

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA**

(Creada por Ley N° 25265)



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA - SISTEMAS  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE ELECTRÓNICA**

## **TESIS**

**SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE  
EN MOTOR AC DE WINCHE EN LA COMPAÑÍA  
MINERA CASAPALCA S.A. - HUAROCHIRÍ - LIMA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:  
CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADA POR EL BACHILLER:  
CRISTHIAM JOSÉ GONZALO ORÉ**

**HUANCAMELICA - 2015**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA**  
(Creada por Ley N° 25265)  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA - SISTEMAS**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS**

En el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Electrónica – Sistemas, a los 27 días del mes de ABRIL del año 2015, a horas 12:00 se reunieron el Jurado Calificador, conformado de la siguiente manera:

Presidente: ING. CARLOS ABEL GALVAN TALDONADO  
 Secretario: ING. JAVIER ALFREDO HERRERA MORALES  
 Vocal: ING. EUEIRTH MANUEL BARROS LAPA

Designados con Resolución N° 084-2015-FIES-UNH del proyecto de investigación (Tesis), Titulado: SISTEMA ELECTRONICO COMPENSADOR DE TORQUE EN ROTOR AC DE WINCHE EN LA COMPAÑIA MINERA CASAPALCA S.A. HUAROCHIRI - LITA

Cuyos autores son los graduado(s):

BACHILLER(S): CRISTHIAN JOSÉ GONZALO ORÉ

A fin de proceder con la evaluación y calificación de la sustentación del proyecto de investigación, antes citado.

Finalizado la evaluación, se invito al público presente y a los sustentantes a abandonar el recinto; y, luego de una amplia deliberación por parte del jurado, se llegó al siguiente el resultado:

APROBADO  POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO

En conformidad a lo actuado firmamos al pre.

Presidente

Secretario

Vocal

**ASESOR:**

**Mg. Hipólito Carbajal Morán**



2.2.2.3.	Arranque con reducción de tensión.....	25
2.2.2.4.	Los arrancadores de resistencia primaria.....	27
2.2.2.5.	Arrancadores suaves .....	28
2.2.3.	Variadores de velocidad .....	29
2.2.3.1.	Regulador de tensión para el arranque de motores asíncronos.....	30
2.2.3.2.	Convertidor de Frecuencia para motor asincrono ACS800.....	30
2.2.4.	Winche de izaje .....	33
2.2.5.	Sistema de compensación de torque de motores AC. ....	36
2.2.5.1.	Convertidor de frecuencia ACS-800 marca ABB.....	36
2.2.5.2.	Corriente de magnetización.....	40
2.2.5.3.	Magnetización de motor AC.....	43
2.2.5.4.	Duración de compensación de torque .....	45
2.2.5.5.	PLC ControlLogix.....	47
2.2.5.6.	Tarjeta RETA-01: Interface Variador-PLC .....	49
2.3.	HIPÓTESIS .....	51
2.3.1.	Hipótesis general.....	51
2.3.2.	Hipótesis específica .....	51
2.4.	VARIABLES DE ESTUDIO .....	51
2.4.1.	Variables independientes .....	51
2.4.2.	Variable dependiente .....	51
CAPÍTULO III .....		53
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		53
3.1.	ÁMBITO DE ESTUDIO .....	53
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	53
3.3.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	53
3.4.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN .....	54
3.5.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	54
3.6.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO .....	55
3.6.1.	Población .....	55
3.6.2.	Muestra.....	55
3.6.3.	Muestreo.....	57
3.7.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	57
3.8.	PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	57

3.9. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS ..... 58

CAPÍTULO IV ..... 59

RESULTADOS ..... 59

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS ..... 59

    4.1.1. Sistema de control para compensación de torque en motor AC  
            controlado por PLC ControlLogix ..... 59

        4.1.1.1. Motor ABB de 1050 Kw ..... 63

        4.1.1.2. Programación en el variador de velocidad ACS-800 ..... 64

        4.1.1.3. Control del drive vía Ethernet. .... 66

        4.1.1.4. Programación de subrutinas para control de drives y tiempo  
                de magnetización en el motor..... 75

        4.1.1.5. Monitoreo del proceso de izaje en RSLogix5000 y Drive  
                Windows..... 85

    4.1.2. Toma de datos ..... 87

    4.1.3. Tratamiento estadístico de las muestras tomadas..... 88

4.2. DISCUSIÓN ..... 101

CONCLUSIONES ..... 106

RECOMENDACIONES ..... 107

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 108

ARTÍCULO CIENTÍFICO ..... 109

ANEXOS ..... 116

A. INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE ..... 117

B. DIAGRAMA LADDER DEL SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE  
TORQUE ..... 118

C. DATOS TOMADOS DEL 17 AL 26 DE MAYO DEL 2014..... 151

D. MONITOREO DE PROCESO DE IZAJE DE MINERAL CON SISTEMA  
ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE..... 173

E. GLOSARIO DE TÉRMINOS..... 175

F. DISTRIBUCIÓN Z ESTADÍSTICO ..... 177

G. DATOS TÉCNICOS ..... 178

H. FOTOGRAFÍAS ..... 180

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla N° 1.1. Producción Minera por Principales Productos en Perú .....	1
Tabla N° 2.1. Características de un arranque con autotransformador .....	24
Tabla N° 2.2. Registro principal de control del drive: MAIN CONTROL WORD .....	32
Tabla N° 2.3. Registro principal de estado del drive: MAIN STTUS WORD .....	33
Tabla N° 2.4. Características de Winche de Izaje instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A.....	34
Tabla N° 2.5. Operacionalización de variables .....	52
Tabla N° 3.1. Valores que toma Z y E.....	57
Tabla N° 4.1. Ciclo de trabajo de los motores AC .....	64
Tabla N° 4.2. Datos de placa del motor y datos de partida a ingresar en el drive en el grupo 99.....	65
Tabla N° 4.3. Denominación de cada drive .....	66
Tabla N° 4.4.. Selección de IP con DS1 de la tarjeta RETA-01.....	68
Tabla N° 4.5. Las IP de los variadores de velocidad son:.....	69
Tabla N° 4.6. Parámetros del grupo 51 del drive. ....	70
Tabla N° 4.7. Instancia 121 del módulo RETA-01: Entrega señales al drive.....	73
Tabla N° 4.8. Instancia 171 del módulo RETA-01: Entrega señales al PLC.....	74
Tabla N° 4.9. Muestras tomadas con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensacion de torque en el motor AC. ....	90
Tabla N° 4.10. Muestras tomadas con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensacion de torque en el motor AC. ....	93
Tabla N° 4.11. Formato de adquisición de muestras en Excel .....	97
Tabla N° 4.12. Arrastres de skips con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensación de torque.....	100
Tabla N° 4.13. Torque (Nm) de arranque sin el sistema de compensación de torque en motor AC. ....	102
Tabla N° 4.14. Tabla de niveles de confianza para $\alpha$ .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura N° 1.1. Vista frontal y lateral del skip o contenedor .....	2
Figura N° 1.2. Compartimientos del Pique: el compartimiento 1 y 2 para.....	3
Figura N° 1.3. Extracción de mineral por medio de winche de izaje. ....	3
Figura N° 1.4. Motores DC Shunt que serán reemplazados por motores AC.....	4
Figura N° 1.5. Esquema del winche de izaje de la CMCSA.....	5
Figura N° 2.1. Estructura de un motor eléctrico .....	13
Figura N° 2.2. Estructura de un motor de rotor bobinado .....	16
Figura N° 2.3. Rotor tipo jaula de ardilla. ....	17
Figura N° 2.4. Comportamiento del conjugado o par motor.....	17
Figura N° 2.5. Comportamiento de la corriente pico de un motor AC. ....	18
Figura N° 2.6. Motor ABB de 1050 Kw .....	21
Figura N° 2.7. Sentido de la ventilación forzada en el motor.....	21
Figura N° 2.8. Esquema eléctrico del arranque estrella-triángulo. ....	23
Figura N° 2.9. Esquema de conexión de un arranque con auto-transformador.....	25
Figura N° 2.10. Curvas de par y corriente en un motor AC.....	26
Figura N° 2.11. Esquema eléctrico de un arranque por resistencias.....	28
Figura N° 2.12. Esquema eléctrico de un arrancador suave.....	29
Figura N° 2.13. Arrancador para motor asíncrono y forma de onda de la corriente de alimentación.....	30
Figura N° 2.14. Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.....	30
Figura N° 2.15. Etapas del convertidor de frecuencia .....	36
Figura N° 2.16. Convertidor de frecuencia ACS800-17 (55 a 2500 Kw) .....	39
Figura N° 2.17. Diagrama de bloques del control del drives ACS-800 sobre un motor AC.....	39
Figura N° 2.18. Similitud de Magnitud magnética y eléctrica.....	41
Figura N° 2.19. Momento magnético de un átomo .....	42
Figura N° 2.20. Diagrama de funcionamiento para la magnetización de un motor AC .....	43
Figura N° 2.21. Par de un motor de arranque.....	44

