controlador como equipo electrónico ejecuta una serie de programas preprogramado en su interior de forma cíclica, cuya ejecución del programa puede ser interrumpida para realizar otras tareas consideraras prioritarias.

Básicamente su funcionamiento se encuentra destinado al control de procesos industriales, a través de sus entradas recibe información proveniente de sensores y/o distintas máquinas ubicadas en el proceso que necesite controlar. Como se observa en la figura N°39, este equipo sigue el programa que es almacenado en su memoria interna, que dependiendo de la tarea cargada, realizara un cambio en su salida, con el fin de generar un cambio con los actuadores para modificar o corregir un cambio en el proceso.

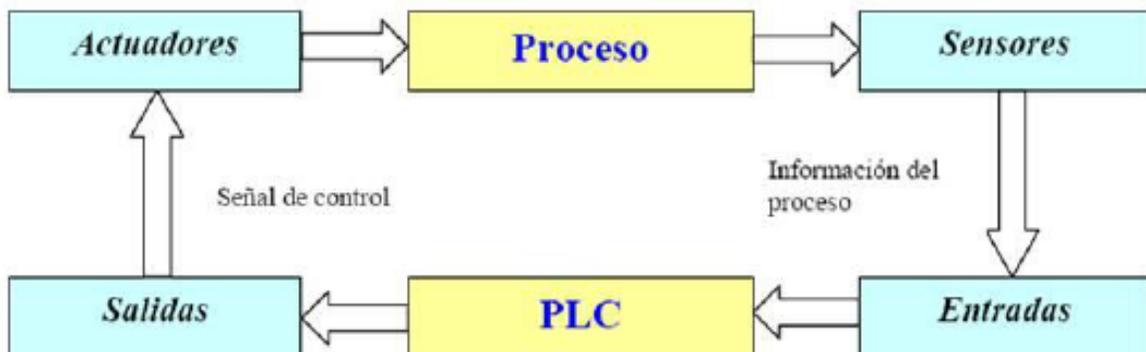


Figura N°39 “Sistema integrado a un PLC”

Existen estándares internacionales como el IEC 61131-3, el cual define lenguajes de programación estándares que especifica el tipo de lenguaje gráfico y el lenguaje textual, que se utiliza al momento de realizar dichas tareas.

6.1 Características Técnicas

La estructura de un PLC básicamente se compone por:

- CPU
- Interfaces de entradas
- Interfaces de salida

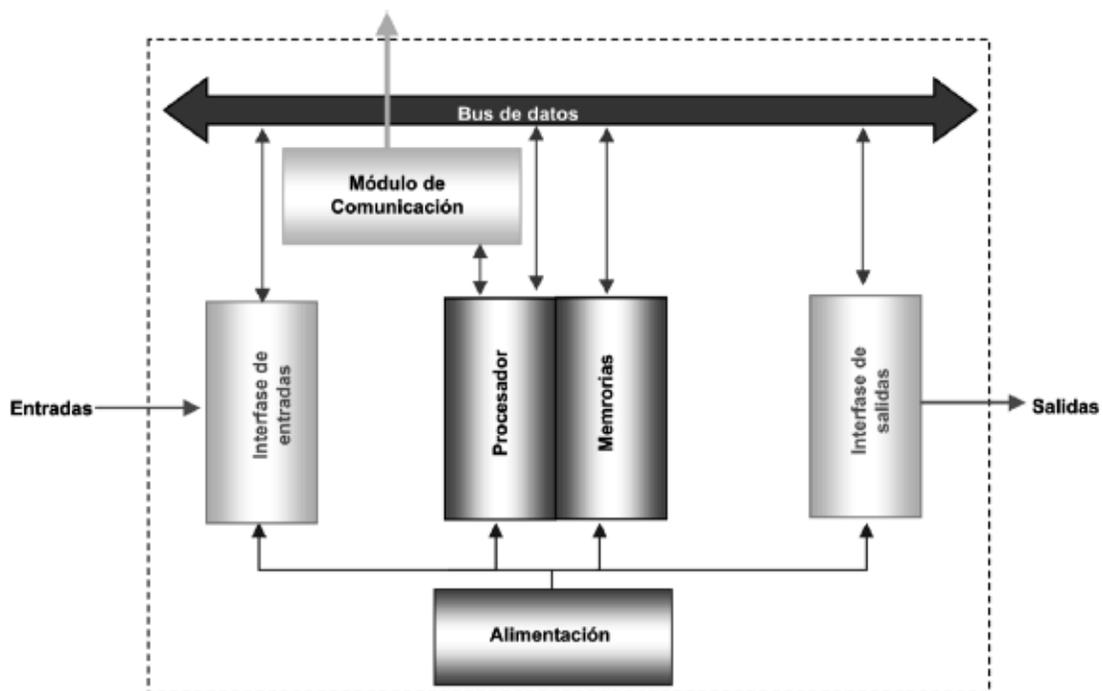


Figura N°40 “Estructura básica de un PLC”

Los componentes de la figura N°40 se detallan a continuación:

6.1.1 Procesador:

Es la parte compleja e inteligente del controlador programable, está formado por el microprocesador, el reloj (generador de onda cuadrada) y un chip auxiliar.

El microprocesador es un circuito integrado, que realiza una gran cantidad de operaciones que podemos agrupar en:

- Operaciones de tipo lógico
- Operaciones de tipo aritmético.
- Operación de lectura y modificación de datos.
- Operaciones de control de la transferencia de la información dentro del autómata.
- Operaciones de entrada – salida.

Para que las operaciones puedan ser realizadas por el procesador, se cuenta con unos circuitos internos que son los siguientes:

- Circuitos de la unidad aritmética y lógica o ALU: Es la parte donde se realizan los cálculos y las decisiones lógicas para controlar el autómata.
- Circuitos de la unidad de control (UC) o Decodificador de instrucciones: Decodifica las instrucciones leídas en memoria y se generan las señales de control.
- Acumulador: Es la encargada de almacenar el resultado de la última operación realizada por el ALU.
- Flags: o indicadores de resultado, que pueden ser consultados por el programa.
- Contador de programa: Encargada de la lectura de las instrucciones de usuario.

6.1.2 Memoria:

Son miles de localizaciones donde la información se logra almacenar. Estas localizaciones se encuentran muy bien organizadas, ya que son capaces de almacenar datos del proceso y datos del control. En los datos de procesos se almacenan las señales de entrada/salida, variables internas, datos alfanuméricos y constantes, mientras que en los datos de control son almacenadas la configuración del PLC y las instrucciones del programa.

Existen dos tipos de memoria que se encuentran en los PLC:

6.1.2.1- Memoria de datos:

En esta memoria se encuentran las tablas de registro, estas tablas se utilizan para grabar todas las direcciones de los datos que se necesitan para ejecutar el programa almacenado durante la ejecución y/o retenerlos al momento de terminar la aplicación. Este tipo de memoria contiene toda la información del estado y/o cambio de los dispositivos de entrada y salida. En resumen esta memoria es capaz de guardar la información establecida en la programación, incluyendo: tiempos, unidades de conteo y relés internos.

6.1.2.2- Memoria del usuario:

Esta memoria es utilizada para guardar la información que debe permanecer disponible durante todo el tiempo que se esté ejecutando la programación. El tipo de memoria utilizada en estos casos es la RAM o EEPROM, ya que la información debe ser fácil de leer, escribir o borrar. Al usar memoria RAM es necesario el uso de pilas ya que pierde la información con la ausencia de energía mientras que la memoria EEPROM no cuenta con este tipo de desventaja.

6.1.3 Entradas y salidas

Los dispositivos de entrada y salida son aquellos que intercambian señales con el PLC. Cada dispositivo de entrada es utilizado para conocer una condición del entorno, como temperatura, presión, posición, etc. a través de sensores ubicados en distintos lugares del proceso. Mientras que los dispositivos de salida son aquellos que responden a las señales que recibe en la entrada del PLC, cambiando o modificando su entorno, típicamente los actuadores que se encuentran son: contactores de motor, electroválvulas e indicadores luminosos o relés.

En referencia a las entradas, existen dos tipos: digitales y análogas. Las entradas digitales son las que pueden tomar solo dos estados: Alto o Bajo. En cambio las entradas análogas admiten como señal valores de tensión o corriente provenientes de sensor de temperatura, velocidad, aceleración, presión, posición o cualquier otra magnitud física que se mida, estas entradas análogas son convertidas en señales digitales con el fin de que el PLC pueda interpretar dicha entrada.

En cambio a las salidas existen dos tipos: digitales y análogas. Las salidas digitales son de igual forma que las entradas digitales ya que toman solo dos estados. Mientras que las salidas análogas permite que la variable número interna del PLC se convierta en una tensión o corriente, esto se realiza a través de una conversión D/A (Digital/Análoga), puesto que el PLC trabaja solo con señales digitales.

6.1.4 Alimentación

Es la fuente de energía que proporciona las tensiones necesarias para el funcionamiento de los circuitos internos del PLC.

6.2 Unidad de programación

Actualmente la forma más empleada para la programación es un PC (Computador personal), el cual nos permite programar estos dispositivos mediante un software que proporciona el fabricante junto a las interfaces de comunicación entre PC y PLC.

6.3 Funcionamiento

En la gran mayoría de los PLC el funcionamiento es de tipo cíclico y secuencial, es decir, todas las operaciones se generan una tras otra, y se repiten continuamente mientras el PLC se encuentra alimentado. Existen distintos tiempos de ejecución de las operaciones como:

- Tiempo de barrido: es el tiempo que demanda el PLC en completar un ciclo, cada ciclo se denomina barrido, este ciclo posee dos comportamientos distintos, una es cuando

se encuentra en STOP el cual no ejecuta el ciclo y RUN el procesador ejecuta una típica secuencia como:

- Autodiagnóstico: mientras se encuentre alimentado internamente se realiza una verificación de todos sus circuitos, en caso de que existiera algún problema el PLC indicara con una señal luminosa que se ha detectado un error.
- Lectura del registro de entrada y creación de una imagen de las entradas en la memoria: el PLC revisa cada una de sus entradas para determinar si se encuentran activadas o desactivadas, y luego graba cada estado en una imagen para ser utilizados en el paso siguiente.
- Lectura y ejecución del programa: accediendo a la imagen de las entradas y salidas, el CPU ejecuta el programa creado por el usuario. La ejecución del programa se realiza paso a paso, y manteniendo el orden que se determinó.
- Actualización del registro de salida: actualiza cada una de las entradas en forma simultánea, en función de la imagen que fue obtenida al final de la ejecución del programa.

- Modos de funcionamiento del controlador Twido: Este modo se puede realizar de dos maneras:

- Ejecución normal: el ciclo de tareas del PLC es de forma cíclica, una vez terminado el ciclo empieza nuevamente. Una forma que este ciclo no sea de manera infinita, es por desbordamiento del tiempo de ejecución, el cual supervisa el tiempo de ciclo del programa del usuario llamado temporizador Watchdog y una vez que se excede el tiempo programado detiene de forma inmediata el controlador y sus salidas retornan al modo predeterminado.
- Ejecución periódica: en este caso la lectura de las entradas, el tratamiento del programa y la actualización de las salidas se realizan de forma periódica

según el tiempo definido por el usuario en su configuración. Esta ejecución tiene como límite de igual forma que la ejecución normal el Watchdog, el cual no debe superar el tiempo límite que considera ese temporizador (150 [ms])

- Comprobación del tiempo de ciclo: el ciclo de tarea se controla mediante el temporizador mencionado Watchdog, el cual permite mostrar errores de aplicación y garantizar una duración máxima para actualizar las salidas.

7. Metodología de Simulación del banco de prueba

7.1 Introducción

En este capítulo se realizará la Simulación completa del banco de prueba, con la información lo más real posible, entregada por los equipos que se disponen en la implementación.

El objetivo es analizar el comportamiento interno de los variadores de frecuencia, medir las variables tales como voltaje, corriente y torque, en las distintas etapas, y verificar la estabilidad del sistema, en conjunto con las mediciones realizadas físicamente en la implementación y realizar una comparación.

Se efectuarán 3 modelos de simulación, el primero corresponde a un variador de frecuencia con un motor sin carga, el segundo modelo a la simulación del variador de frecuencia regenerativo sin carga, y el tercer modelo es el banco de prueba, con los motores acoplados, donde el motor vinculado al variador de frecuencia regenerativo es la carga controlada del sistema.

Se realizará el análisis con un motor de 7,5[kW] conectado al variador de frecuencia a prueba y un motor de 15[kW] conectado al variador de frecuencia regenerativo. Por último, a través de la simulación, se proyectará el comportamiento del banco de prueba ampliando la capacidad, con motores de mayor envergadura.

7.2 Objetivos

- Analizar el comportamiento dinámico interno de las variables del variador de frecuencia a prueba
- Analizar el comportamiento dinámico interno de las variables del variador de frecuencia regenerativo
- Medir variables con el sistema acoplado y estable, como banco de prueba.
- Proyectar la simulación a mayores capacidades de potencia.

7.3 Simulación del convertidor de frecuencia a prueba

Como primera etapa, se realiza la simulación del variador de frecuencia a prueba, analizando cada módulo que poseen estos equipos, donde en cada etapa implementada en la simulación se realizaron con variables reales indicadas por el fabricante o medidas en terreno, con el fin de que el comportamiento de las variables sea igual que el banco de prueba, y presentar un modelo que valide los resultados al proyectar la capacidad de potencia de los equipos, comportamiento dinámico y variación de potencia de los motores.

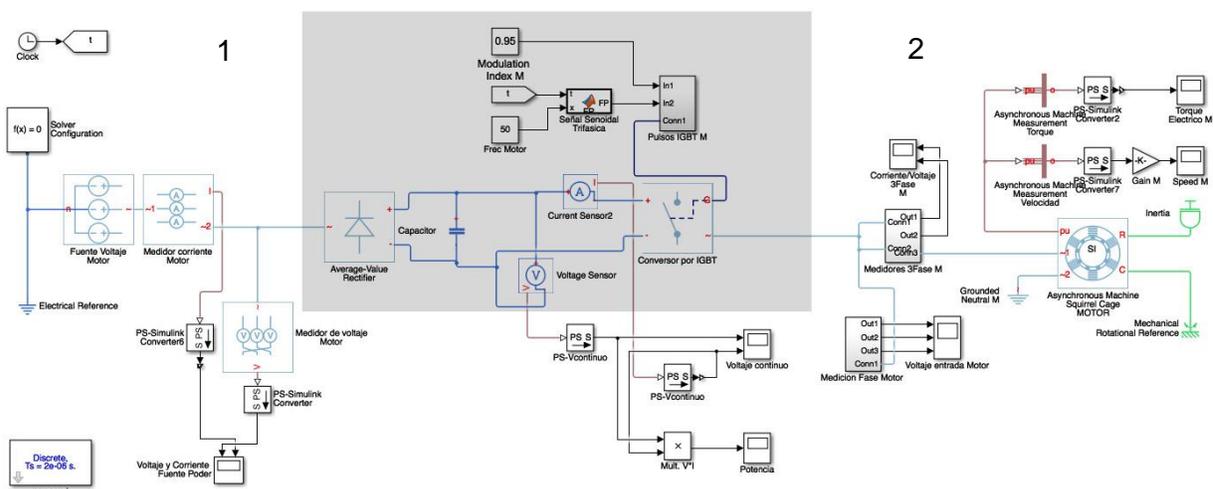


Figura N°41 “Simulación Variador de Frecuencia a prueba en Matlab Simulink”

En la figura anterior, lo demarcado corresponde a las etapas que tiene el variador de frecuencia a prueba, el cual consta de una etapa rectificadora, una etapa de filtrado (banco

condensadores) y la etapa inversora compuesta por IGBT, que es disparada por una señal modulada y una señal portadora, cuya frecuencia es la que comanda estos disparos y controla la velocidad del motor. La amplitud de esta señal corresponde a la que entrega la señal filtrada. La etapa demarcada con “1” representa el suministro de energía trifásico que nos entrega la red, mientras que la “etapa 2” es el motor asincrónico que es alimentado por la etapa demarcada (Variador de Frecuencia).

A continuación se presenta el comportamiento dinámico de cada una de las etapas del variador de frecuencia:

- Voltaje alimentación trifásica

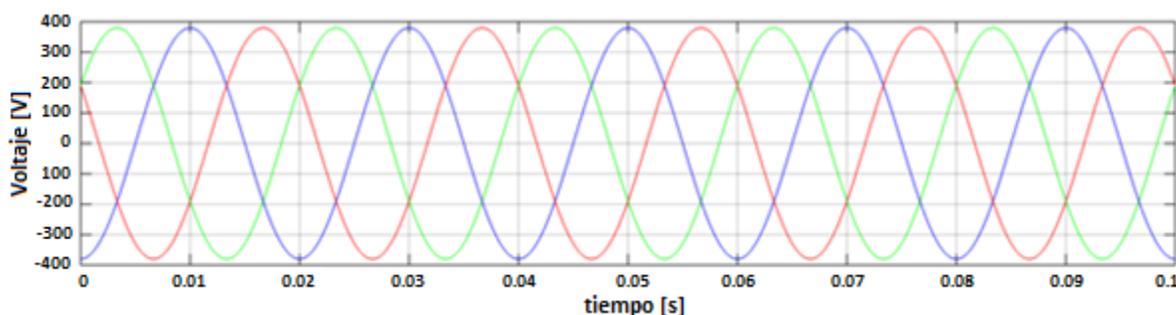


Figura N°42 “Alimentación trifásica Variador de Frecuencia a prueba”

La figura superior muestra la alimentación trifásica que otorga la fuente de poder, que simula la energía suministrada por la red, esta señal es de 380 [Vac] con una frecuencia de 50 [Hz], y es la que alimenta directamente al variador de frecuencia a prueba y al variador de frecuencia regenerativo.