Figura N° 2.22. Diagrama de activación del motor por medio del convertidor ACS800 .....	45
Figura N° 2.23. Comportamiento de corriente de magnetización en el tiempo.....	47
Figura N° 2.24. PLC ControlLogix .....	49
Figura N° 2.25. Familia de redes del protocolo CIP .....	50
Figura N° 2.26. Tarjeta RETA-01: interface para Variador- PLC .....	50
Figura N° 3.1. Diagrama en bloques del diseño de investigación que permitirá demostrar la compensación de torque a través de la rampa de velocidad.....	54
Figura N° 4.4. Panel de control del convertidor de frecuencia.....	64
Figura N° 4.5. Datos ingresados al drive mediante el programa DriveWindow .....	65
Figura N° 4.6. Formas de control del convertidor de velocidad .....	67
Figura N° 4.7. Configuración de IP en el dip switch de la tarjeta RETA-01 para identificación de drive.....	68
Figura N° 4.8. El grupo 51 identifica al drive, los parámetros 51.04 - 51.07 identifica la dirección IP del drive. ....	68
Figura N° 4.9. Grupo de parámetros 98 para activar la identificación del módulo RETA-01 .....	69
Figura N° 4.10. Configuración del módulo de variador maestro.....	70
Figura N° 4.11. Drive conectado identificando las señales de control a través del módulo RETA-01.....	71
Figura N° 4.12. El sentido de giro del motor se dará de acuerdo a la activación de los switchs DI1F y DI2R. ....	71
Figura N° 4.13. Diagrama de flujo de control del Joystick hacia los motores. ....	72
Figura N° 4.14. Diagrama de funcionamiento del parámetro 10.03.....	74
Figura N° 4.15. Selección de referencia del joystick en el drive .....	75
Figura N° 4.16. Parámetro 13.08 escala de control de torque en DriveWindow.....	77
Figura N° 4.17. Secuencia de funcionamiento del drive en magnetización por CC.....	78
Figura N° 4.18. Relación de transmisión de fuerzas .....	80
Figura N° 4.19. Módulos instalados en el chasis del ControlLogix identificados con el programa RSLogix5000. ....	83

Figura N° 4.20 Net creada en la rutina brake_control para el tiempo de magnetización.....	84
Figura N° 4.21. Monitoreo del comportamiento de los motores AC en el proceso de izaje de mineral. ....	86
Figura N° 4.22. Monitoreo del comportamiento del motor esclavo. ....	87
Figura N° 4.23. Conexión entre PC y drive usando la interface USB-Fibra óptica. ....	88
Figura N° 4.24. Representación gráfica de los datos muestreados de corriente pico del sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque. ....	92
Figura N° 4.25. Representación gráfica de los datos muestreados de torque (Nm) en el sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque. ....	95
Figura N° 4.26. Representación gráfica de los datos muestreados de torque (%) del sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque. ....	96
Figura N° 4.27. Representación gráfica de la temperatura del bobinado del motor AC al momento de producirse las corrientes pico. ....	99
Figura N° 4.28. Representación gráfica de arrates de skips en el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y en el sistema sin compensación de torque.....	100

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación se diseña e implementa un sistema electrónico compensador de torque de motores AC para evitar que el skip choque con la polea de izaje (arrastre de skip), los dos motores tienen características idénticas y son controlados por variadores de velocidad o drives ACS-800, las muestras de estudios fueron tomadas en la Compañía Minera Casapalca S.A. El sistema se basa en el control de drives desde un Controlador Lógico Programable (PLC) ControlLogix, el programa de aplicación recibe una señal de referencia proveniente de un joystick (entre 0 y 10 voltios) y envía la señal procesada entre 0 y 20 mA hacia los drives a través del módulo RETA-01 para que el motor AC tenga el torque suficiente al momento de arranque y logre izar una carga de 9.5 ton que se encuentra a 500 m de profundidad. Para la evaluación este sistema se tomaron 384 muestras antes y después de su implementación durante 08 días desde el 17/05/14 al 20/05/14 y del 21/05/14 al 25/05/14, a partir de la 8:00 am hasta las 5:00 pm. La toma de muestras se realiza a través del programa DriveWindows que se encarga de monitorear los parámetros de señales de entrada y salida en el variador. Los datos adquiridos se almacenan en una hoja de cálculo Excel. Al hacer el tratamiento estadístico de los datos se llega a la conclusión que teniendo una corriente de magnetización de 2000 amperios que se producen en 800 milisegundos se genera el torque eléctrico necesario para elevar la carga evitando los arrastres de skips al 100%.

## INTRODUCCIÓN

La Compañía Minera Casapalca S.A. tiene un winche de izaje que traslada mineral desde 500 m de profundidad. El winche de izaje tiene dos motores AC que se encargan de mover la posición de dos skips en la estructura del Pique. Los motores AC son comandados por drives o variadores de velocidad, teniendo como principal problema el arrastre de los skips al momento de arrancar los motores ya que también en este instante se liberan los frenos y los skips quedan suspendidos mientras que el motor aún no ha desarrollado el torque eléctrico necesario para mantener o elevar el peso de la carga. Para solucionar este problema se planteó diseñar e implementar un sistema electrónico compensador de torque en motor AC. Se planteó como hipótesis: que la implementación de un sistema electrónico compensador de torque evitaría el arrastre de los skips al momento de arrancar los motores, para que se tenga una salida correcta de izaje de mineral. Con la implementación del sistema electrónico se llegó a probar el cumplimiento de las hipótesis a partir de muestras generadas en forma aleatoria en base a datos reales.

El informe del trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera:

Capítulo I; en este capítulo se plantea el problema, así como la formulación y los objetivos.

Capítulo II; contiene el marco teórico incluyendo los antecedentes y las bases teóricas que son el soporte para el desarrollo del trabajo de Tesis. También contiene la hipótesis y las variables de estudio.

Capítulo III; contiene la metodología de la investigación, la población, muestra y muestreo, así como las técnicas e instrumentos empleados y los procedimientos de toma de datos como la técnica de análisis de datos.

Capítulo IV; contiene la presentación de resultados y la discusión de los mismos.

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La minería es uno de los sectores más importantes de la economía peruana y representa normalmente más del 50% de las exportaciones peruanas con cifras alrededor de los 4 mil millones de dólares al año según el Ministerio de Economía y Finanzas. Por su propia naturaleza la gran minería constituye un sector que genera grandes movimientos de capital más no de mano de obra, así el año 2009 aportó el 4.7% del PBI, sin embargo ocupó sólo al 0.7% de la PEA. La minería se ha vuelto tan importante que desde el año 1993, el Perú ha duplicado su producción de minerales. Los principales minerales que exporta nuestro país son: cobre, oro, hierro, plata, zinc y plomo entre otros. Actualmente todos ellos son fuertemente demandados como insumos para procesos industriales de alto nivel tecnológico.

Tabla N° 1.1. Producción Minera en el Perú

METALES / METALS	Unidad / Unit	SETIEMBRE / SEPTEMBER			ENERO - SETIEMBRE / JANUARY - SEPTEMBER		
		2011	2010	Var % 2010/2009	2011	2010	Var % 2010/2009
COBRE	(TMF)	98.188	103.726	5,64%	916.059	898.802	-1,88%
ORO	(Oz)	462.141	484.461	4,83%	4.380.667	4.339.967	-0,93%
ZINC	(TMF)	120.294	94.040	-21,83%	1.127.068	952.583	-15,48%
PLATA	(Oz.)	10.231.980	9.941.185	-2,84%	96.484.556	88.852.805	-7,91%
PLOMO	(TMF)	21.172	20.570	-2,84%	202.736	169.786	-16,25%
HIERRO	(TLF)	699.720	491.580	-29,75%	4.534.366	5.266.475	16,15%
ESTAÑO	(TMF)	2.335	2.707	15,94%	26.568	21.672	-18,43%
MOLIBDENO	(TMF)	1.158	2.167	87,14%	11.704	13.644	16,58%
TUNGSTENO	(TMF)	54	46	-14,28%	553	431	-22,08%

Fuente: Ministerio de Energía y Minas – Dirección General de Minería

Compañía Minera Casapalca S.A. (CMCSA) está dedicada a la minería subterránea teniendo como principales minerales extraídos al Cu, Pb, Ag y Zn, en

un promedio de 250 toneladas diarias a través del sistema de winche de izaje el cual traslada hasta 9,7 toneladas de mineral por viaje en 2 skips o contenedores de 4,7 toneladas de peso bruto. Ambos skips operan por contrapeso a través del Pique.

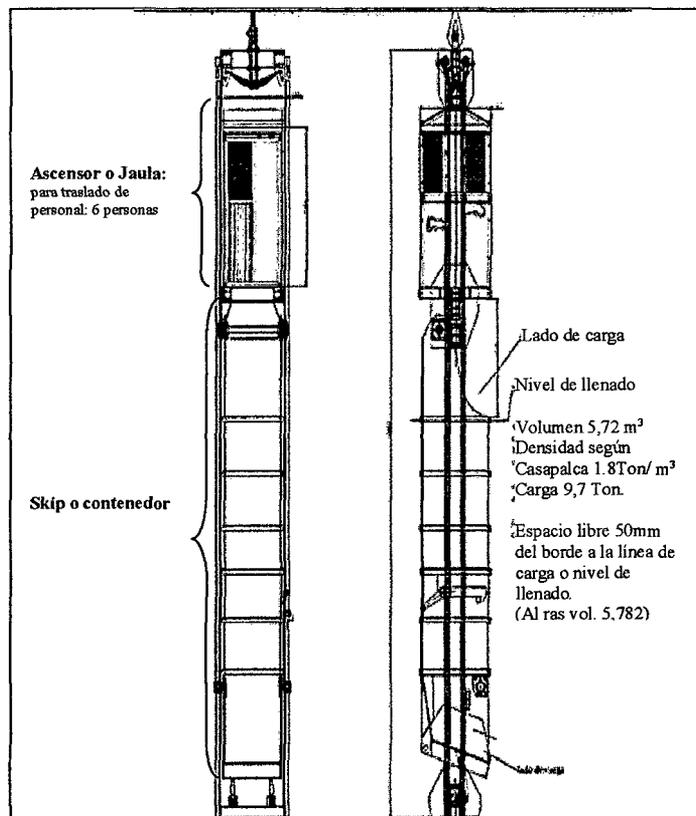


Figura N° 1.1. Vista frontal y lateral del skip o contenedor

El Pique es una estructura vertical de madera o castillo anclada dentro de la tierra con una profundidad creciente, actualmente se encuentra a más de 500 metros, cuenta con 3 compartimientos a lo ancho de su estructura de las cuales 2 compartimientos son para los skips y el tercer compartimiento llamado también camino sirve para el desplazamiento del personal a través de escaleras. Los skips trasladan mineral desde el nivel 10 o zona de carguío (500 metros de profundidad desde el nivel del piso) hasta el nivel 0 ó zona de volteo (16 metros de altura desde el nivel del piso).



Figura N° 1.2. Compartimientos del Pique: el compartimiento 1 y 2 para skips y el tercero para el camino (personal de trabajo).

El tiempo de recorrido de ida y vuelta de cada skip es de aproximadamente 5 minutos con 8 segundos, incluyendo 20 segundos de carga de mineral aproximadamente. Para el movimiento vertical de los contenedores se cuenta con un sistema de izaje de winche que constaba de 02 motores de Corriente Continua de 700 HP / 660 VAC, también cuenta con sistema de seguridad como limitadores de recorrido, sistema de freno neumático, tambores de 96" de diámetro, frenos de bandas neumáticos, cables de acero de 1 ½", 2 skips, sistema de control.

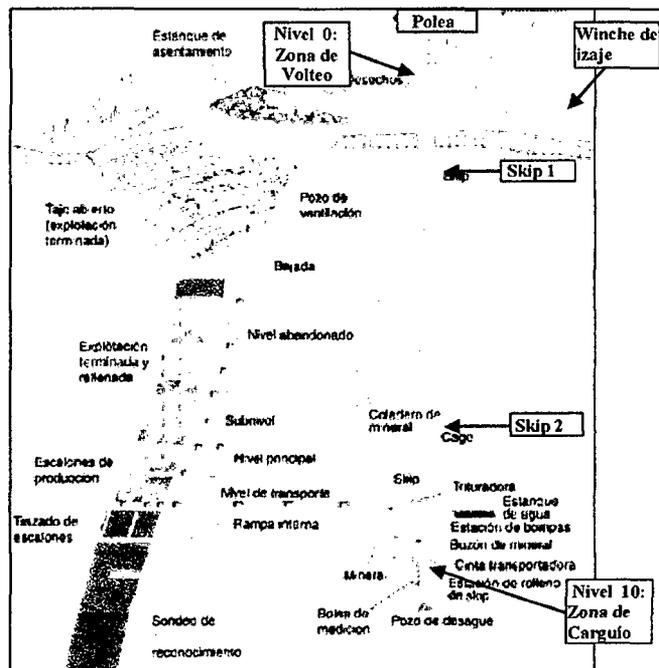


Figura N° 1.3. Extracción de mineral por medio de winche de izaje.

Debido al aumento de profundización en el pique se ha reponenciado el sistema de winche cambiando los motores de corriente continua (DC) de 440VDC – 900Kw por motores de corriente alterna (AC) cuyas características principales son: 1050 Kw de potencia, 690 VAC de alimentación, 850 rpm. El cambio de ambos motores AC hace necesario el cambio de variadores de velocidad DC por variadores de velocidad AC.



Figura N° 1.4. Motores DC Shunt que serán reemplazados por motores AC.

Como ya se explicó los skips trabajan por contrapeso. Al realizar estos cambios en el sistema de izaje se tiene como problema principal compensar el torque del motor para mantener el punto estacionario en las tamboras del winche durante el momento de arranque cuando se liberan los frenos neumáticos de las tamboras, debido a que el torque mecánico que tiene el peso del skip ubicado en nivel de carguío es mayor al torque eléctrico que genera el motor AC, corriendo el riesgo de que el skip ubicado en la zona de volteo sea arrastrado y se estrelle con la polea.

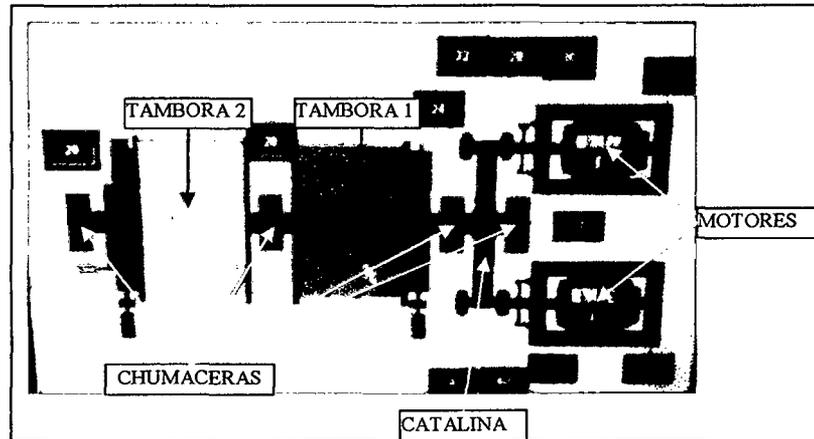


Figura N° 1.5. Esquema del winche de izaje de la CMCSA

En la presente tesis se desarrolla los estudios correspondientes para que mediante un sistema electrónico basado en el controlador lógico programable (PLC) ControlLogix se logre compensar el torque eléctrico del motor AC del winche con el torque mecánico del peso del skip para mantener el punto estacionario eléctrico-mecánico en el momento de arranque, al liberar los frenos neumáticos.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.2.1. Problema general

- ¿Cómo compensar el torque en el motor AC de winche durante el arranque para evitar que el skip en zona volteo sea arrastrado hasta chocar con la polea de izaje?

### 1.2.2. Problemas específicos

- ¿Con qué intensidad de corriente de magnetización podemos compensar el torque del motor AC en el momento de arranque?
- ¿Cómo controlar el tiempo de magnetización en el motor AC para mantener la suficiente compensación de torque antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche?