Una vez que la señal trifásica alimenta al variador de frecuencia a prueba, esta pasa a la etapa de rectificado, a través de los 6 diodos que operan, y posterior a ello por una etapa de filtrado en el bus de continua, por medio de un banco de condensadores, con el fin de convertir la señal suministrada AC/DC.

- Medición Voltaje y Corriente a la salida del condensador

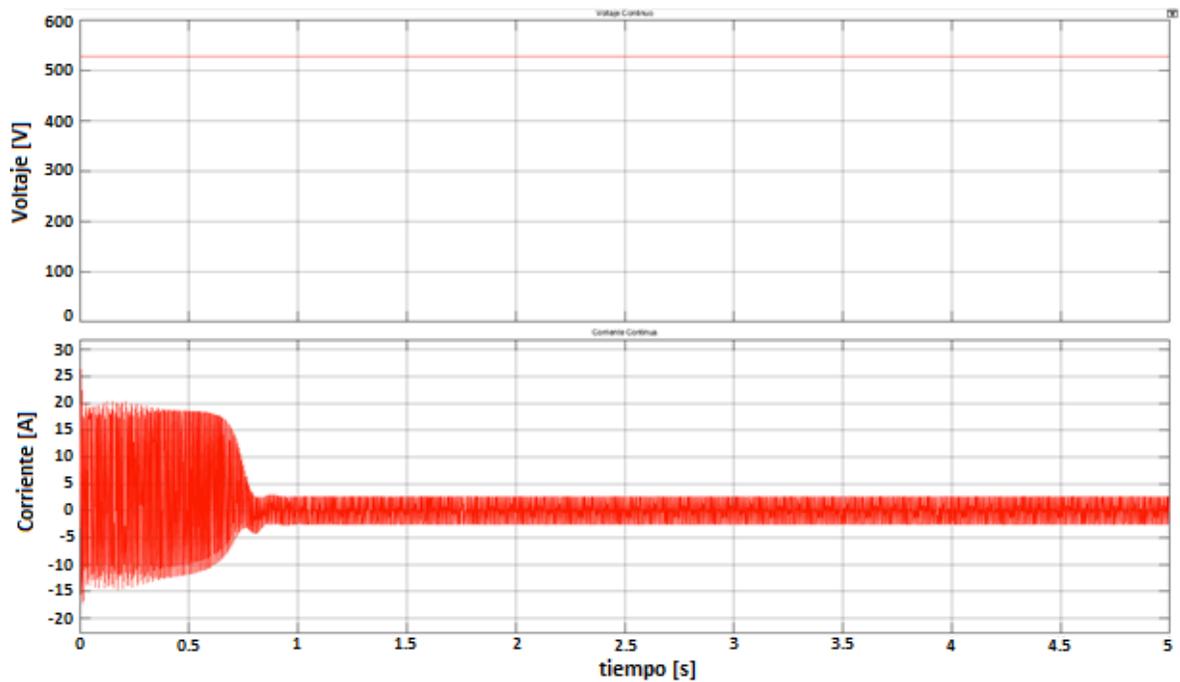


Figura N°43 “*Voltaje Continuo / Corriente Continua*”

En la figura superior, se observa el comportamiento constante del voltaje filtrado a la salida del banco de condensadores, con un voltaje continuo promedio de 540 [Vcc], mientras que la corriente se observa que al inicio (hasta 1 segundo) alcanza los 20 [A], producto de la energía necesaria para sacar de inercia al motor y la aceleración que este obtiene hasta llegar a la velocidad de 1460 [rpm] y luego como no tiene carga queda en la corriente de trabajo de 3 [A].

Una vez filtrada la corriente continua, pasa por la etapa convertora, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que encienden y apagan comandada por una señal de disparo (pulsos) PWM (Modulación por ancho de pulso).

- Señal PWM entregada al motor

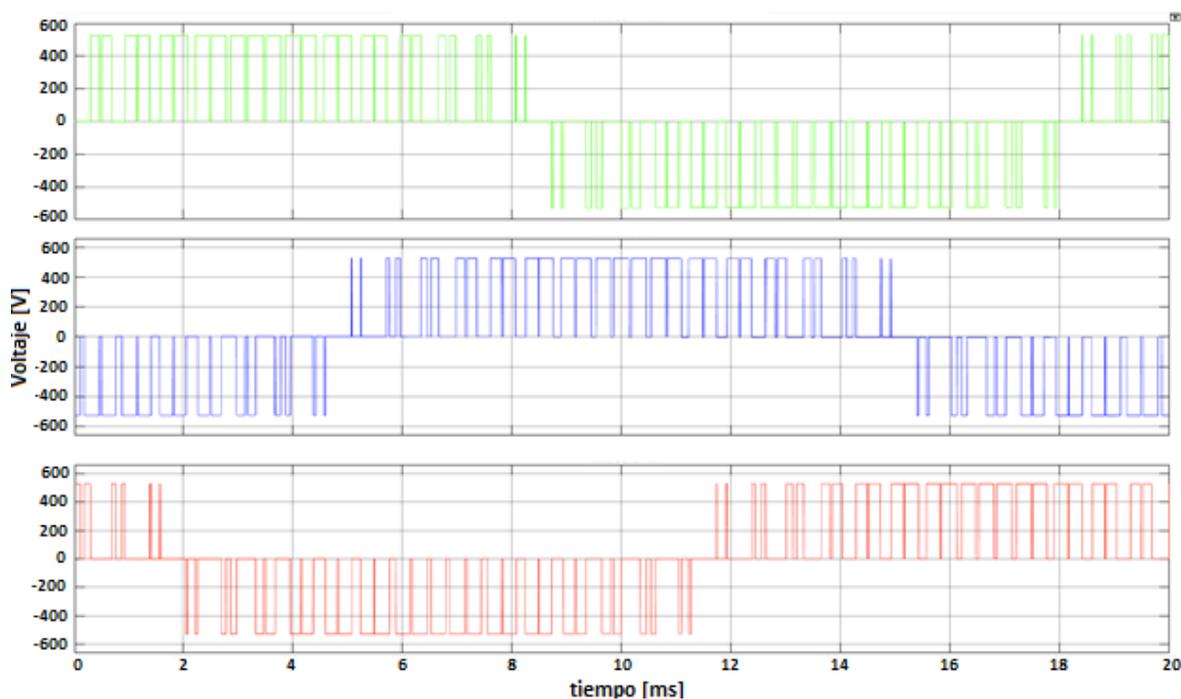


Figura N°44 “Alimentación por fase a la entrada del motor”

En esta figura se observa el comportamiento de las 3 fases que alimentan al motor trifásico, estas señales son producidas por el tren de pulso al conmutar los IGBT con un desfase de 120° , comandada por la modulación PWM. La amplitud es 550[V], la cual es la obtenida en la etapa del banco de condensadores del variador de frecuencia a prueba.

- Medición de Corriente y Voltaje entrada al motor.

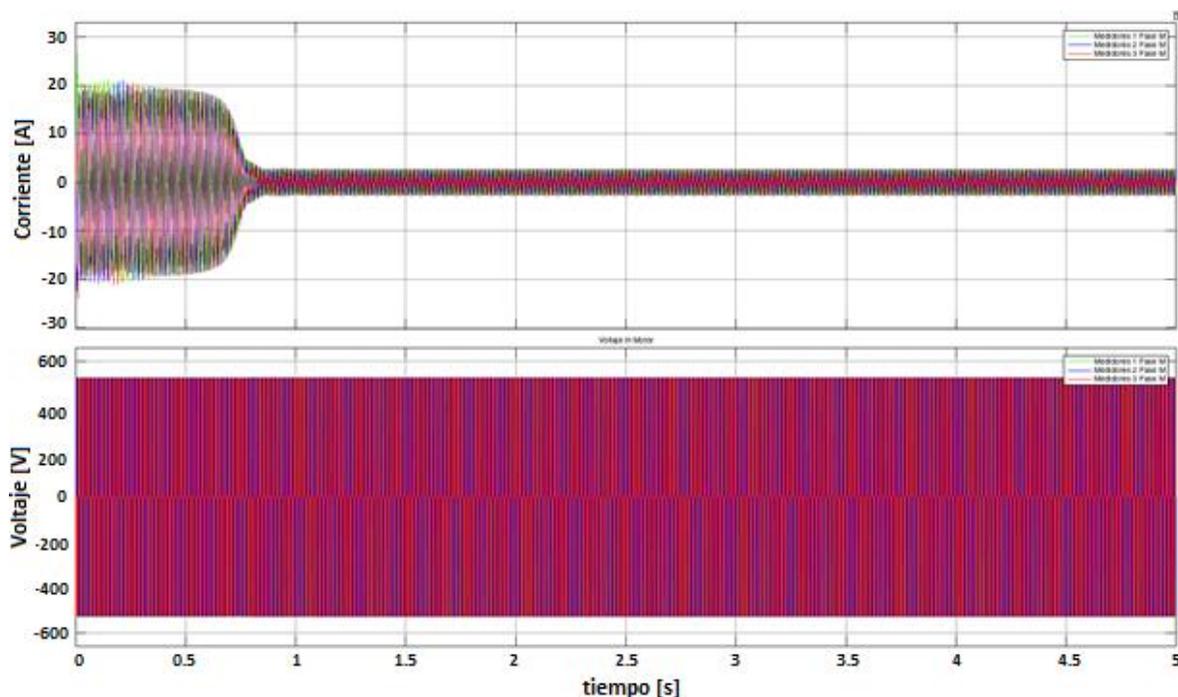


Figura N°45 “Corriente Trifásica / Señal PWM Trifásico”

Finalmente se observa en el primer gráfico el comportamiento de la corriente a través del tiempo, donde se percibe que al inicio la corriente es alta, producto de la aceleración del motor, y al llegar a la frecuencia deseada la corriente disminuye, ya que el motor no tiene carga. El segundo gráfico representa el tren de pulsos al conmutar los IGBT, es la misma que la figura N°44 a través de un tiempo más prolongado.

7.4 Simulación del Variador de Frecuencia Regenerativo

La simulación del variador de frecuencia regenerativo se realizó con cada una de las etapas que poseen estos equipos, cada etapa implementada en la simulación se realizó con variables reales indicadas por el fabricante o medidas realizadas en terreno. En este caso hubo mayor complejidad producto que costó interpretar la función regenerativa, pero al no tener carga asociada como drive individual (sin acople) el variador de frecuencia regenerativo cumple la función de controlador de velocidad más que regeneración, producto que el motor no posee control de frenado.

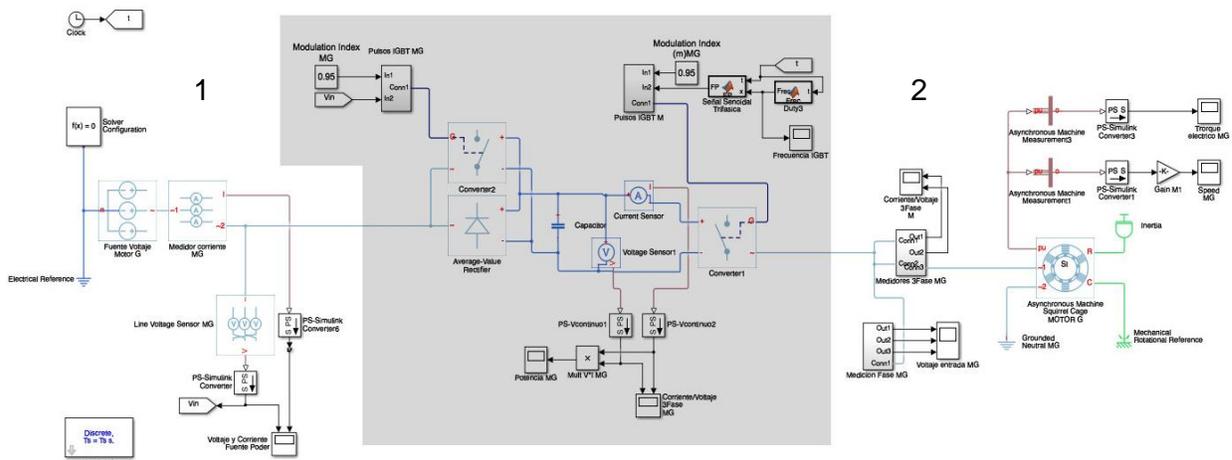


Figura N°46 “Simulación Variador de Frecuencia Regenerativo en Matlab Simulink”

Al igual que en el variador de frecuencia a prueba, en referencia a la figura anterior, lo demarcado oscuro corresponde a las etapas del variador de frecuencia regenerativo, con diferencia en su estructura electrónica en la etapa de rectificación.

Se implementó la etapa rectificadora (trabajo de motor) con diodos y paralelo a ello, un puente con IGBT (trabajo generador), disparados con una señal modulada y una señal portadora, que tiene como referencia la frecuencia de la señal trifásica de entrada al sistema, una etapa de filtrado (condensador) y la etapa de rectificador (motor) comandado con IGBT según la señal modulada y la señal portadora el cual entrega la frecuencia de trabajo del motor o inversora (regeneradora) con un puente de diodos que nos rectifica la señal que proviene del motor.

La etapa señalada con “1” es el suministro de energía al sistema, mientras que la etapa “2” es el motor asíncrono que es alimentado con el VDF regenerativo, el cual adquiere la capacidad de trabajar en los cuatro cuadrantes como generador o motor asíncrono.

A continuación se presenta el comportamiento dinámico de cada una de las etapas del variador de frecuencia regenerativo:

- Voltaje alimentación trifásica

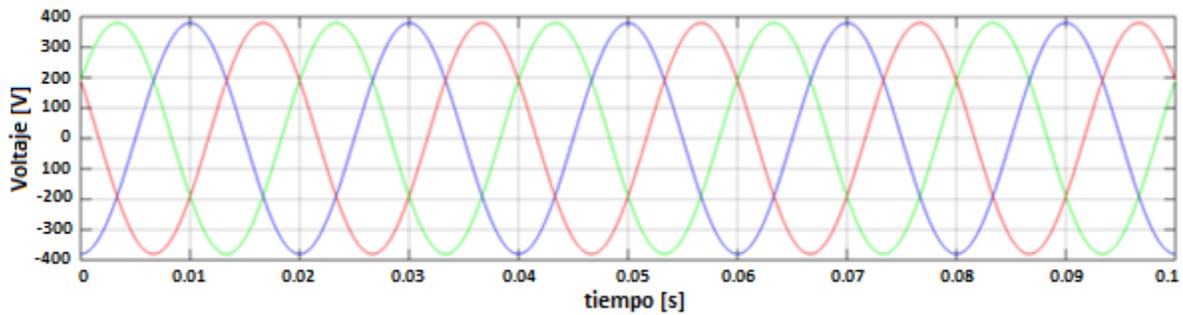


Figura N°47 “Alimentación trifásica variador de frecuencia regenerativo”

Básicamente es la representación de la alimentación trifásica que otorga la fuente de poder, que representa al suministro de la red eléctrica, y es la misma que ocupa el variador de frecuencia a prueba, esta señal es muy importante para el variador de frecuencia regenerativo, ya que el variador, en su modo de generador, otorga energía a la red mediante la conmutación de los IGBT, que se encuentran en la primera etapa de los equipos y como estos dispositivos necesitan una señal portadora, esta toma la señal de entrada de referencia y conmuta los IGBT con la modulación PWM, con el fin que no haya desfases al momento de inyectar energía a la red eléctrica.