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo general

- Compensar el torque de motor AC de winche durante el arranque para evitar el choque del skip con la polea de izaje.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la intensidad de corriente de magnetización adecuada para compensar el torque en el motor AC al momento de arranque.
- Controlar el tiempo de magnetización en el motor AC con el diseño e implementación de una subrutina en el programa ladder del PLC ControlLogix para mantener la compensación de torque necesaria antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

### 1.4. JUSTIFICACIÓN

#### 1.4.1. Justificación económica

La implementación de este evento magnético en el motor AC hace que se prevengan accidentes en los skips o contenedores (choque de skips con la polea ubicada más arriba de la zona de volteo) que pueden ser perjudiciales de manera económica, en el caso más extremo hasta de reemplazar un contenedor completo evaluado en S/. 250,000.00 Nuevos Soles, sin contar el tiempo de recuperación del skip estrellado que puede durar hasta 3 días en 3 guardias.

#### 1.4.2. Justificación tecnológica

La automatización del sistema de izaje de winche se llevará a cabo con el uso de equipos compuestos por semiconductores. Empezando por la parte de control tenemos al PLC ControlLogix el cual se encargará de controlar todo el proceso. De la misma manera contamos con el Convertidor de frecuencia o variador de velocidad AC cuya programación, control y monitoreo se realiza en tiempo real, este variador de frecuencia está compuesto de módulos IGBTs con los que

se regula la tensión y frecuencia de salida al motor controlando de esta manera sus rpm. Con respecto a la parte de potencia para el control de motores también se tiene la participación de semiconductores tanto en la parte de inversión como rectificación de la corriente para lograr entregar energía de manera óptima al motor AC. También se cuenta con la computadora que se encarga de programar el PLC y de monitorear el comportamiento del proceso, de los variadores de velocidad y como ayuda para identificar posibles razones que generen algún accidente. En resumen, el apoyo de la tecnología electrónica hace que se mantenga un mejor rendimiento durante este proceso.

**1.4.3. Justificación ecológica**

El desarrollo de esta investigación y su implementación propician el ahorro de energía eléctrica al controlar los picos de corriente en el momento de arranque y la entrega de energía eléctrica al motor de acuerdo al torque solicitado para transportar la carga de un nivel a otro. Además cabe resaltar una cualidad de los drives usados como es la de ser variadores regenerativos que propician el ahorro de energía al devolver la corriente no utilizada a la red de consumo.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

A continuación se presenta estudios e investigaciones que sirven como antecedente para el desarrollo de la investigación:

**Gerardo Vicente Guerrero Ramírez. Diseño de un Controlador no lineal basado en Pasividad de un motor síncrono. Cuernavaca-Morelos-México, 2004.**

Este trabajo trata sobre el diseño de controladores no lineales basado en pasividad del motor síncrono de imanes permanentes y con devanado de campo. El objetivo del control es lograr el seguimiento de la trayectoria (posición y velocidad) de referencia de una carga mecánica dada (brazo rígido de un grado de libertad). Aunque en la literatura técnica existe información acerca del análisis del motor síncrono, no es fácil encontrar un tratamiento completo que incluya modelado, operación y diseño de controladores. Por otro lado, los trabajos que abordan el diseño de controladores usualmente tratan sólo el motor síncrono de imanes permanentes. En este trabajo se contemplan el análisis de la operación y el control del motor síncrono tanto de imanes permanentes como con devanado de campo. El modelado se obtiene usando la formulación basada en funciones de energía (metodología Euler – Lagrange) ya que es la más adecuada para el diseño de controladores basados en pasividad, el cual presenta ventajas respecto a otras técnicas de control (escalar y vectorial). Finalmente se hace un análisis comparativo del desempeño de los controladores basados en pasividad con respecto de controladores basados en campo orientado (comúnmente usados en la industria) y se observa que es mejor el desempeño de los controladores basados en pasividad.

**Cristian Hernán de Angelo. Control para Máquinas de CA de imanes permanentes con FEM arbitraria, sin sensores mecánicos. La Plata – Uruguay, 2004.**

En este trabajo de tesis se proponen nuevas soluciones a dos problemáticas de control de máquinas de corriente alterna con imanes permanentes: la minimización del ripple de par y la eliminación de sensores mecánicos de posición y/o velocidad. Para minimizar el ripple de par, producido por formas de ondas de fem inducida no sinusoidales ni trapezoidales, se propone una nueva técnica para realizar la regulación de las corrientes de la máquina, basado en las ideas de control vectorial, lo que permite realizar el control de corriente en variables continuas del mismo modo que para máquinas sinusoidales. Con el fin de eliminar los sensores de posición y/o velocidad en el control de máquinas con forma de onda de fem arbitraria, se proponen dos nuevas estrategias, basadas en observadores de estado, que permiten estimar la fem inducida de la máquina, y a partir de ella obtener la velocidad y/o la posición del rotor. Una de las propuestas incluye una aproximación por series de Fourier de las formas de onda de la fem, que permite modelar máquinas con cualquier forma de onda de fem inducida. La segunda propuesta emplea un observador de orden reducido combinado con un observador de alta ganancia. Además, para compensar las perturbaciones producidas por el par de carga desconocido, se propuso extender el vector de estados para estimar dicho par de carga. El principal aporte de este trabajo radica en el uso de observadores que no se limitan únicamente a máquinas con fem sinusoidal o trapezoidal. Se presentan resultados de simulación y experimentales que validan las estrategias propuestas.

**Jesús Pichardo Centeno. Compensación de Zona Muerta y variación de Carga en el Control de velocidad de motores de Corriente Directa. Querétaro – México, 2008.**

La implementación de sistemas automáticos para la manufactura es actualmente por las ventajas que estos ofrecen en cuanto a repetibilidad, calidad y eficiencia, una de las tareas con más demanda industrial. Entre estos, los servosistemas

impulsados por máquinas eléctricas brindan para un gran número de aplicaciones, el más avanzado y preciso control de movimiento disponible en el mercado. El presente trabajo forma parte del esfuerzo que se realiza en CICATA-IPN por sentar las bases para el desarrollo de tecnología propia en materia de control de movimiento basado en motores de corriente directa. El sistema experimental desarrollado en esta tesis para el control de movimiento de motores de corriente directa, fue motivado por necesidades del centro de investigación para el control de velocidad, la compensación de fenómenos de zona muerta y desviaciones por variaciones de carga en motores. El motor principal utilizado para el desarrollo del sistema, fue de imán permanente con escobillas, utilizando un encoder incremental, en cuadratura como elemento de retroalimentación. El algoritmo base es un controlador PI sintonizado para un desempeño óptimo. Experimentalmente se encontró que la zona muerta no es simétrica, depende de la carga referida al eje del motor, de su aceleración y de la frecuencia del PWM utilizada para modular la señal de control. Inicialmente, mediante la función signo, se sumó a la señal de control el voltaje requerido para evitar la zona muerta y el volver a sintonizar el controlador de acuerdo a la señal de referencia deseada, se logró una compensación ante perturbaciones de par constantes, Aunque este método logró minimizar su efecto en el seguimiento de una señal de referencia sinusoidal, no de manera completa. Sintonizando al controlador PI mediante un "set-point-gain-scheduling" basado en el modelo electromecánico, se logró responder de forma más rápida a variaciones de carga aunque el sobre-impulso alcanzó en algunos experimentos valores de hasta el 50%. Para eliminar el exceso en el sobre-impulso y lograr una respuesta acorde con lo simulado, se agregó al sistema de control una estructura "anti-wind-up" para evitar los efectos causados por la saturación en el servoamplificador, logrando sobre-impulsos cercados al 0%. El sistema desarrollado permite, la identificación fuera de línea de los parámetros de la función de transferencia para controlar la velocidad de motores, corregir efectos de zona muerta y, eliminar el sobre impulso que se genera cuando un sistema de control trata de compensar variaciones de carga.

**Alexis Cabello Restrepo. Modelo Dinámico de la Máquina de Reluctancia conmutada aplicado a simulaciones en Procesadores Digitales de Señales. Caracas-Colombia, 2006.**

Este trabajo presenta un modelo no lineal para el motor de reluctancia conmutada (SRM por sus siglas en inglés), basado en sus características de magnetización, con el fin de simular el comportamiento dinámico del motor ante diferentes estrategias de control. Las curvas características se deben obtener experimentalmente para ser ajustadas con una función polinómica. Esto permite obtener un modelo analítico en ecuaciones diferenciales de primer orden, que puede ser resuelto por métodos convencionales de análisis numérico para simular el comportamiento del motor. Este modelo se aplica tanto en simulaciones en MATLAB como en un procesador digital de señales ADSP-21364. Usando el modelo se comprueba que la estrategia de modulación de ancho de pulso de voltaje permite reducir el valor de la corriente inicial de arranque y los rizados de corriente, velocidad y par.

**José Joaquín Tristán Moncada, Magnetización de Sistemas Ingenieros de plantas de producción de medicamentos, un aporte a la eficiencia energética. La Habana – Cuba, 2008.**

En este trabajo se analizan los resultados obtenidos con la instalación de dispositivos magnetizadores en diferentes sistemas ingenieros de los centros del polo científico de Ciudad Habana pertenecientes al Consejo de Estado. Los magnetizadores instalados son a imanes permanentes producidos en el CNEA y en el CCE de Pinar del Río. En los centros beneficiados se ha logrado favorecer que las redes técnicas y el equipamiento tecnológico funcionen con la eficiencia requerida en respaldo a un servicio técnico de la más alta calidad, preservándose la vida útil del equipamiento, evitando y previniendo que la corrosión y las incrustaciones dañen su funcionamiento. Se muestran los diferentes esquemas tecnológicos y lugar de ubicación de los magnetizadores, así como los principales resultados obtenidos después de un año de trabajo.

## 2.2. BASES TEÓRICAS

### 2.2.1. Motor eléctrico de corriente alterna (AC)

Se denomina motor de corriente alterna a aquellos motores eléctricos que funcionan con corriente alterna. Un motor es una máquina motriz que convierte energía eléctrica en energía mecánica de rotación o par. Un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en fuerzas de giro por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

Como toda máquina eléctrica, los motores asíncronos constan de dos partes fundamentales y distintas:

**El estator:** Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fijada una corona de chapas de acero al silicio provistas de unas ranuras. Los bobinados de sección apropiada están dispuestos en dichas ranuras formando las bobinas que se dispondrán en tantos circuitos como fases tenga la red a la que se conectará la máquina.

**El rotor:** Es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y consiste en un núcleo de chapas de acero al silicio apiladas que forman un cilindro, en el interior del cual se dispone un bobinado eléctrico. Los tipos más utilizados son:

- Rotor de jaula de ardilla
- Rotor bobinado.

A los motores eléctricos de corriente alterna se les denomina motores de inducción debido a que su funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas. Las corrientes que circulan por el rotor son producidas por el fenómeno de inducción electromagnética, conocido comúnmente como ley de Faraday, que establece que si una espira es atravesada por un campo magnético

variable en el tiempo se establece entre sus extremos una diferencia de potencial dado por la expresión:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

e = Diferencia de potencial inducida en la espira en voltios

$\varphi$  = Flujo que corta a la espira en Weber

t = Tiempo en segundos<sup>1</sup>

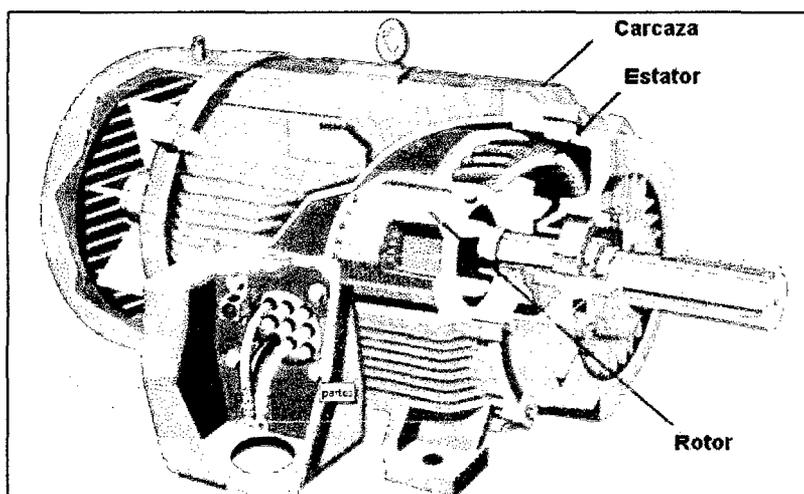


Figura N° 2.1. Estructura de un motor eléctrico

Si se distribuye espacialmente alrededor del estator de un motor los bobinados de un sistema de tensiones trifásicos de caladas 120° se genera un campo magnético giratorio. La velocidad de giro de este campo magnético, denominada velocidad de sincronismo, viene dada por la expresión:

<sup>1</sup>Merino Azcárraga, José María: "Arranque industrial de motores asíncronos. Teoría, cálculo y aplicaciones". Ed. McGraw-Hill. Madrid, 1995.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

$n$  = Velocidad de giro del campo magnético en rpm

$f$  = Frecuencia de corriente eléctrica de alimentación de la máquina

$p$  = Número de pares de polos magnéticos establecidos en el bobinado del estator.

### 2.2.1.1. Clasificación de motores eléctricos de CA

Los motores eléctricos alimentados por Corriente Alterna están clasificados en:

- **Motores síncronos.**
- **Motores asíncronos.**
  - ✓ **Monofásicos:**
    - De bobinado auxiliar
    - De espira en cortocircuito
    - Universal
  - ✓ **Trifásicos:**
    - De rotor bobinado
    - De rotor en cortocircuito (jaula de ardilla)

### 2.2.1.2. El motor síncrono

Es en esencia un alternador trifásico que funciona a la inversa. Los imanes del campo se montan sobre un rotor y se excitan mediante corriente continua, y las bobinas de la armadura están divididas en tres partes y alimentadas con corriente alterna trifásica. La variación de las tres ondas de corriente en la armadura provoca una reacción magnética variable con los polos de los imanes del campo, y hace que el campo gire a una velocidad constante, que se determina por la frecuencia de la corriente en la línea de potencia de corriente alterna.

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Por ejemplo si la fuente es de 60 Hz, si el motor es de dos polos, gira a 3600 RPM; si es de cuatro polos gira a 1800 RPM y así sucesivamente. Este *motor o gira a la velocidad constante dada por la fuente o, si la carga es excesiva, se detiene.*

$$n = \frac{60 * f}{P} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

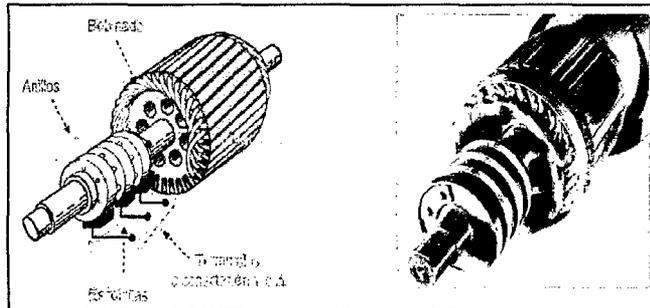
El motor sincrónico es utilizado en aquellos casos en que se desea velocidad constante. En nuestro medio sus aplicaciones son mínimas y casi siempre están en relacionadas con sistemas de regulación y control mas no con la transmisión de potencias elevadas.

A pesar de su uso reducido como motor, la maquina sincrónica es la más utilizada en la generación de energía eléctrica por ejemplo, en las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas mediante generadores sincrónicos trifásicos. La máquina sincrónica puede ser monofásica o trifásica.

#### 2.2.1.3. Motor asincrónico de rotor bobinado

Se utiliza en aquellos casos en los que la transmisión de potencia es demasiado elevada (a partir de 200 KW) y es necesario reducir las corrientes de arranque. También se utiliza en aquellos casos en los que se desea regular la velocidad del eje. Su característica principal es que en el rotor se aloja un conjunto de bobinas que además se pueden conectar al exterior a través de anillos rozantes. Un detalle interesante es que la

velocidad del eje nunca podrá ser superior que la velocidad correspondiente si el motor fuera sincrónico.



**Figura N° 2.2.** Estructura de un motor de rotor bobinado

Los motores de inducción con rotor devanado, a pesar de costos más elevado, son comparados con los motores de jaula de ardilla, porque hacen posibles importantes ventajas de aplicación por encima de estos.

Históricamente han sido utilizados para partir cargas de alta inercia o que exijan conjugados de partida elevados, o aunada, cuando el sistema de accionamiento requiere partidas suaves. Con un sistema estático de control de velocidades, los motores con rotor devanado son una importante alternativa en aquellos casos en los se requieren fases limitadas de control de velocidades.