- Medición voltaje y Corriente a la salida del condensador

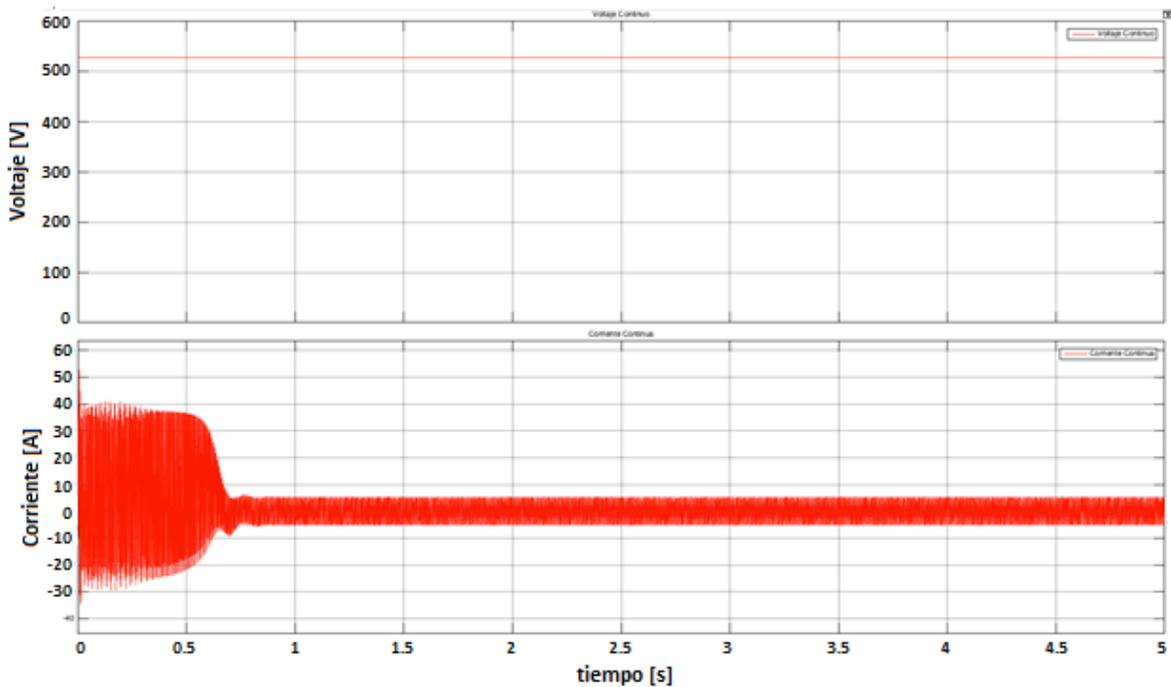


Figura N°48 “Voltaje continuo / Corriente continua”

En la figura anterior, se observa el comportamiento constante del voltaje filtrado a la salida del banco de condensadores, tiene un voltaje continuo promedio de 540 [V_{cc}], ya que no posee carga que haga operar al variador regenerativo en modo generador, en el caso contrario, producto de la regeneración, el voltaje continuo tendería a elevarse.

La corriente alcanza los 40 [A] durante el primer segundo, producto de la energía necesaria para sacar de inercia al motor y la aceleración que este obtiene hasta llegar a la velocidad de 1460 [rpm], luego como no tiene carga, opera con la corriente nominal de 7 [A].

Una vez filtrada la corriente continua, según el modo de operación del variador de frecuencia, pasa por la etapa conversora, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que se activan y desactivan comandada por una señal de disparo (pulsos) PWM, en modo motor según la frecuencia comandada y en modo generador según la referencia de la señal de la red de alimentación.

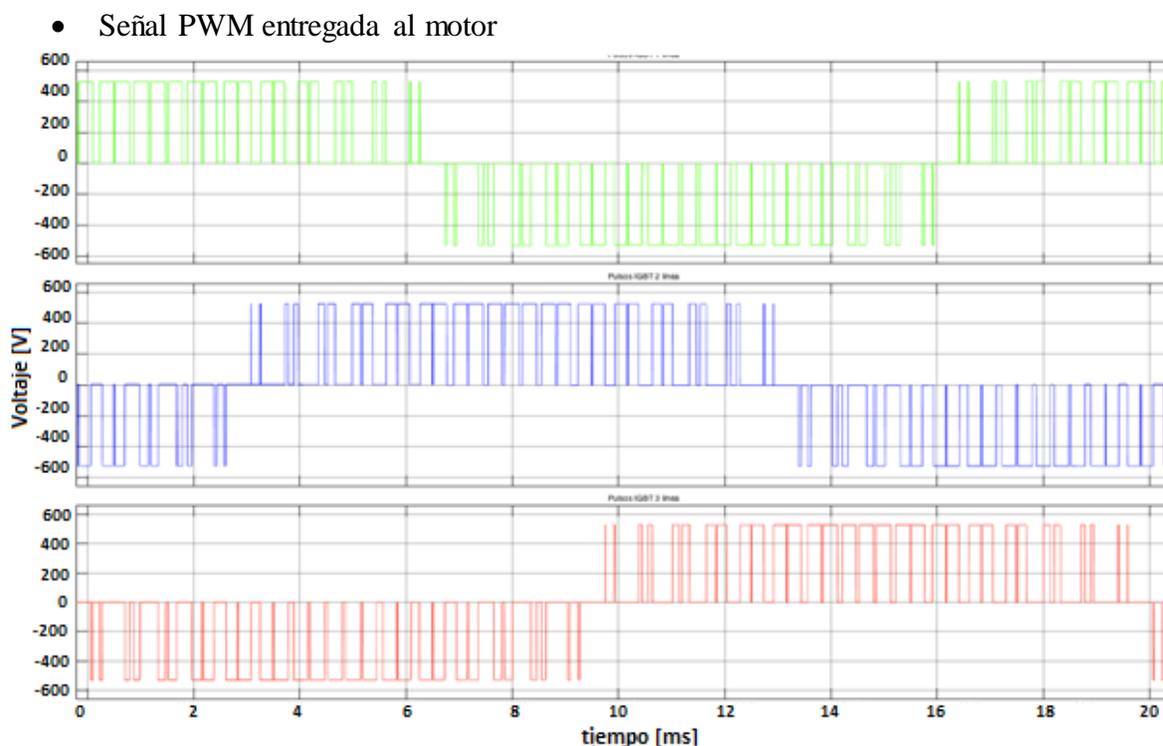


Figura N°49 “Alimentación por fase a la entrada del motor”

Se observa el comportamiento de las 3 fases que alimentan al motor trifásico, estas señales son producidas por el tren de pulso al conmutar los IGBT con un desfase de 120°,

comandada por la modulación PWM. La amplitud es 550[V], la cual es la obtenida en la etapa del banco de condensadores del variador de frecuencia regenerativo.

No hay mayor diferencia respecto al variador a prueba, producto que el motor opera en el primer cuadrante.

- Medición de Corriente y Voltaje entrada del motor.

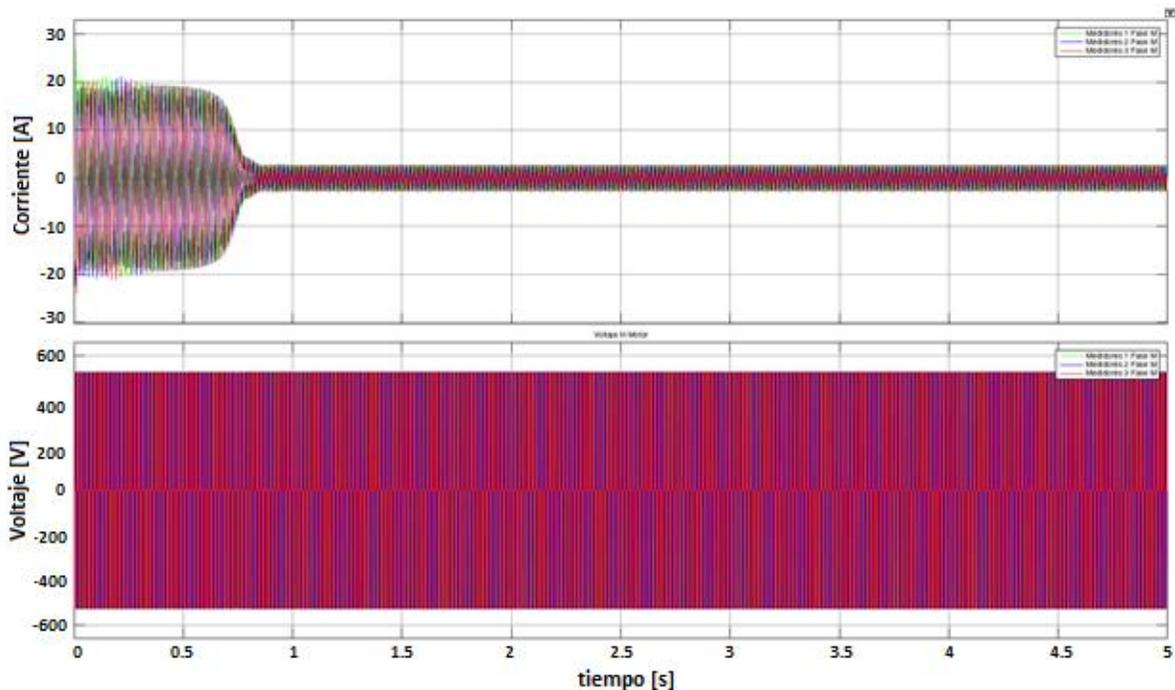


Figura N°50 “Corriente continua trifásica / Señal PWM trifásica”

Finalmente se observa en el primer gráfico que comportamiento de la corriente es similar a la del variador de frecuencia a prueba, producto que se encuentra en modo de operación como “motor”, ya que no cuenta con carga capaz de realizar un cambio de cuadrante a modo generador.

El segundo gráfico representa el tren de pulsos, al conmutar los IGBT de la etapa inversora del variador de frecuencia regenerativo.

7.5 Simulación del Banco de Prueba

Durante esta unidad, las simulaciones presentadas anteriormente (Cap. 7.3 y 7.4), se acoplan mediante la unión directa entre los dos motores, a través de una inercia y una mecánica rotacional en común, este acople en rigor determinó el tipo de librería de Simulink a utilizar en la modelación, ya que es un modelo muy específico, cuando el objetivo es acoplar motores y definir un motor como carga del otro.

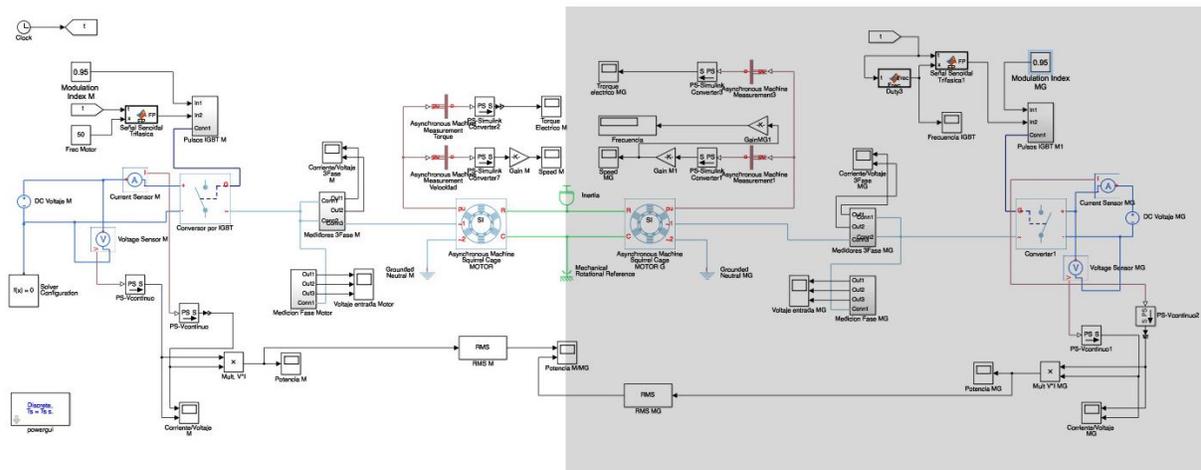


Figura N°51 “Simulación Matlab Simulink Banco de Prueba”

En la figura, la parte sin demarcar corresponde a la simulación presentada del variador de frecuencia a prueba, mientras que lo demarcado corresponde al variador de frecuencia regenerativo. Ambas etapas simuladas presentan una fuente continua de 540 [V], suprimiendo la etapa de rectificación y filtrado, con el fin de optimizar considerablemente el tiempo de simulación.

Anteriormente se analizó el comportamiento de las variables en cada etapa del variador de frecuencia a prueba y del variador de frecuencia regenerativo, por lo que a continuación, se presenta el comportamiento dinámico de las variables en potencia [kW], par generado [Nm] y velocidad [rpm] de los motores acoplados.

Se controla como carga variable, al motor conectado a través del variador de frecuencia regenerativo, para visualizar en el variador de frecuencia a prueba el trabajo que realiza en planta.

El procedimiento para regenerar en modo escalar, es hacer partir al variador de frecuencia a 50 [Hz], como están los motores acoplados y de frente, para que ambos giren en el mismo sentido mecánicamente, se hace partir el variador de frecuencia regenerativo en sentido contrario a 50[Hz], y este va disminuyendo la frecuencia de manera escalonada, con el objetivo de frenar de manera controlada al motor del variador a prueba, simulando ser carga.

- Frecuencia de conmutación, variador de Frecuencia Regenerativo.

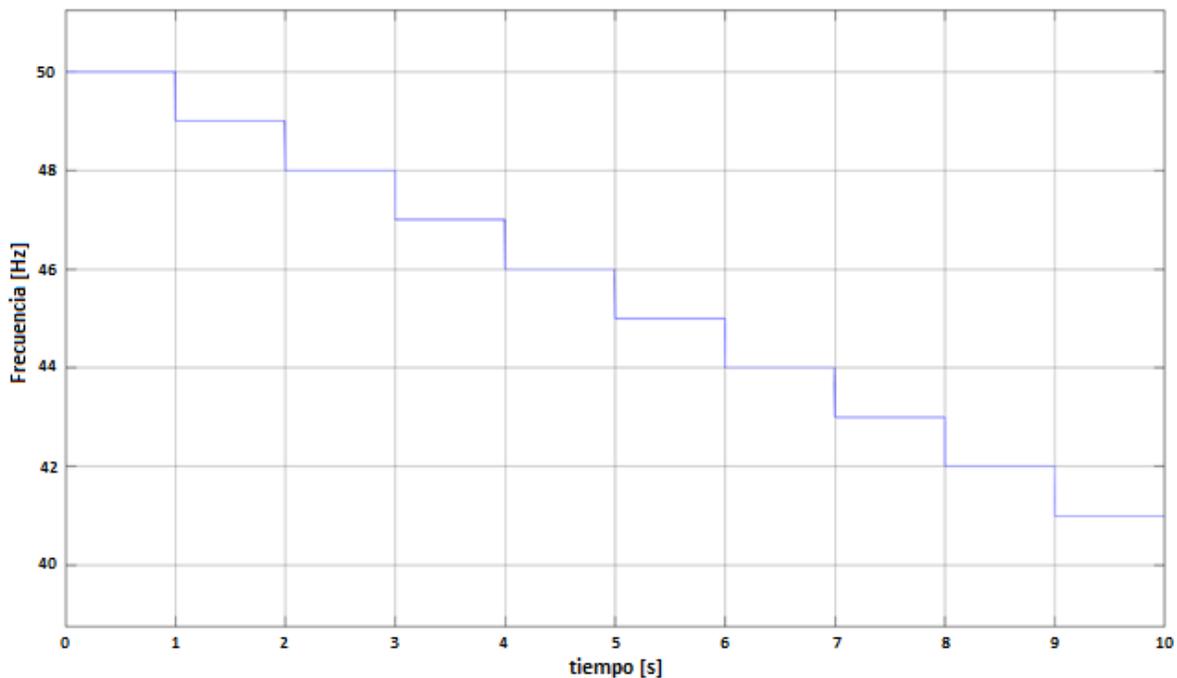


Figura N°52 “Escalamiento señal de frecuencia en VDF regenerativo”

Como se explicaba anteriormente, en la figura superior, se observa el cambio de frecuencia en la portadora, para la conmutación de los IGBT, el cual cada 1 segundo cambia su frecuencia en una unidad menos, partiendo de los 50[Hz] hasta los 41[Hz].

- Potencia visualizada en el variador de Frecuencia a prueba

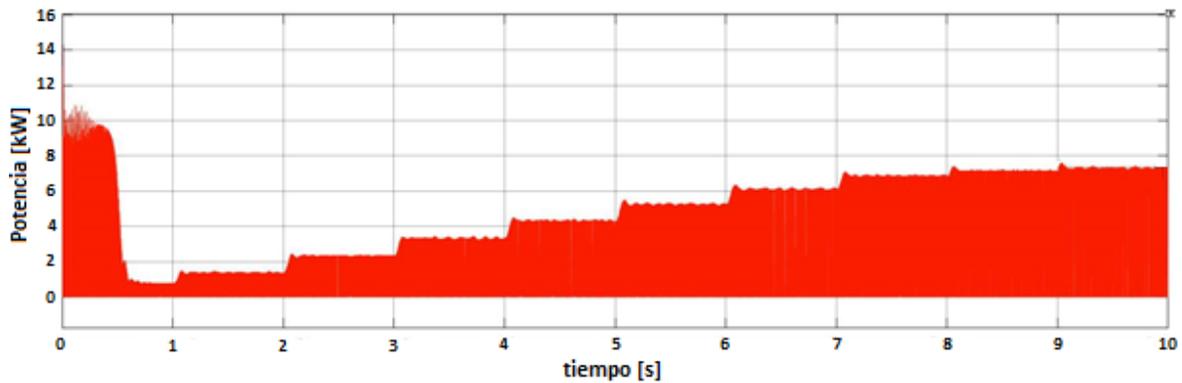


Figura N°53 “Potencia consumida por el motor acoplado al VDF a prueba”

En la figura N°53, se destaca el comportamiento dinámico de la potencia que visualiza el variador de frecuencia a prueba, ante un eventual cambio de frecuencia (Figura N°52) a través del tiempo, producto del aumento de la carga al frenar el motor controlado por el VDF regenerativo, logrando un consumo de 7[kW], esto es una gran ventaja en relación a la potencia del variador en vacío, ya que demuestra que el equipo está operando, simulando su funcionamiento rutinario en planta.