#### **2.2.1.4. Motor de jaula de ardilla instalado en el winche de izaje de la Compañía Minera Casapalca S.A.**

El más simple de todos los tipos de motores eléctricos es el motor de inducción de caja de ardilla que se usa con alimentación trifásica. La armadura de este tipo de motor consiste en tres bobinas fijas y es similar a la del motor sincrónico. El elemento rotatorio consiste en un núcleo, en el que se incluyen una serie de conductores de gran capacidad colocados en círculo alrededor del árbol y paralelos a él.

Cuando no tienen núcleo, los conductores del rotor se parecen en su forma a las jaulas cilíndricas que se usaban para las ardillas.

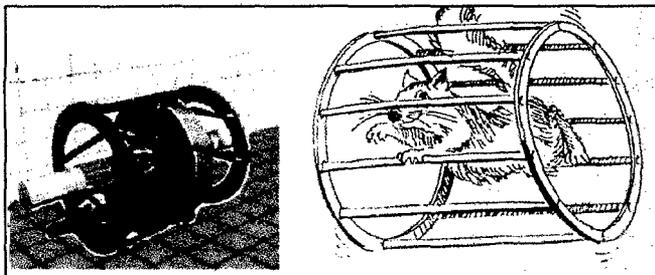


Figura N° 2.3. Rotor tipo jaula de ardilla.

Las ranuras del rotor suelen hacerse oblicuas respecto al eje para evitar así puntos muertos en la inducción electromagnética.

Un inconveniente de los motores con rotor de jaula de ardilla es que en el arranque absorbe una corriente muy intensa (de 4 a 7 veces la nominal o asignada), y lo hace además con un bajo factor de potencia, y a pesar de ello, el par de arranque suele ser bajo. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del par o conjugado y del comportamiento de la corriente versus velocidad.

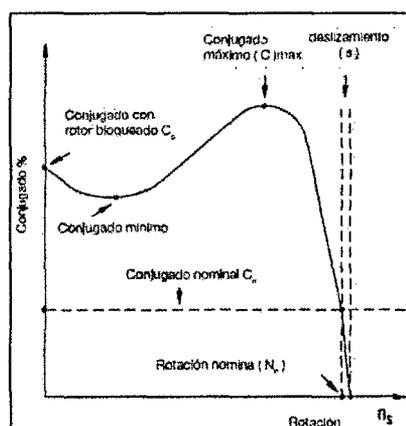


Figura N° 2.4. Comportamiento del conjugado o par motor.

Curva par-velocidad del motor ABB AMI 500L8A instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A.

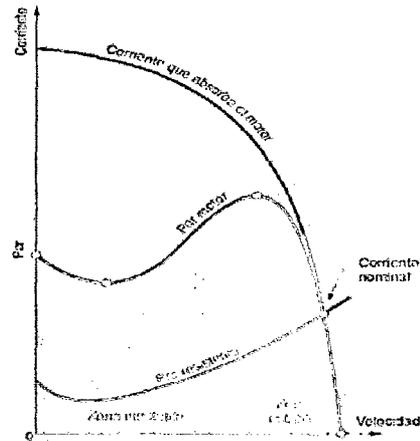


Figura N° 2.5. Comportamiento de la corriente pico de un motor AC.

Curva corriente-velocidad del motor ABB AMI 500L8A instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A.

**Co: Conjugado básico** - es el conjugado calculado en función de la potencia y de la velocidad síncrona.

$$C_o \text{ (Kgfm)} = \frac{716 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{974 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

$$C_o \text{ (Nm)} = \frac{7.024 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{9.555 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

**Cn : Conjugado nominal o de plena carga** - es el conjugado desarrollado por el motor a potencia nominal, bajo tensión y frecuencia nominales.

**Cp: Conjugado con rotor bloqueado o conjugado de arranque** - es el conjugado mínimo desarrollado por el motor bloqueado, para todas las posiciones angulares del rotor, bajo tensión y frecuencia nominales. Este

conjugado puede ser expresado en Nm o, más comúnmente, en porcentaje del conjugado nominal.

$$C_p (\%) = \frac{C_p (\text{Nm})}{C_n (\text{Nm})} \cdot 100$$

En la práctica, el conjugado de rotor bloqueado debe ser el más alto posible, para que el rotor pueda vencer la inercia inicial de la carga y pueda acelerarla rápidamente, principalmente cuando el arranque es con tensión reducida.

**Cmin:** Conjugado mínimo es el menor conjugado desarrollado por el motor al acelerar desde la velocidad cero hasta la velocidad correspondiente al conjugado máximo. En la práctica, este valor no debe ser muy bajo, es decir, la curva no debe presentar una depresión acentuada en la aceleración, para que el arranque no sea muy demorado, sobrecalentando el motor, especialmente en los casos de alta inercia o de arranque con tensión reducida.

**Cmáx:** Conjugado máximo es el mayor conjugado desarrollado por el motor, bajo tensión y frecuencia nominal, sin caída brusca de velocidad. En la práctica, el conjugado máximo debe ser el más alto posible, por dos razones principales:

- a) El motor debe ser capaz de vencer, sin grandes dificultades, los eventuales picos de carga, como puede ocurrir en ciertas aplicaciones, como en trituradoras, mezcladoras y otras.

- b) El motor no debe perder bruscamente la velocidad cuando ocurran caídas de tensión momentáneamente excesivas.

La baja resistencia del rotor hace que los motores de jaula de ardilla tengan excelentes características para marchas a velocidad constante.

Hasta hace unos cuantos años (década de los 90), un inconveniente de los motores con rotor de jaula de ardilla era que su velocidad no era regulable, pero actualmente con los variadores de velocidad electrónicos se puede conseguir un control perfecto de la práctica totalidad de parámetros del motor, entre los que destacan el par, la corriente absorbida y la velocidad de giro.

Las características con las que cuentan los motores instalados en la Compañía Minera Casapalca son idénticas y se describen a continuación:

- Modelo: AMI 500L8A
- Voltaje de alimentación: 690 V
- Potencia: 1050 Kw
- Corriente de consumo: 1181 A
- Factor de potencia: 0.77
- Frecuencia: 56.9 Hz
- Velocidad: 850.1 rpm
- Altitud de trabajo: 4500 m.s.n.m.
- Peso: 6660 Kg.
- Protección: IP55.
- Tipo de ventilación: Forzada desmontable.
- Número de polos: 8

- Tipo de rodamientos:      antifricción

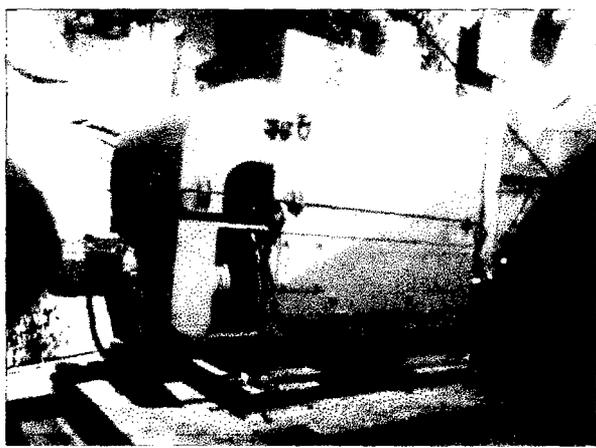


Figura N° 2.6. Motor ABB de 1050 Kw

El tipo de ventilación para este motor es forzado tanto axial y radialmente. Los motores de ventilación forzada se alimentan con 690V. Ambos ventiladores van montados en la carcasa del motor para reducir la temperatura que se genera en el bobinado por la manera de trabajo con la que opera el winche para izar mineral en sentido horario y anti horario.

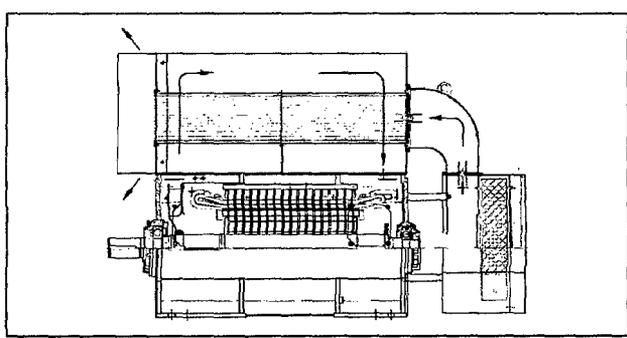


Figura N° 2.7. Sentido de la ventilación forzada en el motor.