- Potencia visualizada en el variador de frecuencia regenerativo

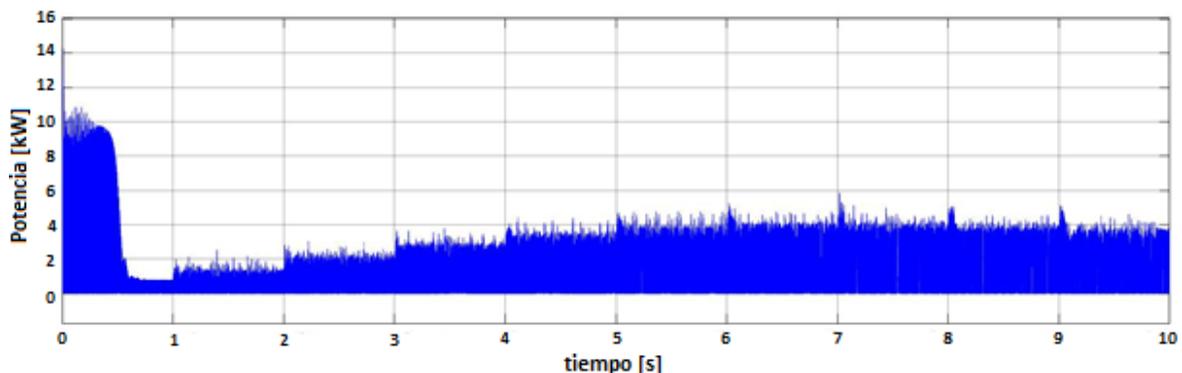


Figura N°54 “Potencia consumida por el motor acoplado al VDF Regenerativo”

Se analiza el comportamiento a través del tiempo de la potencia [kW], que se visualiza en el variador de frecuencia regenerativo en modo escalar, el cual ante el cambio en la frecuencia de trabajo (Figura N°52), se encuentra regenerando potencia proveniente del motor asíncrono de 15[kW], hacia el sistema de alimentación.

Se observa que alcanzando una cierta frecuencia, la potencia no sigue aumentando, debido a la curva de trabajo del par de los motores de inducción, logrando una regeneración máxima a los 5 segundos, correspondiente a 45[Hz].

Los motores al estar ejerciendo el mismo par, debiesen consumir la misma potencia, sin embargo, las potencias son distintas, se obtiene por parte del motor conectado al VDF regenerativo un consumo de 4 [kW], que corresponde al 53,3% respecto al otro motor. La diferencia obtenida es la energía regenerada, alcanzando el 46,6%.

- Velocidad de los motores en el VDF a prueba y VDF Regenerativo

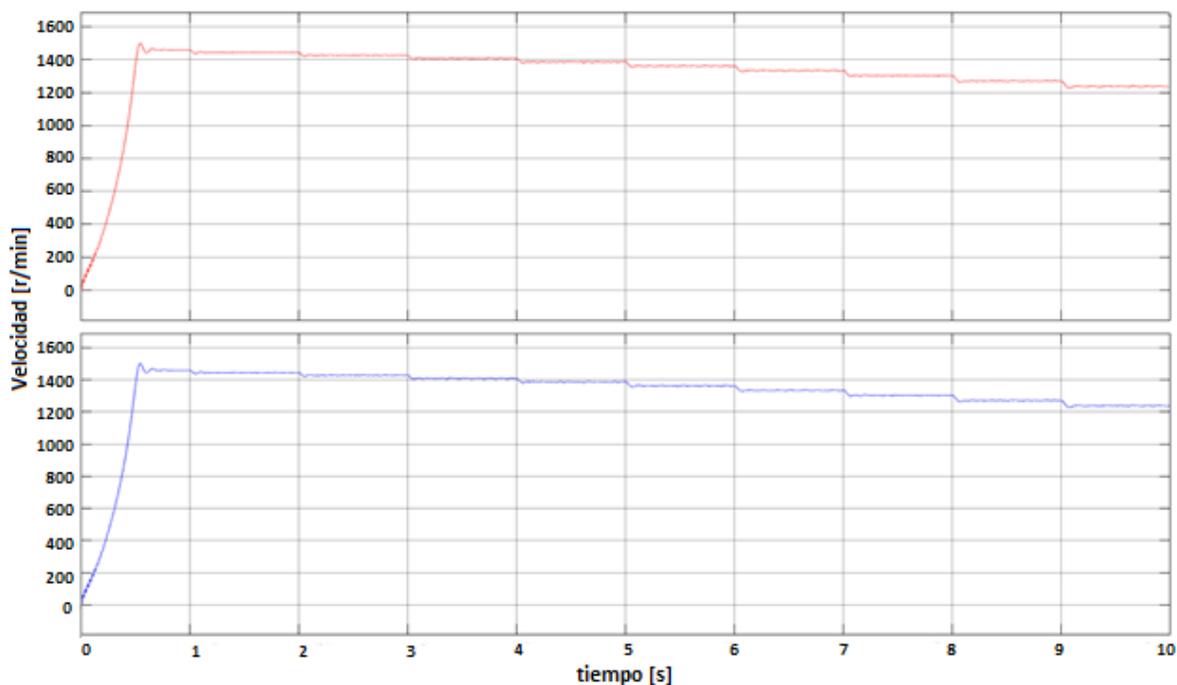


Figura N°55 “Velocidad del motor del VDF a prueba y Velocidad del motor del VFD regenerativo”

Básicamente se observan dos señales iguales, provenientes de las revoluciones por minuto de los motores.

En rojo, se observa los cambios de velocidad que presenta el motor conectado al variador de frecuencia a prueba, y en azul, el cambio de velocidad de la carga. El comportamiento dinámico es producto del cambio escalonado de frecuencia programada en el variador de frecuencia regenerativo, el cual reduce la velocidad del motor (carga).

Estos gráficos demuestran que los dos motores se encuentran acoplados entre sí, ya que los aumentos y disminuciones de velocidad ocurren de la misma magnitud y en un mismo instante de tiempo.

Finalmente se observa que la partida de los motores alcanza su velocidad nominal de 1460[rpm] en un tiempo de 0,6[s] aproximadamente, posterior a ello, a raíz del control de carga, el motor del VDF regenerativo frena al motor del VDF a prueba, llegando a una velocidad de 1200[rpm] aproximadamente.

- Par motor enlazado a Variador de Frecuencia a prueba.

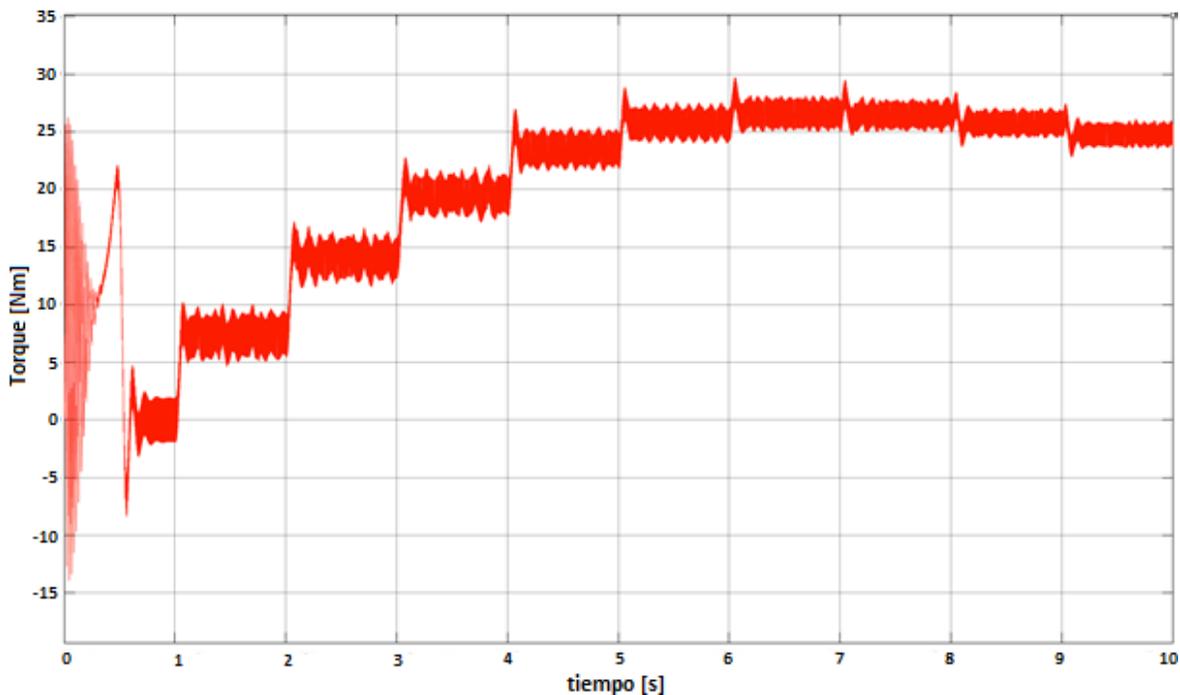


Figura N°56 “Par generado por el motor conectado al VDF”

El Par es una variable muy importante en el sistema, ya que es la principal alerta para advertir la saturación de los motores.

En el gráfico superior, se observa el comportamiento del torque eléctrico del motor ante los cambios de frecuencia generada por el variador de frecuencia regenerativo, el torque máximo es generado entre los 6-8 [s], periodo donde ocurre la máxima regeneración antes mencionada.

Ocurre un peak de par al inicio, producto de la aceleración de los motores, hasta alcanzar a los 1460 [rpm], y posterior, un aumento escalar del par en función de la disminución de frecuencia en el drive regenerativo, hasta alcanzar 25 [Nm] aproximadamente.

- Par motor enlazado al variador de frecuencia regenerativo.

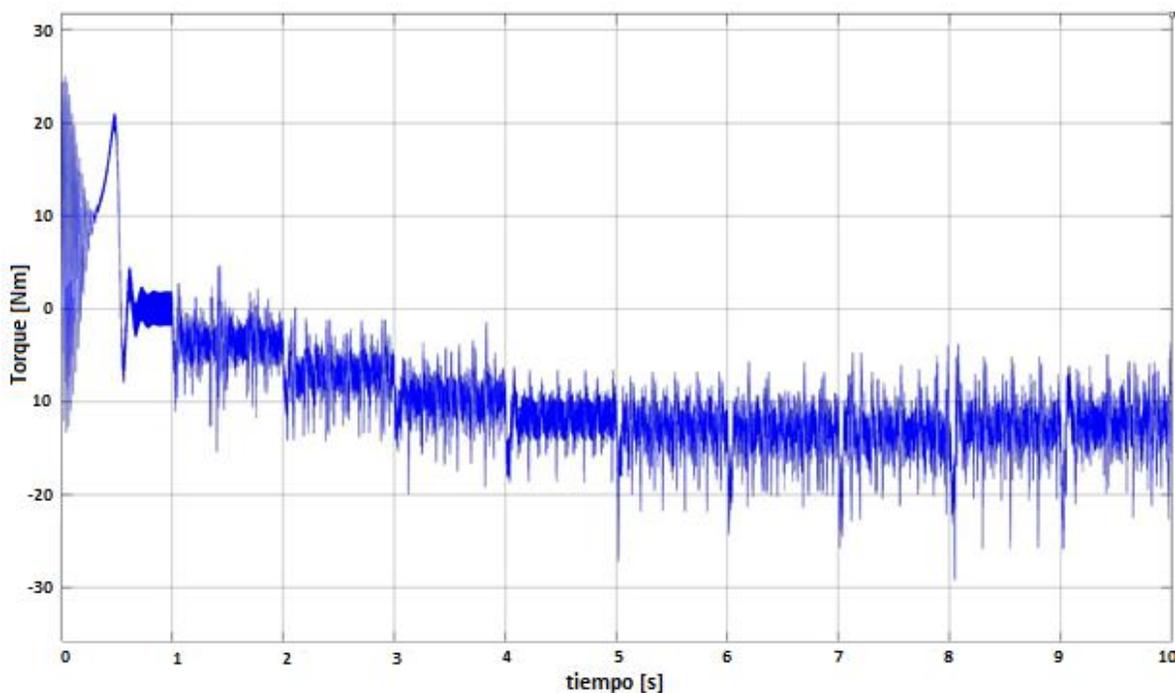


Figura N°57 “Par generado por el motor conectado al VDF regenerativo”

En la figura se observa el comportamiento en torque eléctrico del motor que está conectado al variador de frecuencia regenerativo. Producto que el motor está trabajando como generador, está operando en el segundo cuadrante, de ahí se deduce el torque eléctrico negativo.

Se observa que el par máximo se ejerce en el tiempo 5-8 [s], correspondiente entre los 45[Hz] y 42[Hz], por lo que la máxima regeneración de energía se encuentra dentro de estos tiempos.

De esta manera, se concluye una dinámica estable del banco de prueba, obteniendo carga controlada para el variador de frecuencia a prueba y regenerando una parte del consumo del sistema.

8. Implementación del banco de prueba

8.1 Introducción

En el presente capítulo se muestra la implementación del banco de prueba, basado en el montaje de los variadores de frecuencia y dispositivos de control. Se presenta el diseño y las características relevantes de las partes que componen el sistema.

Se realiza la fabricación de una base de estructura sólida, el montaje de los motores, se menciona el método para un acople óptimo y posterior, la técnica para realizar la alineación de los motores.

Se desarrolla la programación del PLC para el control del sistema, por medio del programa RSLogix de Rockwell Automation, y paralelo, se realiza el diseño y la programación del HMI para vincular la pantalla con el controlador, por medio de la comunicación Ethernet/IP.

Por último, se presentan las imágenes del proyecto implementado, especificando los equipos que lo componen.

8.2 Diseño del banco de prueba

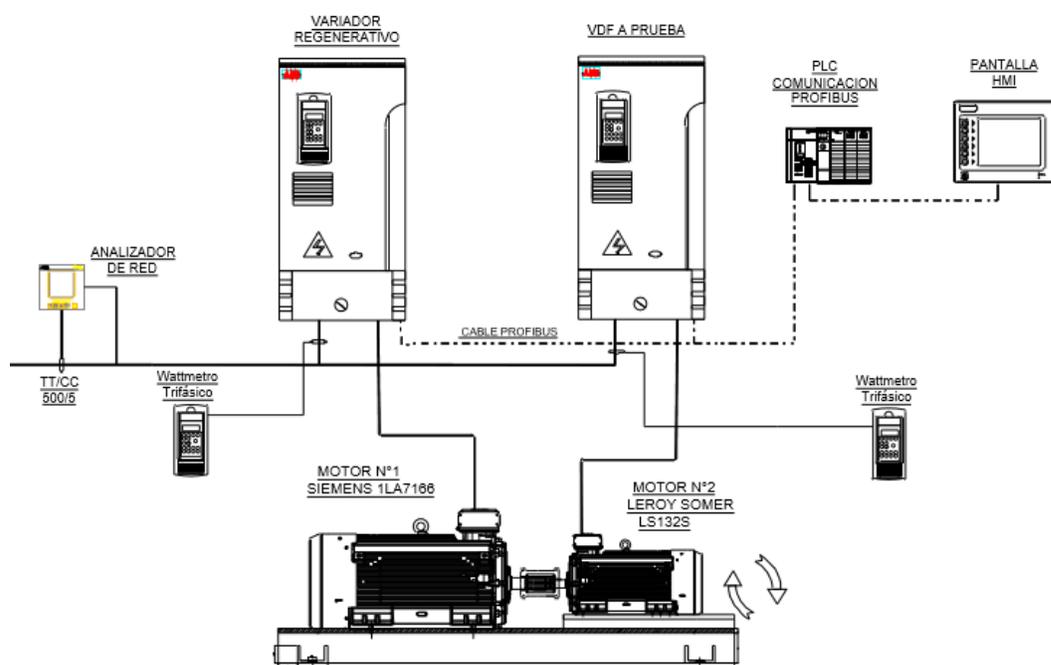


Figura N°58 “Diseño general para la implementación banco de prueba”

8.3 Descripción Técnica de equipos y dispositivos

A continuación se presentan las tablas que entregan información respecto a las características de los equipos necesarios que se utilizarán en el proyecto, en función de las descripciones investigadas en las etapas anteriores.