## 2.2.2. Tipos de arranque para motores AC

### 2.2.2.1. Arranque estrella/triángulo

Este proceso consiste en aplicar en el arranque la tensión nominal del motor en la conexión de triángulo cuando éste está conectado en estrella, con lo que la tensión de alimentación se reduce en  $\sqrt{3}$  y el par de arranque en  $1/3$ . Una vez que el motor ha empezado a girar (se aconsejan pasar de la conexión estrella a la conexión triángulo hasta que el motor no haya adquirido, al menos, una velocidad del 80% de la nominal), se conmuta la conexión de los devanados a triángulo, con lo que se le está aplicando la tensión nominal de alimentación. La corriente de arranque se reduce en  $1/\sqrt{3}=0.6$  en relación con la corriente de arranque directo<sup>2</sup>.

Este método presenta los siguientes inconvenientes:

1. Disminuye el par de arranque al disminuir la tensión de alimentación en un factor de  $1/3$ . No hay control sobre el nivel de reducción de la corriente ni del par.
2. El motor se deja de alimentar durante el cambio de la conexión de estrella a triángulo en los devanados del estator.
3. Aumenta el tiempo de arranque.

---

<sup>2</sup>Serrano Iribarnegaray, L; Cervera Vicente, A., Riera Guasp, M.: Motores asíncronos trifásicos. Descripción general y teoría básica, 1999.

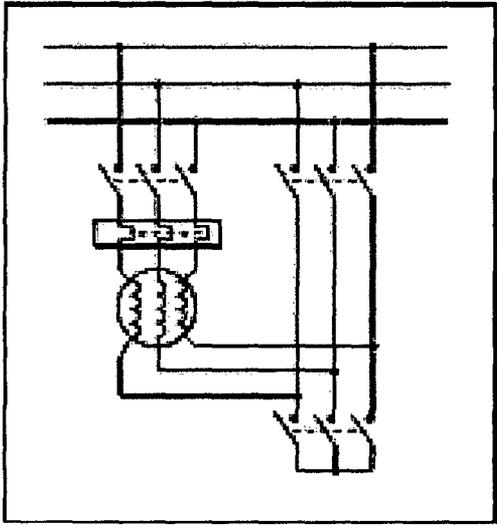


Figura N° 2.8. Esquema eléctrico del arranque estrella-triángulo.

**2.2.2.2. El arranque con auto-transformador**

Se aplica a motores cuya potencia nominal es mayor que 5 Kw.

Sabemos que la corriente de arranque vale:

$$I_{ARRANQUE} = (I/m)^2_{ARRANQUE} = (V^2) / [(R^e + m^2 \cdot R^i)^2 + (X^e + m^2 \cdot X^i)^2] \quad (Ec. 2.5)$$

Es decir, que la corriente de arranque depende de la tensión de alimentación del motor. Si disminuimos la tensión de alimentación en el momento del arranque, reduciremos la corriente de arranque. Una vez que el motor alcance una determinada velocidad, con  $s < 1$ , procederemos a restablecer la tensión nominal de alimentación.

El procedimiento de arranque es el siguiente: se conecta un autotransformador trifásico alimentando al motor con una  $V_e$  (tensión de estator) menor de  $V_e N$  de tal forma que la intensidad de arranque sea la deseada. Cuando el motor alcanza las condiciones de funcionamiento se desconecta el autotransformador y se alimenta al motor a su  $V_e N$ . Este proceso suele hacerse en dos o tres pasos con tensiones no

inferiores al 40-60 y 75% de la tensión nominal de alimentación del motor.

En la tabla adjunta se muestran los diferentes valores de la tensión del primer punto, así como la corriente absorbida y el par generado por el motor en el primer punto de arranque con autotransformador para los casos de 2 y de 3 puntos de arranque.

**Tabla N° 2.1.** Características de un arranque con autotransformador

Número de puntos arranque	Tensión en el motor con el primer punto	Corriente absorbida por el motor con el primer punto	Par de arranque en el primer punto
2	65% de $V_{línea}$	42% de $I_{arranque\ directo}$	42% del par
3	55% de $V_{línea}$	30% de $I_{arranque\ directo}$	30% del par

Fuente: Merino Azcárraga, José María: "Arranque industrial de motores asíncronos. Teoría, cálculo y aplicaciones".

Este método de arranque presenta las siguientes características:

1. Cambios en el par debido al paso de una tensión a otra, poco par arranque.
2. Un número limitado de los escalones de tensión de salida limitan las posibilidades de seleccionar la corriente de arranque ideal.
3. Los modelos aptos para condiciones de partida frecuente o de larga duración son caros.
4. No pueden realizar una partida con reducción de tensión eficaz con cargas en las que las necesidades de arranque varíen.

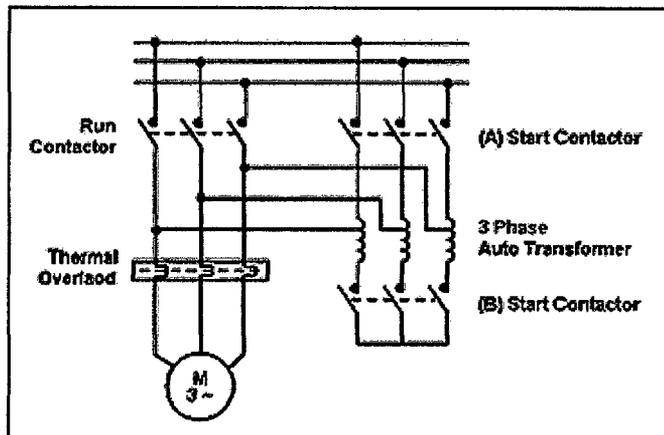


Figura N° 2.9. Esquema de conexión de un arranque con auto-transformador

### 2.2.2.3. Arranque con reducción de tensión

Cuando partimos un motor de inducción de C. A., a tensión nominal, en primer lugar absorben la corriente de bloqueo del rotor (LRC) y crean un par de bloqueo de rotor (LRT). Según acelera el motor, la corriente disminuye y el par aumenta hasta su punto de ruptura antes de caer a niveles de velocidad nominal.

Motores con casi idénticas características de velocidad, a menudo presentan diferencias significativas en las posibilidades de partida. Las corrientes LRC pueden oscilar entre un 500% o exceder de 900% de la corriente máxima del motor (FLC). El par LRT puede ser de un 70% o elevarse hasta alrededor de un 230% del torque máximo (FLT).

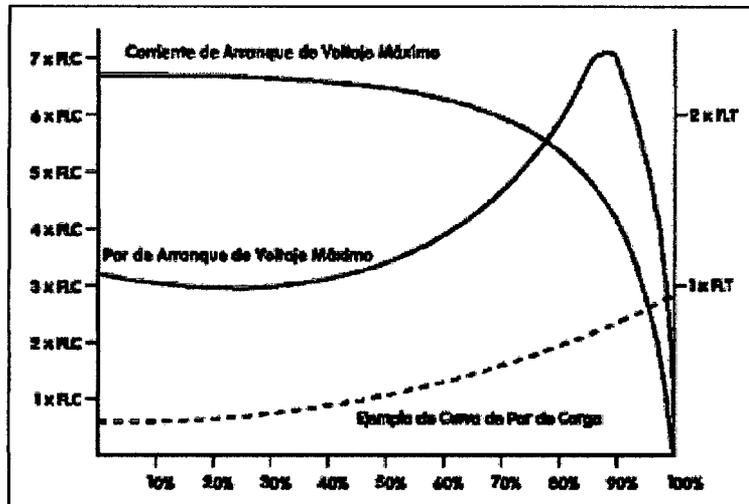


Figura N° 2.10. Curvas de par y corriente en un motor AC.

A tensión máxima, la corriente y del par del motor determinan los límites en los que se puede realizar un arranque con reducción de tensión. En las instalaciones en las que reducir la corriente de arranque o aumentar el par de arranque sean críticos, es importante asegurarse de que se usa un motor con características adecuadas: LRC bajo y LRT alto.<sup>3</sup>

Cuando se use un arranque con reducción de tensión, el par de arranque del motor se reducirá según la siguiente fórmula:

$$T_{ST} = LRT \times \left(\frac{I_{ST}}{LRC}\right)^2 \tag{Ec. 2.4}$$

Donde:

$T_{ST}$  = Par de arranque

$I_{ST}$  = Corriente de arranque

LRC = Corriente de bloqueo de rotor

LRT = Par de bloqueo de rotor

<sup>3</sup> Serrano Iribarnegaray, L.; Cervera Vicente, A., Riera Guasp, M.: Motores asíncronos trifásicos. Curvas características y otros datos de interés industrial, 1999.