Pantalla HMI Red Lion G306	
Tamaño pantalla	5,7” monocromática
Tensión de alimentación	24 [Vcc]
Pantalla	Táctil resistiva analógica
Multi-lenguaje	Si (hasta 5 lenguajes)
Alarmas	Si
Control de Acceso Web remoto	Si
Password de varios niveles	Si
Indicadores panel	3 LED
Teclas en pantalla	5
Puerto RS-232	Si (2)
Puerto RS-422/485	Si
Ethernet Port	Si
USB port	Si

Tabla N°1 “Descripción pantalla HMI”

Allen Bradley SLC 5/05 CPU	
Tipo	PM572
Tensión de alimentación	220 [Vac]
Memoria de datos de usuario integrada	16 kB
Numero máx. de E/S	
Numero de módulos de ampliación en bus E/S	6
Puntos de entradas/salidas máx.	4096
Opciones de entradas/salidas	E/S locales y remotas
Puertos incorporados	Ethernet y RS-232-C
Almacenamiento de datos(memoria interna)	pila

Tabla N°2 “Descripción PLC serie SLC 5/05”

Módulo 1746-IB16	
Tensión de señal entrada	24 Vdc
Número de entradas	16
Voltaje operación	10 - 30 Vdc
Señal delay máx.	On = 8 ms
	Off = 8 ms
Entrada Corriente nominal	8 mA @ 24 Vdc

Tabla N°3 “Descripción Entradas digitales para PLC Allen Bradley SLC 5/05”

Módulo 1746-OW16		
Categoría de Voltaje	AC / DC Relé	
Número de salidas	16	
Voltaje operación	5 Vdc	5 ... 125
	24 Vdc	5 ... 265
Retardo de señal, carga resistiva máx.	On = 10 ms	
	Off = 10 ms	
Corriente carga mínima	10 mA @ 5Vdc	
Corriente constante por modulo	10 Aac 8 A / common	

Tabla N°4 “Descripción Salidas digitales para PLC Allen Bradley SLC 5/05”

Módulo E/S análogo SLC 5/05	
Número de canales por modulo	
Entradas analógicas (AI)	2 (corriente o voltaje)
Salidas analógicas (AO)	2 (corriente)
Entradas analógicas (AI)	
Configuración de la señal por AI	Máximo posible por modulo y según Configuración: número de AI/puntos de medición
0...+10V	0 a 32767 (rango en decimal)
-10 V...+10V	-32767 a 32767 (rango en decimal)
0...20mA	0 a 16384 (rango en decimal)
4...20mA	3277 a 32767 (rango en decimal)
Salida analógicas (SA)	
0...20mA	0 a 31208 (rango en decimal)
4...20mA	6242 a 31208 (rango en decimal)
Resistencia de salida(carga) como salida de corriente	0...500Ω

Tabla N°5 “Descripción E/S análogas para PLC Allen Bradley SLC 5/05”

Variador de frecuencia regenerativo		
Código tipo		Acs800-11-0030-5
Un (tensión nominal)		500 [V] (rango 380 a 500[V])
Especificaciones nominales	I cont. máx.	47 [A]
	I máx.	68 [A]
Uso sin sobrecarga	P cont. máx.	30 [kW]
Uso en sobrecarga ligera	In	45 [A]
	Pn	30 [kW]
Uso en trabajo pesado	Ihd	37 [A]
	Phd	22 [kW]
Nivel de ruido		70 dB(A)
Disipación de calor		1000 [W]
Flujo de aire		350 [m ³ /h]

Tabla N°6 “Descripción principal Variador de frecuencia regenerativo”

Variador de frecuencia		
Código tipo		Acs800-01-0060-5
Un (tensión nominal)		500 [V] (rango 380 a 500[V])
Especificaciones nominales	I cont. máx.	75 [A]
	I máx.	79 [A]
Uso sin sobrecarga	P cont. máx.	45 [kW]
Uso en sobrecarga ligera	In	75 [A]
	Pn	45 [kW]
Uso en trabajo pesado	Ihd	60 [A]
	Phd	37 [kW]
Nivel de ruido		70 dB(A)
Disipación de calor		1000 [W]
Flujo de aire		350 [m ³ /h]

Tabla N°7 “Descripción principal Variador de frecuencia”

Motor trifásico de Inducción	
Marca	Siemens
Tipo	1LA7166 4AA60
Potencia	15 [kW]
HP	20 [HP]
RPM	1460 [r/min]
Tensión nominal	380 - 420 [V]
Frecuencia nominal	50 Hz
In	28.5 [A]
Tn	98 [Nm]
Ts	2,6*Tn
Tmax	3*Tn
Peso	85 [Kg]

Tabla N°8 “*Descripción motor trifásico*”

Motor trifásico de Inducción	
Marca	Leroy
Tipo	LS132 ST
Potencia	7.5 [kW]
HP	10 [HP]
RPM	2905 [r/min]
Tensión nominal	380 - 420 [V]
Frecuencia nominal	50 Hz
In	14.7 [A]
Tn	24.5 [Nm]
Ts	3.4*Tn
Tmax	3.6*Tn
Peso	39 [Kg]

Tabla N°9 “*Descripción motor trifásico*”

8.4 Fabricación de base para los motores

Una pieza importante para realizar el montaje de los motores es la fabricación de una base de estructura metálica, que sea capaz de brindar seguridad durante las pruebas de arranque y operación de los motores acoplados.

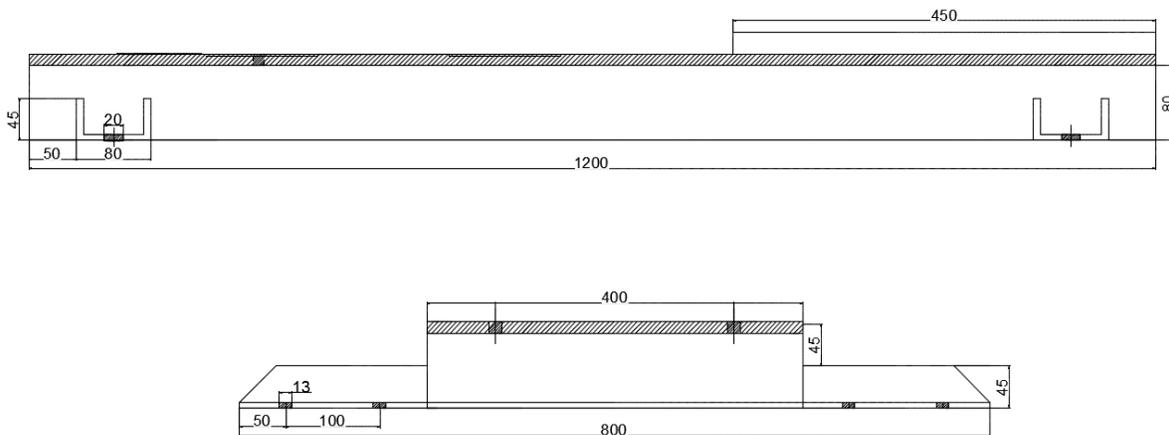


Figura N°59 “Diseño de base para motores”

La estructura se fabrica con vigas de acero laminado UPN 80, de 6 [mm] de sección y de 8,87 [kg/m], para la plataforma se monta una plancha de acero laminado de 10mm de espesor y densidad de 80 [kg/m²].

Los Brazos se diseñan con el objetivo de fijar puntos de apoyo para anclar la base a la superficie.



Figura N°60 “Fabricación de base para motores”

8.5 Acoplado de Motores

El acoplamiento mecánico es una pieza fundamental para la implementación en la unión de los ejes de los motores, y debe cumplir con ciertas exigencias que garantice el correcto funcionamiento. La elección del tipo de acoplamiento depende principalmente del torque al cual estará sometido, las revoluciones de los ejes y los diámetros de los ejes de los motores.

8.5.1 Objetivo

El principal objetivo es realizar un acoplamiento óptimo y seguro, tomando en cuenta todas las variables dependientes para realizar esta operación. Para ello, se describe técnicamente los procedimientos necesarios para seleccionarlo de manera asertiva.



Figura N°61 “Estructura interna y externa del acople para motores eléctricos”

Existe en el mercado amplia variedad en tipos de acoples para motores eléctricos, tanto como rígidos y flexibles. Dado al tipo de esfuerzo mecánico que realizará el acople en el proyecto, se escoge un modelo de rejilla flexible serie Steelflex, que cuenta con características de rigidez para altos índices de torque, y flexibilidad para absorber las vibraciones.

8.5.2 Descripción Técnica del acople

Dado que el acople estará sometido a altas cargas debido al accionamiento eléctrico de los motores, y los peak de torque generados entre las revoluciones de un motor y la partida del otro, se obtiene el torque total del sistema a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Torque Toal (lb - in)} = \frac{\text{HP motor} * 63000}{rpm}$$

Teniendo el dato de torque de operación, a través de una tabla del fabricante, se obtiene el tamaño del acoplado óptimo para el proyecto en (libras- pulgadas).

Size ①	Torque Rating (lb-in) ②	Allow Speed RPM ③	Max Bore ④	Min Bore ⑤	Cplg Wt with No Bore (lb)	Lube Wt (lb)	A	B	C	D	J	S	GAP
1020T	460	4500	1.125	0.500	4.2	0.06	3.82	3.88	1.88	1.56	2.62	1.54	0.125
1030T	1,320	4500	1.375	0.500	5.7	0.09	4.16	3.88	1.88	1.94	2.69	1.54	0.125
1040T	2,200	4500	1.625	0.500	7.4	0.12	4.50	4.12	2.00	2.25	2.75	1.58	0.125
1050T	3,850	4500	1.875	0.500	12	0.15	5.32	4.88	2.38	2.62	3.19	1.76	0.125
1060T	6,050	4350	2.125	0.750	16	0.19	5.82	5.12	2.50	3.00	3.68	2.06	0.125
1070T	8,800	4125	2.500	0.750	23	0.25	6.25	6.12	3.00	3.44	3.81	2.12	0.125
1080T	18,150	3600	3.000	1.062	39	0.38	7.50	7.12	3.50	4.12	4.55	2.54	0.125
1090T	33,000	3600	3.500	1.062	56	0.56	8.31	7.88	3.88	4.88	4.81	2.82	0.125

Tabla N°9 “Tabla modelo de acople según clasificación de torque”

También se obtiene las dimensiones mínimas y máximas de los diámetros de los ejes del motor y la carga, velocidad máxima en RPM, y las dimensiones del acoplado, entre otras.

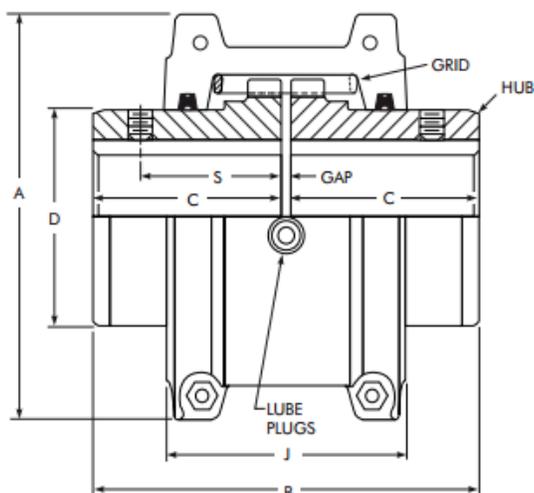


Figura N°62 “dimensiones del acople”

8.5.3 Factor de Servicio

El factor de servicio es una herramienta representada en tabla, que permite seleccionar un factor de trabajo para identificar el tipo de esfuerzo mecánico que será sometido el acople, según el comportamiento dinámico del torque en la transmisión del eje producido por el motor eléctrico.

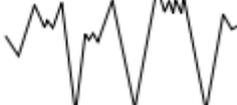
Dinámica del Torque	Aplicaciones Típicas	Factor de servicio
	Par constante como centrífuga, bombas, sopladores y compresores. Aplicaciones con partidor suave.	1.0
	Servicio continuo, con un poco de esfuerzo de torsión. Aplicaciones con tiro forzado.	1.5
	Servicio oscilatorio, para cargas con dinámica en la partida.	2.0
	Servicio para cargas que se requiera par dinámico, ejemplo sistema para triturador de piedra.	2.5
	Servicio para cargas pesadas, con peak positivos y negativos y par dinámico.	3.0
	Servicios para cargas pesadas, con par muy variable, ej. Compresores, chancadoras.	>4.0

Tabla N°10 “Tabla de factor de potencia según la dinámica de torque”

8.5.4 Implementación

Dado a las características de los motores, que corresponden a un Frame de 160L y 132S, para 20HP y 10HP respectivamente, el torque total (lb-in) se calcula a través del motor que genera mayor par, por lo que corresponde a:

$$\text{Torque Total (lb-in)} = \frac{20 \text{ HP} * 63000}{1460 \text{ rpm}} = 863(\text{lb-in})$$

Para el proyecto, considerando el torque total, por tabla N°9 se debería seleccionar el tamaño 1030T, que tiene una capacidad máxima de torque 1320 (lb-in) con una velocidad máxima de 4500 RPM. Sin embargo, esta operación garantiza un torque continuo, y el banco de prueba está enfocado a operaciones dinámicas del torque, tales como frenos, bruscas aceleraciones y contramarchas, para lo cual se cuenta con un factor de servicio de valor 4.0 que garantice la seguridad en la implementación:

$$\begin{aligned} \text{Torque Total (lb-in)} &= 863(\text{lb-in}) * \text{Factor de Servicio} \\ &= 863(\text{lb-in}) * 4.0 \end{aligned}$$

$$\text{Torque Total (lb-in)} = 3452 (\text{lb-in})$$

Corresponde al tamaño del acople 1050T, que tiene una capacidad de torque máximo de 3850 (lb-in) con una velocidad máxima de 4500 RPM.

Según tabla N°9, el diámetro máximo para el tamaño 1050T es de 1.875” = 47 mm y diámetro mínimo de 0.5” = 12.7 mm.

El diámetro de los ejes de los motores, de 20HP y 15HP, obtenido por el frame, corresponden a 42 mm y 38mm respectivamente.

Dado las características para seleccionar el tamaño del acople, el que satisface con seguridad la correcta operación es 1050T.

Una vez obtenido el acople, se procede a adaptarlo a los tamaños de los ejes de los motores a través de un torno, y se instala un perno pasado para mejorar la sujeción.



Figura N°63 “Adaptación acople 1050T según motor”

Finalmente se presentan los motores con el acople respectivo en cada eje, se alinean los ejes de los motores con el método de relojes comparadores, reduciendo al máximo el margen de error, para evitar vibración en el momento de operación, se instala la grilla metálica que une las dos caras del acople y posteriormente, se instala el protector externo, la grilla ayuda a mejorar ciertas vibraciones que pueden quedar presentes entre ejes, producto a una cierta holgura que trabaja en los movimientos radiales.

Una vez sellado, se inyecta lubricante, que corresponde por tamaño a 0.15 Lb.



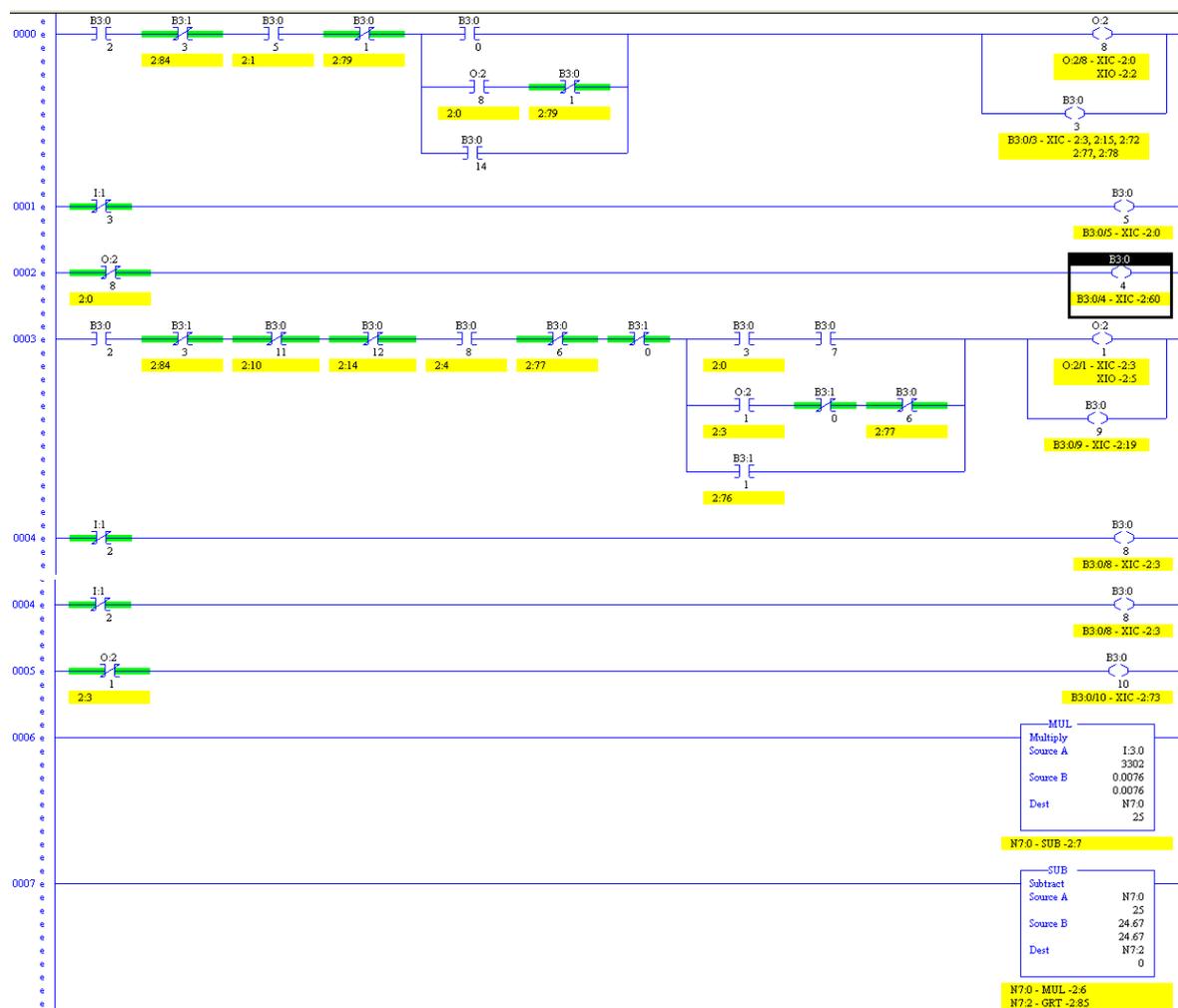
Figura N°64 “Alineación de motores con los acople”

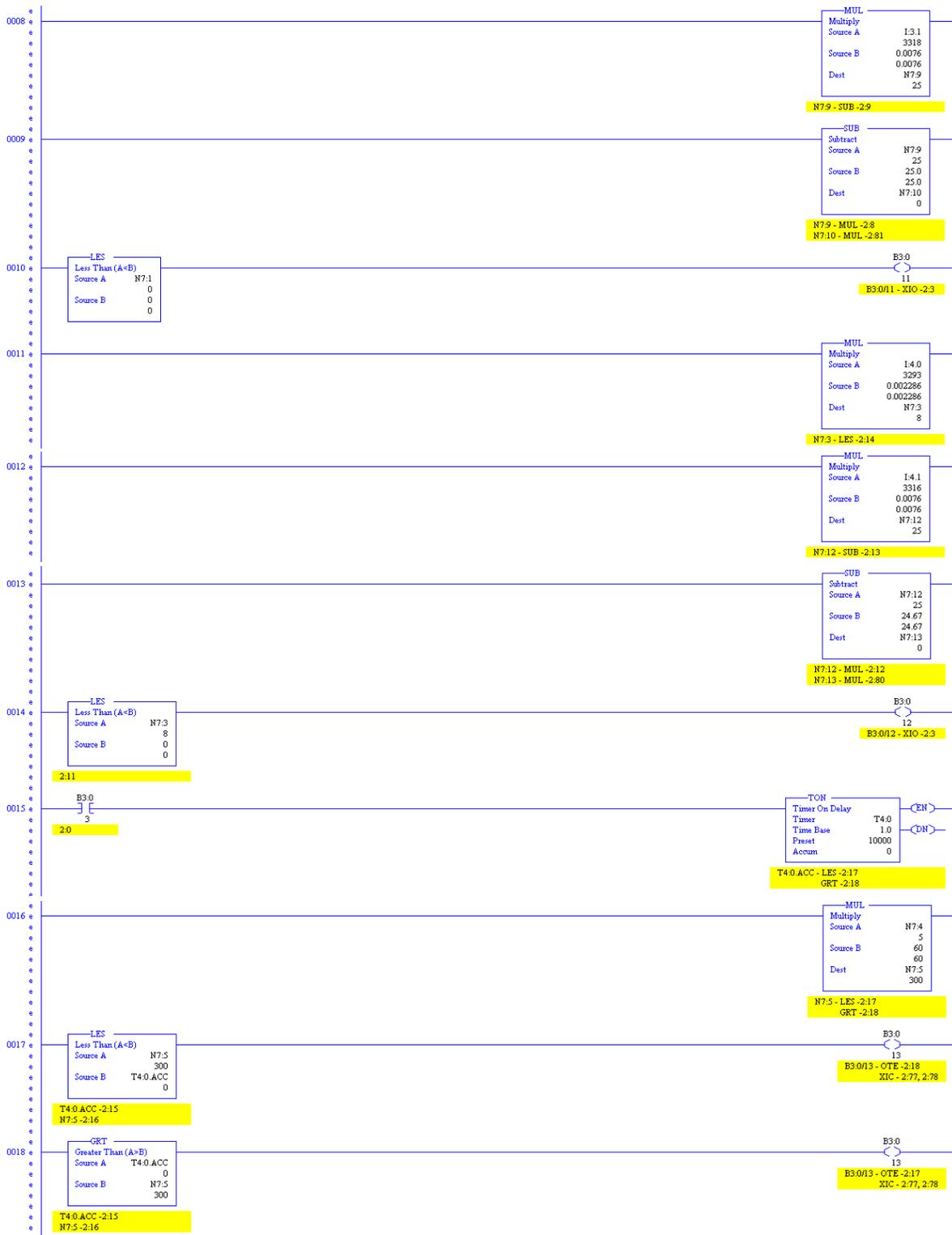
8.6 Programación de PLC a través del software “RS Logix 500”

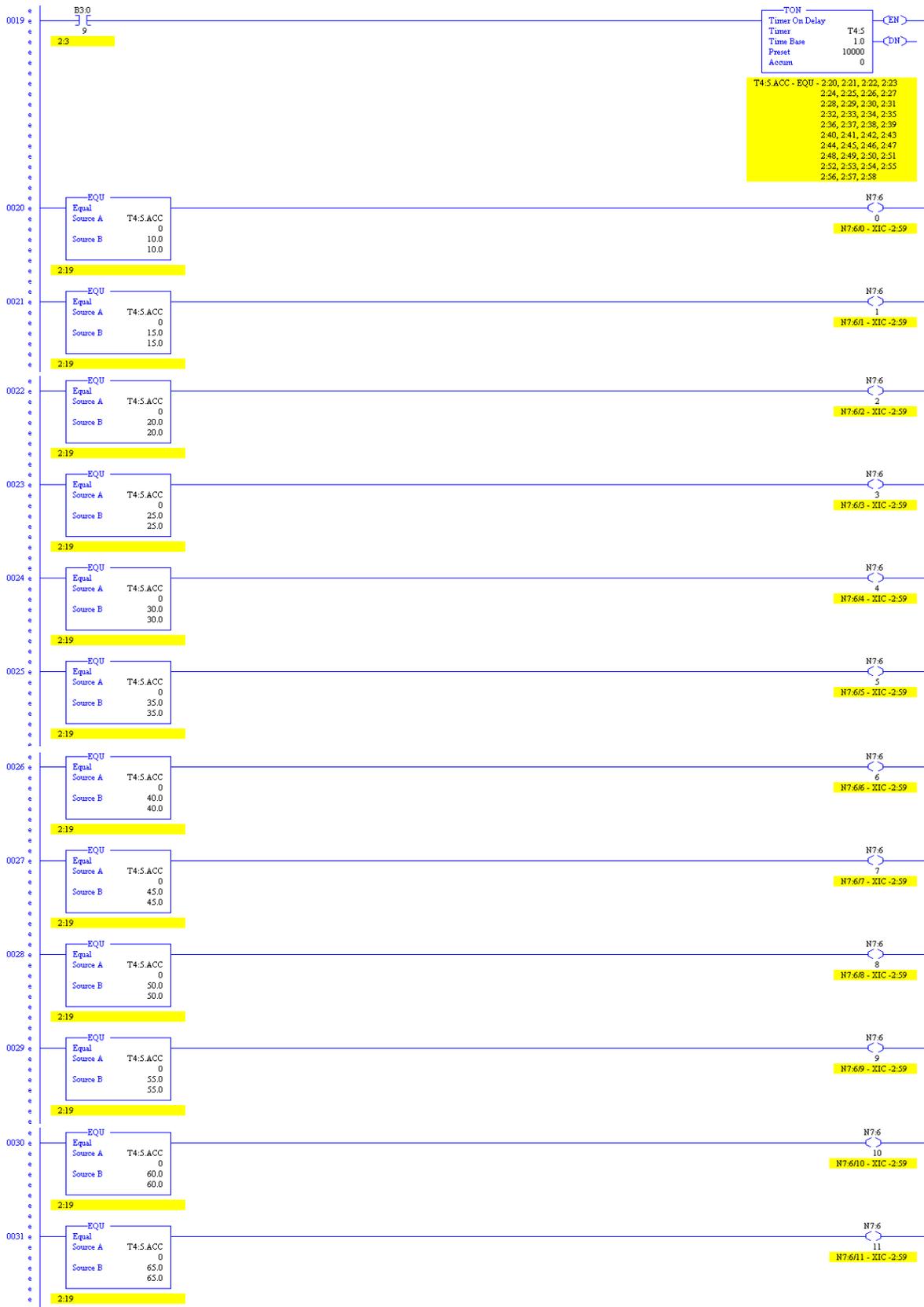
RS Logix 500 es un software con una interfaz que permite crear y editar un programa de control en lenguaje Ladder (escalera), para equipos de la marca Rockwell Automation. Podremos cargar el programa residente en un PLC hacia la computadora, realizar un nuevo programa desde la PC hacia el PLC, o leer los datos que tenemos actualmente en un PLC.

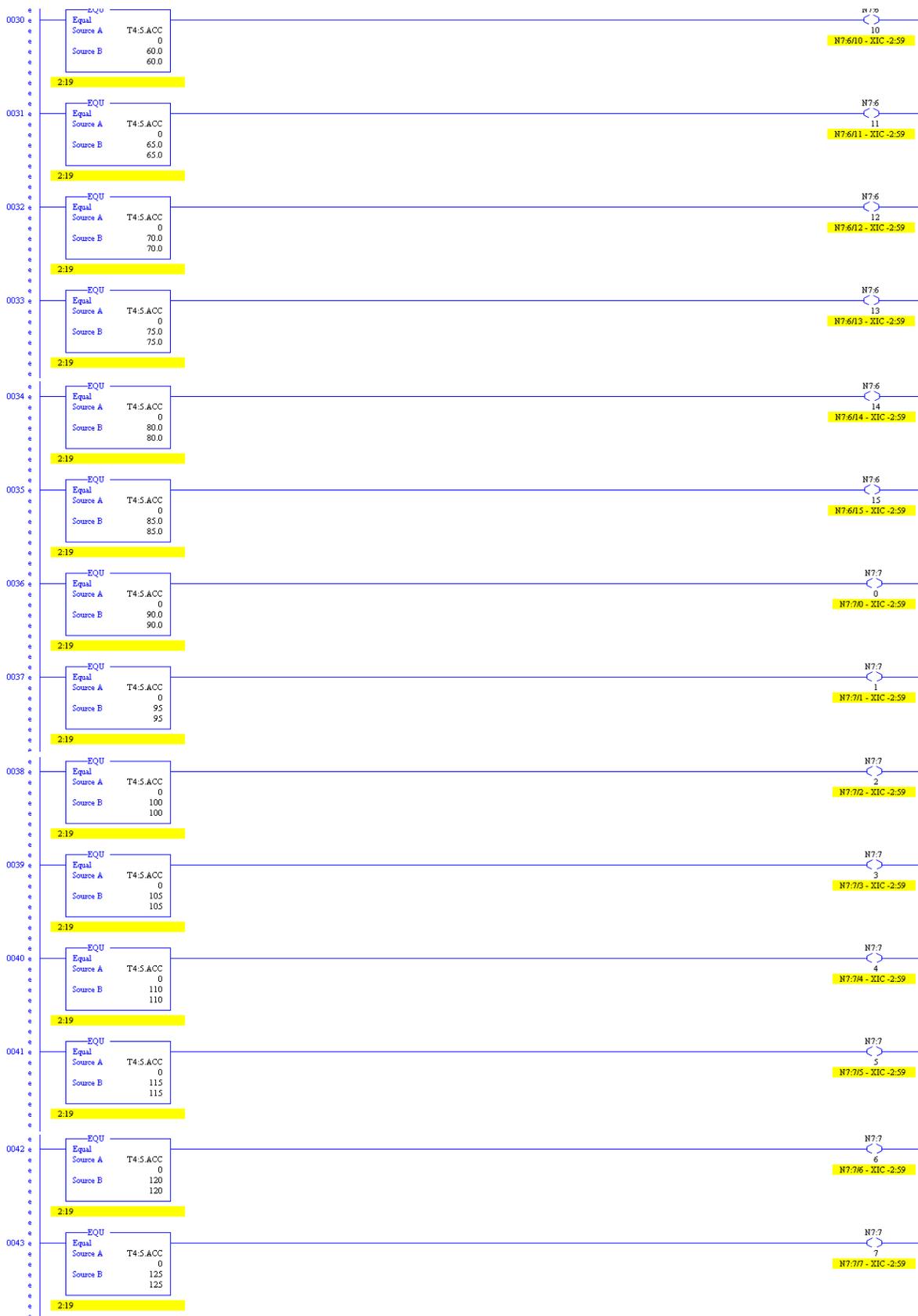
La ventana de interfaz del RS Logix contiene una barra de instrucciones, que permite, a través de pestañas y botones, acceder de forma rápida a las instrucciones más habituales del lenguaje Ladder.

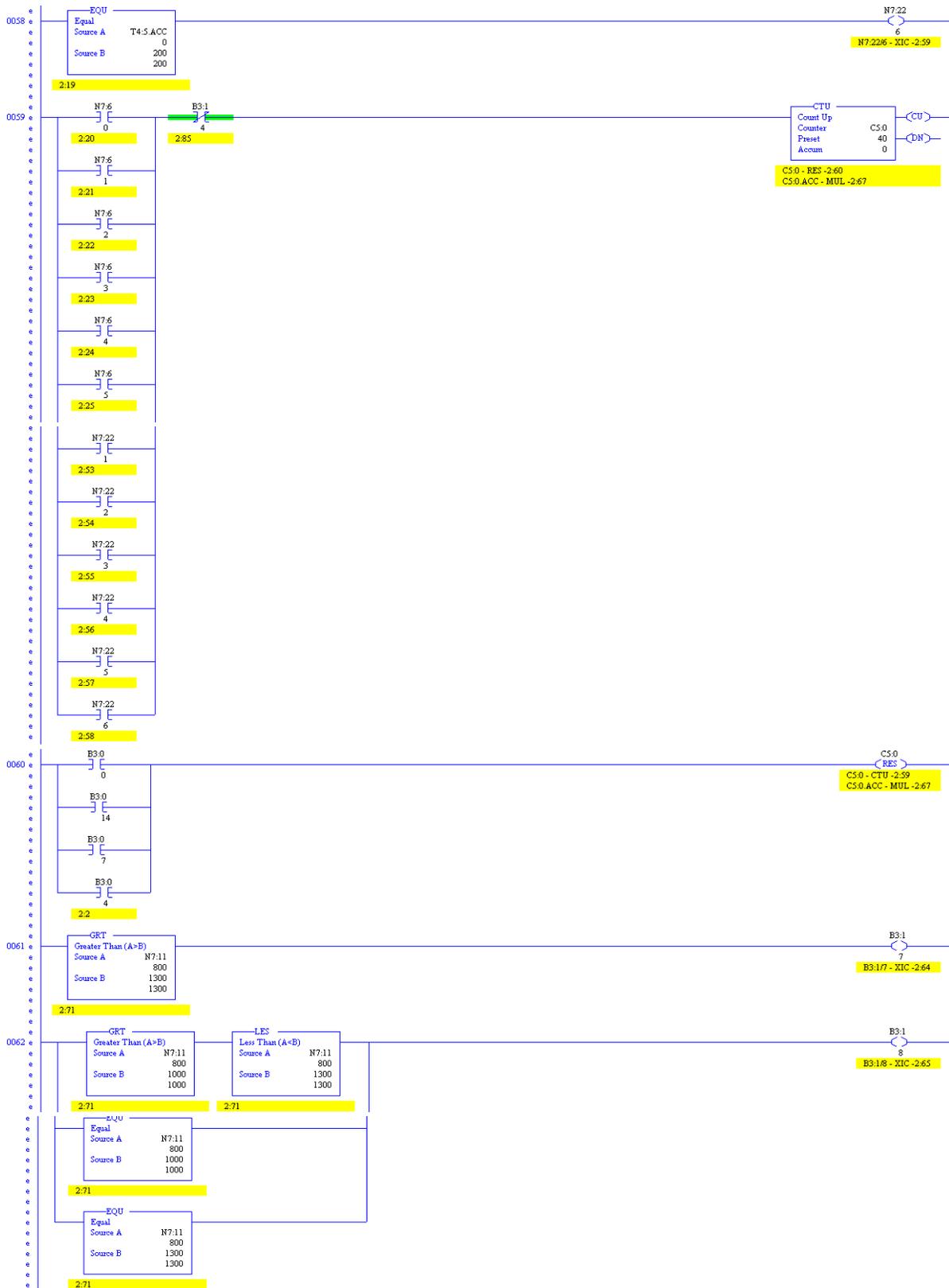
A continuación se presenta la programación realizada en lenguaje Ladder en el PLC SLC500, con el objetivo de realizar un control automático en el banco de pruebas.

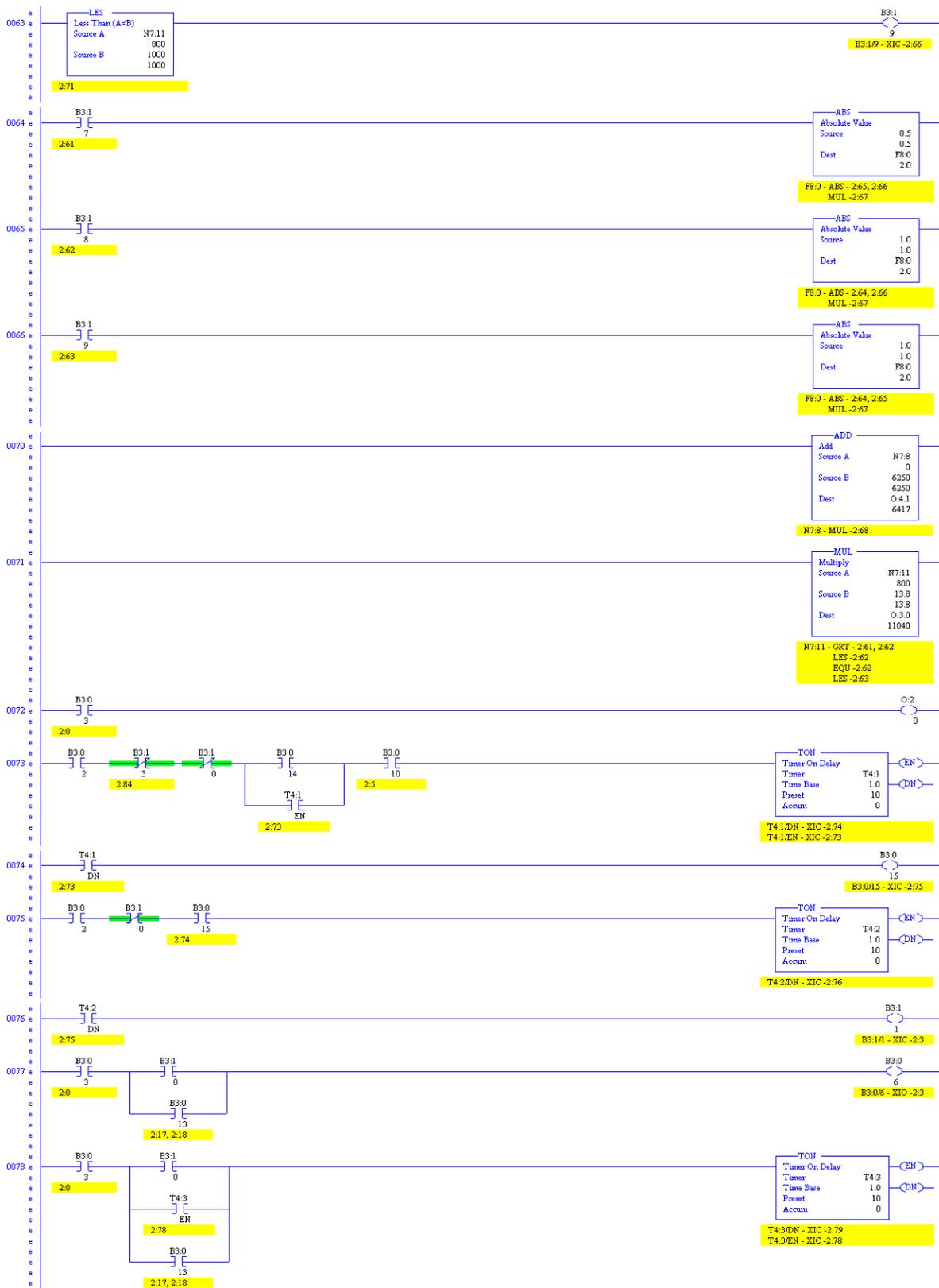












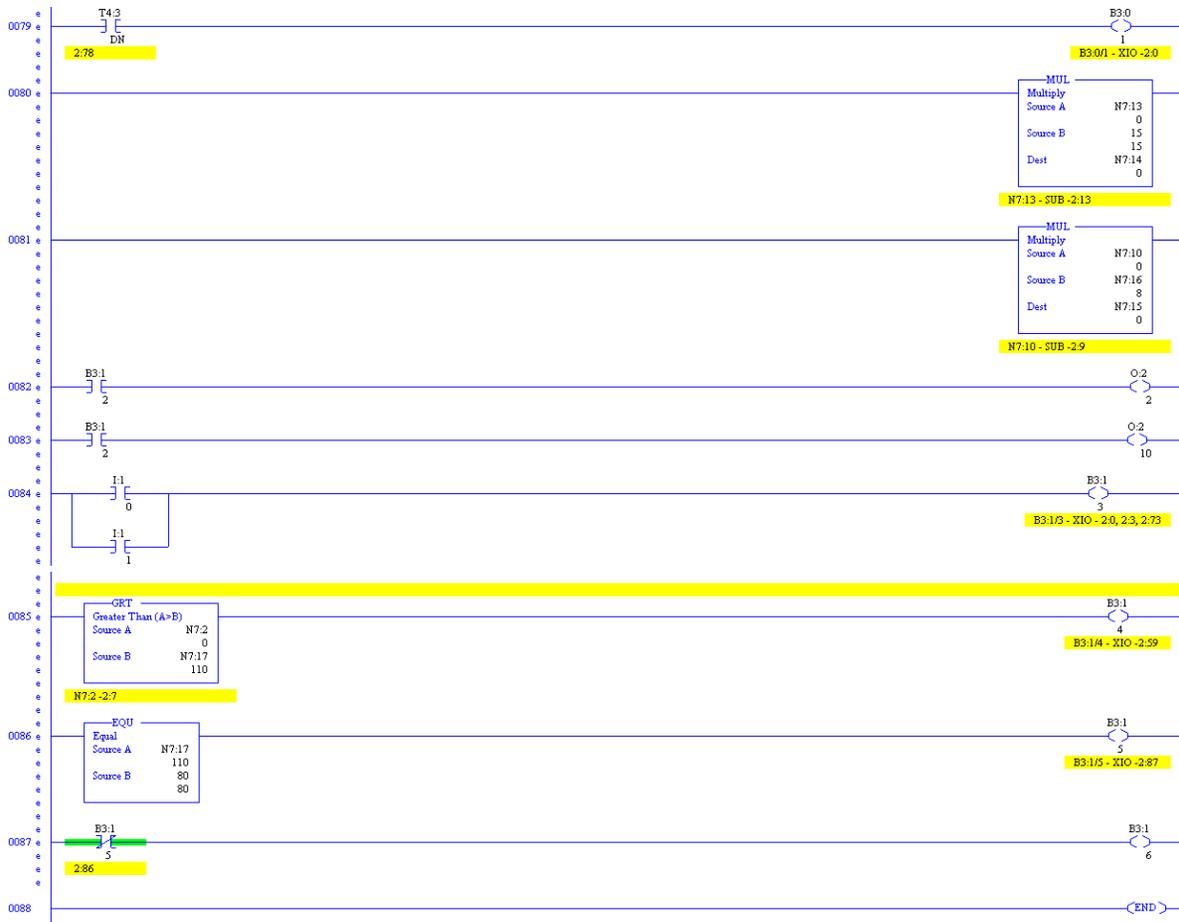


Figura N°65 “Programación Ladder en PLC SLC500”

8.7 Programación de pantalla HMI a través del software “Crimson 2.0”

Crimson 2.0 es un software para computadoras, con una interfaz gráfica que permite el diseño y configuración de una comunicación interactiva entre el PLC y el usuario a través de una pantalla HMI, el cual proporciona el vínculo de información y control necesario para que se lleve a cabo las tareas programadas.

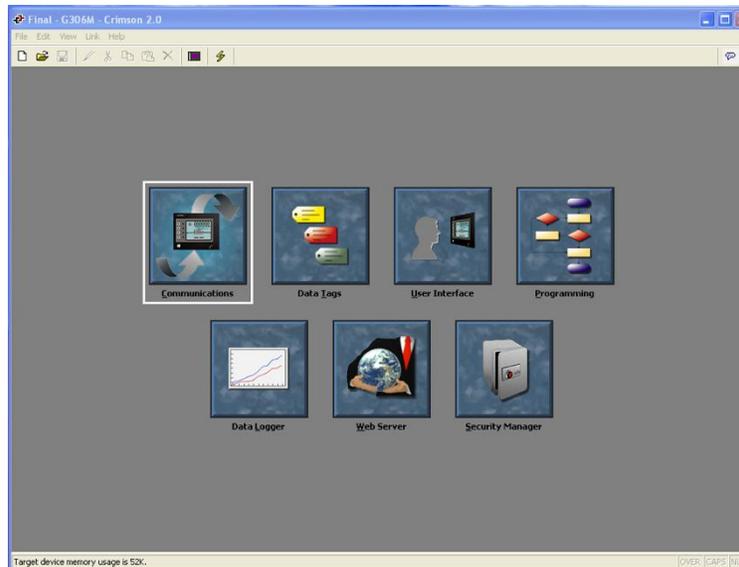


Figura N°66 “Programa Crimson 2.0”

Ingresado al programa Crimson 2.0 ilustrada en la figura N°66, se realiza la asignación de IP fija y a través de la interfaz de usuario se crearon las siguientes pantallas:

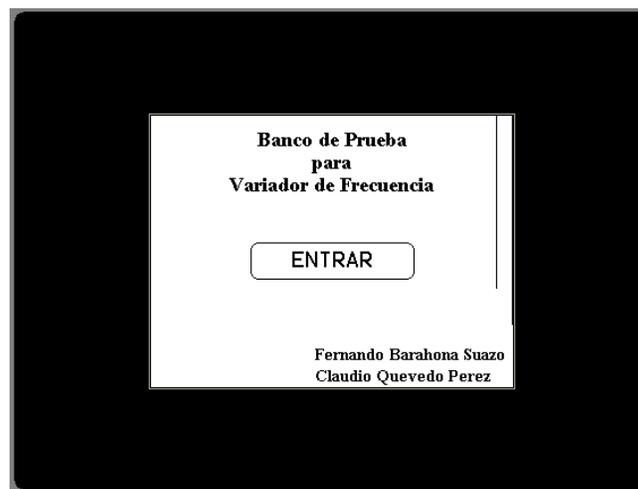


Figura N°67 “Pantalla inicio”

Una vez que se encuentra en la pantalla de la superior, se procede a hacer click en “ENTRAR” lo que se mostrará lo siguiente:

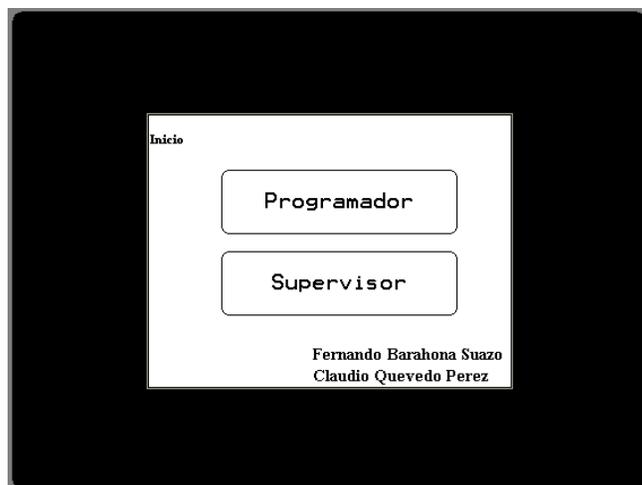


Figura N°68 “Pantalla de usuarios”

La figura superior nos presenta dos tipos de usuarios, programador y supervisor, con el propósito de limitar funciones para la operación del banco de prueba según el usuario.

Usuario Programador:

Al seleccionar el modo Programador se libera las restricciones de operación, solicitará USERNAME y PASSWORD, el cual debe ser ingresado. Este usuario debe ser autorizado y registrado previamente.



Figura N°69 “Pantalla usuario Programador aceptado”



Figura N°70 “Pantalla configuración de parámetros”

En la pantalla del usuario Programador, se visualiza la figura superior, en el que se deben ingresar los valores de:

- Potencia del variador a prueba
- Límite de par máximo que se requiera obtener
- Tiempo de prueba

Además se puede acceder al menú “Datos Motor”, el cual mostrará la información del motor conectado al variador de frecuencia a prueba, tal como lo ilustra la siguiente figura:

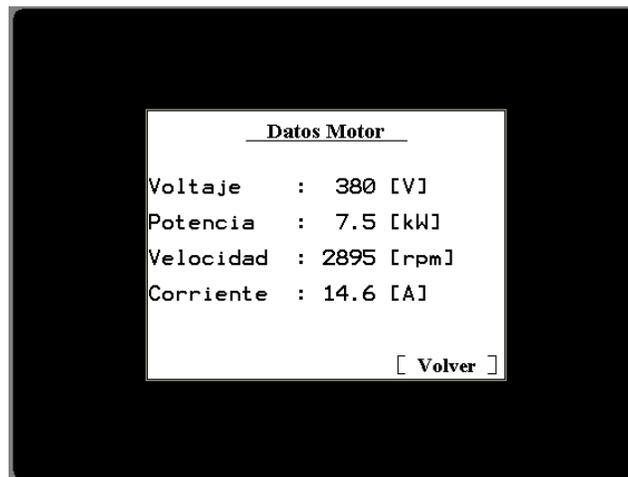


Figura N°71 “Pantalla datos motor”

Luego de recurrir a los datos del motor para registrarlos en los parámetros del variador de frecuencia a prueba, esta nos devuelve a la pantalla:

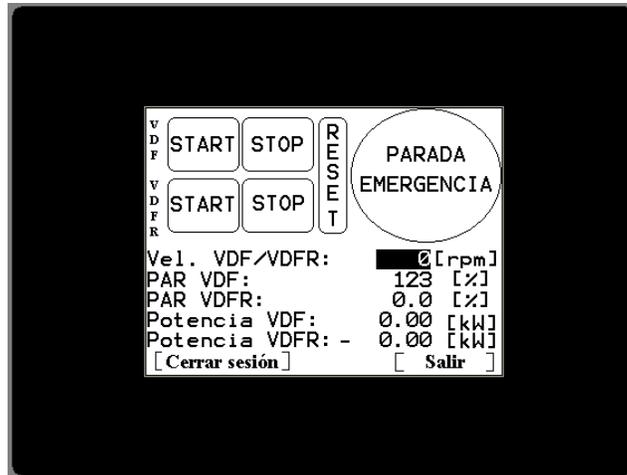


Figura N°72 “Pantalla operación usuario Programador”

En la figura superior se muestra la ventana de la pantalla por la cual se realiza la operación del banco de prueba, contiene los estados de partida y parada de los drive. Además se puede realizar la operación de RESET, el cual elimina cualquier falla en los variadores. Para cualquier evento no programado, se cuenta con el botón “PARADA EMERGENCIA”, quien desactiva ambos controladores. Esta pantalla entrega la información de velocidad, par y potencia, tanto del variador de frecuencia a prueba como del variador de frecuencia regenerativo.

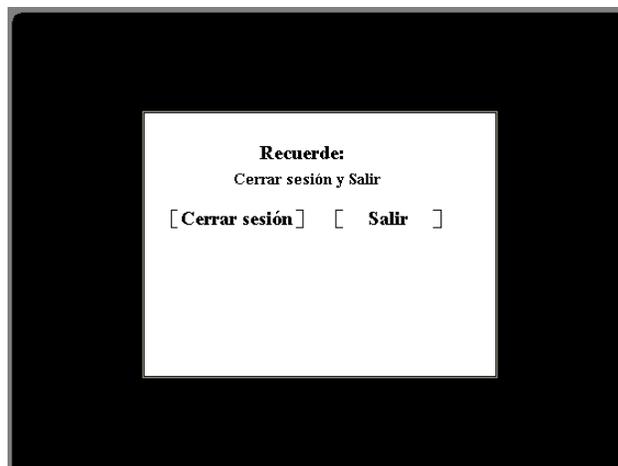


Figura N°73 “Pantalla para cerrar sesión”

Finalizando la operación se cierra la sesión del usuario y retornará a la pantalla inicio (figura N°67).

Usuario Supervisor:

El “usuario supervisor” es un operador registrado, quien puede realizar los procedimientos en el banco de prueba de modo automático, solo necesita registrar el “tiempo de prueba”, con el objetivo de evitar fallas.

Para el cambio de variador a prueba es necesario registrar el usuario en modo programador.

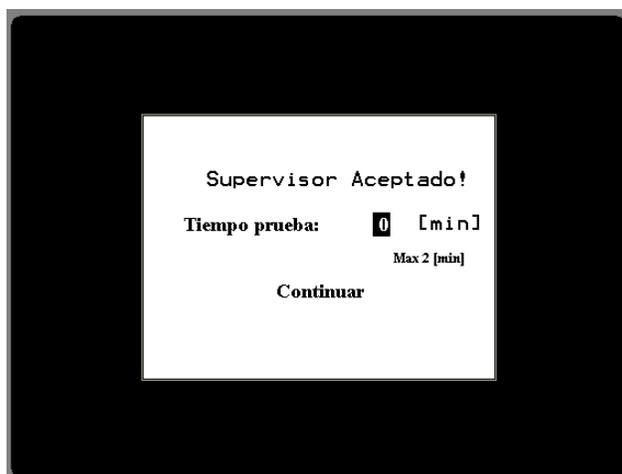


Figura N°74 “Pantalla Supervisor”

Una vez registrado el tiempo de prueba, permite operar el banco de prueba en modo automático. Esta pantalla de operación entrega la información de velocidad, par y potencia de ambos controladores. Finalizando la prueba se cierra la sesión del usuario y retornará a la pantalla inicio (figura N°67).



Figura N°75 “Pantalla operación usuario Supervisor”

8.8 Implementación del proyecto

Para finalizar con la implementación del proyecto, se realiza la conexión de los variadores de frecuencia a los respectivos motores y se alimenta a una fuente de energía trifásica de 380[V] en el laboratorio.

Se procede a conectar el PLC a través de sus módulos digitales (24Vcc) y E/S análogas con las respectivas tarjetas de control de los variadores de frecuencia, de ellas se obtienen y configuran todas las variables necesarias para controlar el banco de prueba.

La conexión para la comunicación entre el PLC y pantalla HMI se realiza a través del protocolo Ethernet/IP, para ello es necesario un router que interconecte y establezca una dirección IP fija entre los dispositivos.

La siguiente figura muestra una vista superior de los equipos y dispositivos implementados.

- (1) Variador de frecuencia regenerativo
- (2) Variador de frecuencia a prueba
- (3) PLC Allan Bradley SLC500
- (4) Pantalla HMI
- (5) Motores Acoplados
- (6) Router Ethernet/IP

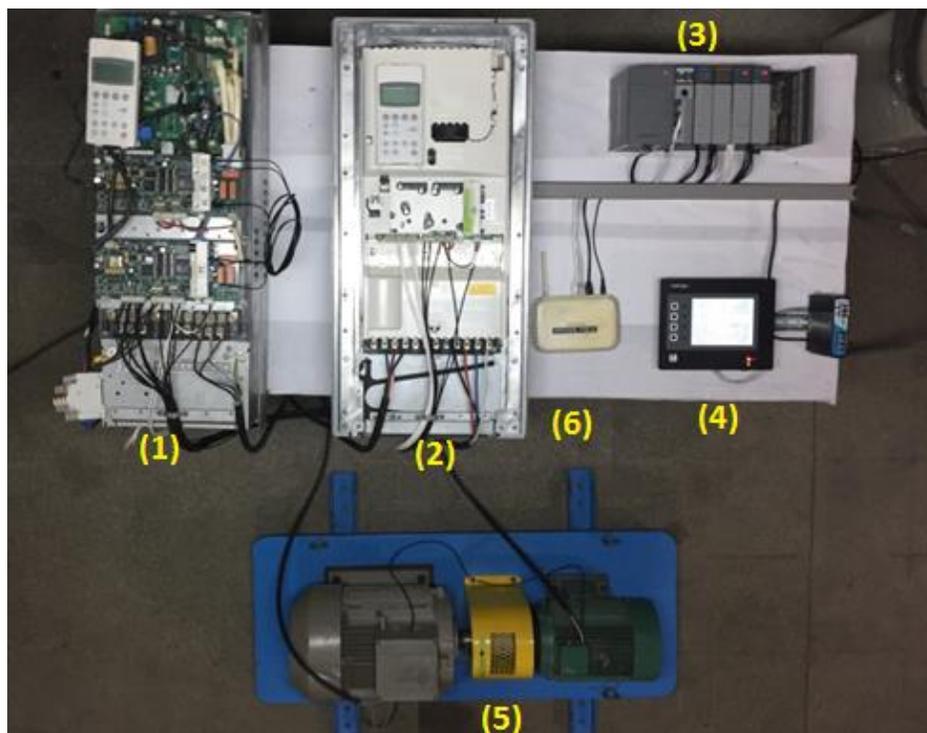


Figura N°76 “Vista superior del proyecto implementado”

9. Resultados

Tomando en cuenta todas las medidas de seguridad, se realiza la partida del banco de prueba. La velocidad nominal de operación se estableció en 1400[rpm], producto que al operar el VDF a prueba a la velocidad nominal del motor (2850 [rpm]), no era posible realizar la partida del variador regenerativo, ya que informaba de un exceso de velocidad y no era posible despreciar esa alerta.

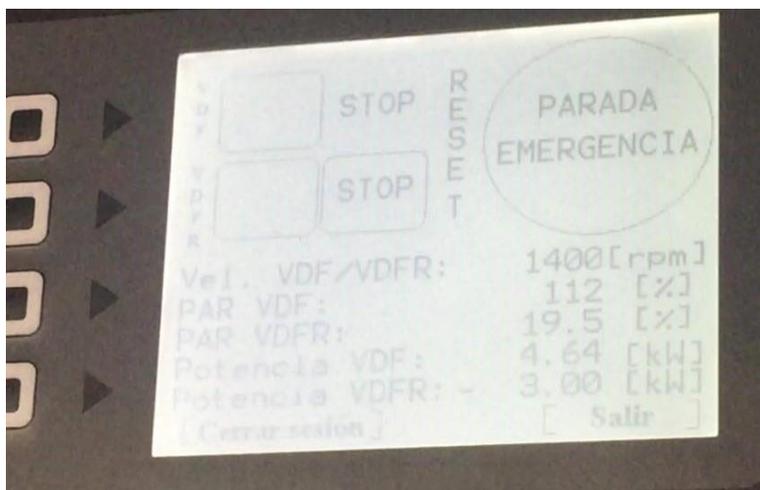


Figura N°77 “Proyecto implementado”

Durante la prueba, se alcanza un torque máximo del motor del VDF a prueba de 112% (establecido como límite), y una potencia real de consumo de 4,64[kW]. El motor del VDF regenerativo opera con un torque de 19,5% respecto a su capacidad máxima, con una potencia regenerada de 3[kW].



Figura N°78 “Proyecto implementado”

Para corroborar los datos entregados por pantalla HMI, se conecta al analizador de red Fluke-435II y se compara en tiempo real la potencia del VDF a prueba con el análisis del instrumento, obteniendo el siguiente margen de error:

$$e = \frac{|Valor\ HMI - Valor\ Analizador|}{Valor\ Analizador} * 100 = \frac{|2.16\ kW - 2.32kW|}{2.32\ kW} * 100$$

$$e = 6,8\ \%$$

Considerando una tolerancia del 10%, el banco de prueba entrega valores aceptables, por lo que los datos obtenidos por pantalla son confiables.

Se realiza una comparación de los datos obtenidos en la simulación, en la pantalla HMI y en el programa de los variadores de frecuencia en tiempo real, a máxima regeneración, arrojando los siguientes valores.

	Simulación	Real (HMI)	DriveWindow
Consumo Variador a prueba [kW]	7,5	4,64	7,5
Consumo Variador regenerativo [kW]	4	4,5	3
Regeneracion [kW]	-3,5	-3	-4,5
Consumo Total [kW]	8	6,14	6

Tabla N°12 “Comparación de potencias [kW]”

Según el análisis de los resultados en la implementación del banco de prueba, se ajustan los datos obtenidos en la simulación en modo escalar en referencia a los datos reales obtenidos, realizando los cálculos sobre la potencia regenerada del VDF regenerativo y la potencia consumida total del banco de prueba.

Aplicando este método, se realiza proyección con los datos obtenidos en función de las distintas capacidades de motores acoplados.

Si en el banco de prueba, el VDF a prueba conectado con un motor de 7.5 [kW], se frenó con un motor de 15[kW] el cual usamos como carga controlada, quien a la vez nos entregó una regeneración máxima de 32% (3[kW]), da como resultado una potencia total de:

Potencia que circula: 15 [kW]

Potencia total consumida: 16,5 [kW]

Potencia regenerada: 3 [kW]

Tomando en cuenta el consumo total del banco de prueba, la potencia consumida desde el suministro de red es 81,8%, respecto a lo que está circulando en el sistema, por lo que la potencia regenerada es de un **18,2%**

Al tener el banco de prueba un motor de 15[kW] y usando un freno de 15[kW], la potencia de regeneración es de 46,67% (7[kW]), da como resultado una potencia total de:

Potencia que circula: 30 [kW]

Potencia total consumida: 31 [kW]

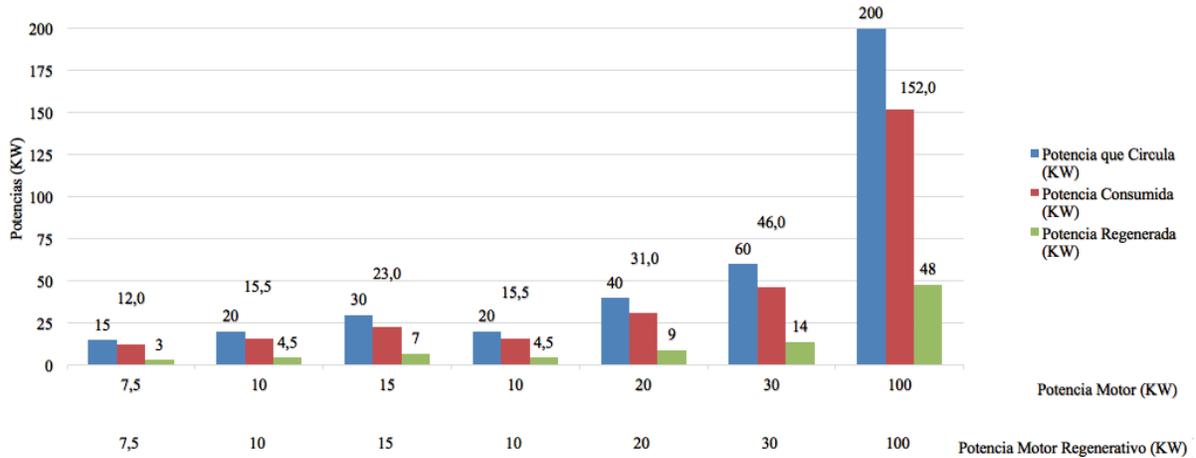
Potencia regenerada: 7 [kW]

Por lo tanto, la potencia consumida por el banco de prueba es de 77,4% y la potencia regenerada es de un **22,6%**

En resumen, teniendo en cuenta los datos, la proyección para distintas capacidades de potencia es:

Gráfico N°1

“Proyección de banco prueba en distintas potencias de motores”



Potencia Motor [kW]	Potencia Motor Regenerativo [kW]	Potencia que circula [kW]	Potencia Consumida VDF [kW]	Potencia Consumida VDFR [kW]	Potencia Regenerada [kW]	% Potencia Consumida Total [%]	Potencia Regenerada Total [%]
7,5	15	15	12,0	4,5	3	81,8	18,2
10	15	20	15,5	5,5	4,5	78,6	21,4
15	15	30	23,0	8	7	77,4	22,6
10	30	20	15,5	5,5	4,5	78,6	21,4
20	30	40	31,0	11	9	78,6	21,4
30	30	60	46,0	16	14	77,4	22,6
100	100	200	152,0	52	48	76,5	23,5

Tabla N°12 *“Proyección de banco prueba en distintas potencias en [kW] de motores”*

Finalmente, se genera una tabla con las distintas capacidades que puede tener el banco de prueba gracias a la simulación realizada en Matlab - Simulink.

El variador de frecuencia regenerativo puede regenerar hasta un 48%, estando sometido el banco de prueba a motores de la misma potencia, lo que provoca un 23,5% de ahorro en la potencia total consumida.

Se concluye que para lograr el objetivo de regenerar lo máximo posible en el VDF regenerativo), se debe implementar el proyecto con ambos motores del mismo frame.

10. Análisis económico

Se presenta un análisis que describe la inversión requerida para implementar el banco de prueba, considerando costos de equipos e ingeniería de proyecto.

Estimacion de Costos del Proyecto					APROBACION	
PROYECTO : Banco de Prueba VDF			N°PR:	FECHA:	01-abr-16	CLIENTE:
RESPONSABLE DEL PROYECTO:			Revisión:	PLAZO ENTREGA:		
TIPO DE ESTIMACION		NORMAL				
INGENIERO DE PROYECTO	JEFE DE TALLER	DIBUJANTE PROYECTISTA		TECNICO DE PROYECTO		GERENTE AREA
Fernando Barahona						
Claudio Quevedo						
MATERIALES Y EQUIPOS						
Item	Código Manager/PN	Descripción	Marca	Cant.	Costo Unit	Costo Total USD\$
1		Variador de frecuencia Regenerativo 55KW/690Vac	ABB	1	\$ 15.000	\$ 15.000
2		Motor Trifasico 15 kW/400Vac	ABB	1	\$ 1.800	\$ 1.800
3		Motor Trifasico 7.5 kW/400Vac	ABB	1	\$ 1.000	\$ 1.000
4		PLC AC600	ABB	1	\$ 3.600	\$ 3.600
5		Pantalla HMI CP430BP	ABB	1	\$ 2.200	\$ 2.200
6		Acople y Base de banco de prueba	NN	1	\$ 1.900	\$ 1.900
NETO USD						\$ 25.500
IVA USD						\$ 4.845
TOTAL USD						\$ 30.345
MARGEN MATERIALES						30%
TOTAL MATERIALES Y EQUIPOS CLP\$						\$ 28.892.342
MANO DE OBRA						
Item	Desarrollo del proyecto		Cant. Personas	Cant.H.H.	Valor H.H.	Costo Total CLP\$
1	Especialista					\$ -
2	Ingeniero de proyecto		2	600	\$ 10.424	\$ 12.508.800
3	Dibujante Projectista				\$ 5.965	\$ -
4	Técnico de proyecto				\$ 5.965	\$ -
5	Jefe de taller/Supervisor				\$ 4.853	\$ -
6	Maestro				\$ 4.200	\$ -
7	Ayudante				\$ 3.334	\$ -
TOTAL DESARROLLO						\$ 12.508.800
TOTAL MANO DE OBRA						\$ 12.508.800
PREVISION						\$ 942.400
MANO DE OBRA GENERAL PROYECTO						\$ 13.451.200
MARGEN						30%
TOTAL MANO DE OBRA						\$ 19.216.000
OTROS GASTOS						
Item	Descripción			Cant.	Costo Unit	Costo Total CLP\$
1	Gastos de viajes (Combustible, peajes,)			2	\$ 300.000	\$ 600.000
2	Colaciones					\$ -
3	Gastos de Arriendos (gruas, equipos, container,etc.)					\$ -
4	Gastos de Fletes y embalajes					\$ -
5	Gastos de estadia					\$ -
6	Gestion logistica y materiales					\$ -
TOTAL OTROS GASTOS						\$ 600.000
MARGEN						30%
TOTAL OTROS GASTOS						\$ 857.143
COSTOS DEL PROYECTO						\$ 14.051.200
TOTAL PROYECTO						\$ 48.965.484
MARGEN TOTAL DEL PROYECTO						71%
PRECIO VENTA FINAL						\$ 48.965.484

Figura N°79 “Análisis económico del proyecto”

11. Conclusión

Se cumplen los objetivos del proyecto, ya que el banco de prueba presenta una dinámica estable a través del control escalar.

Las mediciones de potencias eléctricas realizadas a través del analizador de red presentan resultados similares a las visualizadas por la pantalla HMI, durante las pruebas dinámicas en el banco de prueba.

La ventaja de utilizar un variador de frecuencia regenerativo es que produce una carga controlada para el motor vinculado al variador de frecuencia a prueba y regenera una parte de la potencia eléctrica consumida por el banco de prueba. Consecuentemente permite ampliar la capacidad de prueba del banco.

La simulación a través de Matlab-Simulink es una herramienta que ayuda a visualizar el funcionamiento interno de los equipos, y también es posible proyectar la estabilidad de un banco de prueba para mayores capacidades.

La modelación completa se realizó mediante el control escalar, aunque el variador regenerativo nos da la posibilidad de trabajar en control Escalar y DTC (Control directo de torque).

Si bien la regeneración a través del control DTC es más eficiente, resultó ser muy compleja la simulación, producto que es muy difícil generar estabilidad en el sistema. Se llegó a la conclusión que la librería de Simulink no está preparada para interpretar esta aplicación con motores acoplados.

12. Bibliografía

- [1] Roldán Viloria, José, “*Motores eléctricos variación velocidad*, Madrid: Thomson Paraninfo 228 pág.
- [2] ABB, *Frenado dinámico, guía técnica N°8*, 32 pág.
- [3] Muhammad H. Rashid: ‘*Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*’, (Pearson Education, 2004, 3rd edn.), pp 273.
- [4] Jesús Fraile Mora: ‘*Máquinas Eléctricas*’, (Mc Graw Hill, 2008, 6th edn.), pp. 590
- [5] Curso E33A, *Variadores de frecuencia. Motores asincrónicos trifásicos*, 2010.
- [6] Manual Hardware ACS800-1, rev c, Engrand, 2013
- [7] Flores C, Gustavo Andrés. Tesis (Ingeniero electrónico) “*Modelación y Simulación del control vectorial por campo orientado del motor de inducción basado en el método indirecto*”. Pamplona, Colombia. Universidad de la pamplona, Dpto. Ingeniería electrónica, 2006
- [8] Quiroga, A. J. (1995). “*Control de motores de inducción*” Parte 1, volumen 3 of Ingeniería Electrónica. Asociación Argentina de Control Automático.
- [9] Piñero Rueda, José Manuel. “*Control de un motor de inducción usando un variador de frecuencia*”. Tesis (Ingeniería de las tecnologías de telecomunicaciones), Sevilla, España. Universidad de Sevilla, Depto. De Ingeniería sistemas y automática. 2015
- [10] Revista Controlador Lógico programable (PLC), Buenos Aires, Argentina.
- [11] Revista manual ACS800-11 ABB, Europa.2013
- [12] Rohten C, Jaime. Control de movimiento. [Diapositivas] UBB Chile. .texto en español.2015.
- [13] Libro de guías técnicas de accionamientos de CA DTC, VSD. ABB S.A
- [14] Manual Software Crimson 2.0, Modular Controller, Red Lion, pp. 442. 2006