La corriente de arranque sólo se puede reducir hasta el punto donde el par de arranque sea aún superior al requerido por la carga. Bajo este punto, la aceleración del motor cesará y el conjunto carga/motor no alcanzará la velocidad máxima.

#### **2.2.2.4. Los arrancadores de resistencia primaria**

Este tipo de arranque ofrece un mayor control, Sin embargo, tienen una serie de características que reducen su efectividad. Algunas de éstas son:

1. Dificultad de optimizar el rendimiento del arranque cuando está en servicio porque el valor de resistencia se tiene que calcular cuando se realiza el arranque y es difícil cambiarlo después.
2. Bajo rendimiento en situaciones de arranque frecuente debido a que el valor de las resistencias cambia a medida que se va generando calor en ellas durante un arranque. Necesita largos periodos de refrigeración entre arranques.
3. Bajo rendimiento en arranques con cargas pesadas o en arranques de larga duración debido a la temperatura en las resistencias.
4. No realiza un arranque con reducción de tensión efectivo cuando se trata de cargas en las que las necesidades de arranque varían.

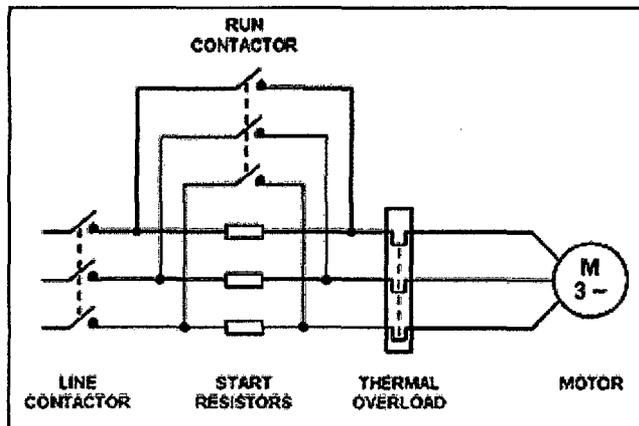


Figura N° 2.11. Esquema eléctrico de un arranque por resistencias

### 2.2.2.5. Arranadores suaves

Los convertidores de frecuencia son también llamados variadores de velocidad. Ofrecen un control superior de la corriente y el par, e incorporan elementos avanzados de protección de motor. Algunos tipos son: Convertidores de frecuencia, Controladores de Par, Controladores de par de 2 ó 3 fases, Controladores de tensión de lazo abierto o de lazo cerrado y Controladores de corriente de lazo cerrado.

Las principales ventajas que ofrecen los convertidores de frecuencia son:

1. Control simple y flexible sobre la corriente y el par de arranque.
2. Control uniforme de la corriente y la tensión libre de saltos o transiciones.
3. Apto para realizar arranques frecuentes.
4. Apto para un cambio sencillo de las condiciones de arranque.
5. Control de parada suave que amplía el tiempo de deceleración del motor.
6. Control de frenado que reduce el tiempo de deceleración del motor.

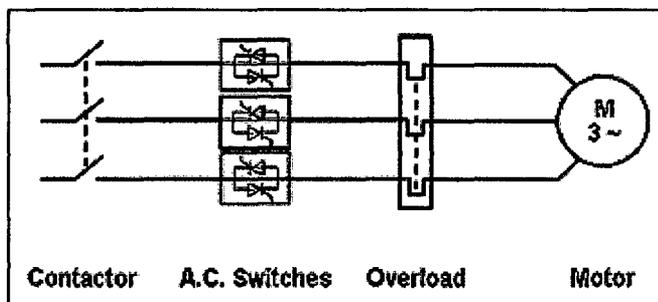


Figura N° 2.12. Esquema eléctrico de un arrancador suave.

### 2.2.3. Variadores de velocidad

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, etc. En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.<sup>4</sup>

Los variadores de velocidad son convertidores de energía encargados de modular la energía que recibe el motor. Se utilizan estos equipos cuando las necesidades de la aplicación sean:

- Dominio de par y la velocidad
- Regulación sin golpes mecánicos
- Movimientos complejos
- Mecánica delicada

Los principales tipos de variadores son:

- Rectificador controlado de motor de corriente continua.
- Convertidor de frecuencia para motor asíncrono
- Regulador de tensión para arranques de motor asíncrono.

<sup>4</sup> Tak Kenjo: Electric Motor Sandtheir Controls. Oxford Science Publications, 2000.

### 2.2.3.1. Regulador de tensión para el arranque de motores asíncronos

Suministra, a partir de una red de corriente alterna, una corriente alterna de frecuencia fija igual a la de la red, mediante el control del valor eficaz de la tensión, modificando el ángulo de retardo de disparo de los semiconductores de potencia (dos tiristores montados en anti paralelo en cada fase del motor).

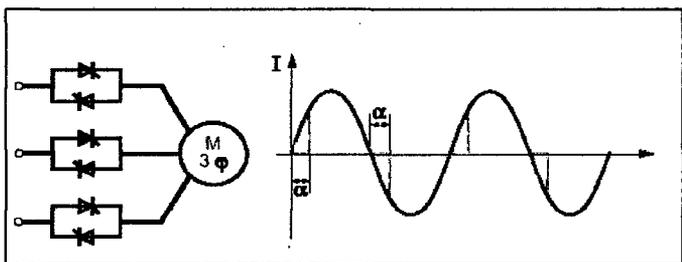


Figura N° 2.13. Arrancador para motor asincrono y forma de onda de la corriente de alimentación.

### 2.2.3.2. Convertidor de Frecuencia para motor asincrono ACS800

El convertidor de frecuencia suministra a partir de una red de corriente alterna de frecuencia fija, una tensión alterna trifásica, de valor eficaz y frecuencia variables. La tensión de salida del variador es siempre trifásica.

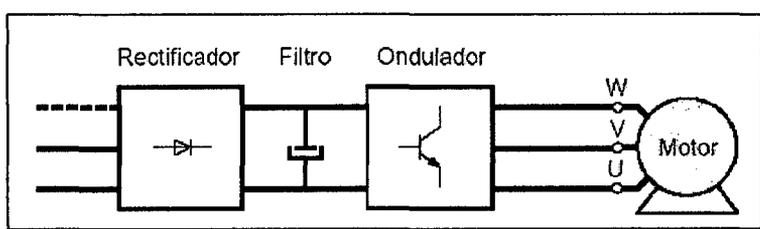


Figura N° 2.14. Esquema de principio de un convertidor de frecuencia

Los convertidores de frecuencia son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y el par del motor, se llaman así porque debido a la modulación que se hace en la frecuencia de alimentación se puede lograr el cambio de velocidad del motor. Para el desarrollo de esta tesis cada convertidor de frecuencia

ABB comanda un motor también de marca ABB, el convertidor de frecuencia también es denominado DRIVE por ser el encargado de aislar la parte de control y la parte fuerza del sistema. La fórmula para variar la velocidad del motor AC es:

$$n = \frac{60 * f}{P} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

- n = Velocidad de giro en rpm
- f = Frecuencia de la corriente eléctrica de alimentación de la máquina
- p = Número de pares de polos magnéticos establecidos en el bobinado del estator.

Los convertidores de frecuencia ACS800 han sido diseñados para lograr el pleno control de la velocidad y el par de un motor AC modulando además de la frecuencia su voltaje de alimentación.

Los convertidores de frecuencia que comandarán a los motores del winche son de marca ABB cuyo modelo es ACS800-17-2940-7, este modelo de convertidor hace referencia a las siguientes características técnicas:

- Serie: ACS800
- Estructura: 17 módulos o tableros ensamblados en un armario: 01 de control, 01 de fuerza, 06 de rectificación, 03 de filtrado y 06 de inversión.
- Tensión: 690 VAC en su alimentación.
- Potencia máx.: 2500 Kw
- Corriente: 2460 – 3680 A
- Frecuencia: 0 – 300 Hz.
- Altitud: 4500 m.s.n.m.
- Protección: IP54
- Nivel de ruido: 79 dB

Comando: Local, remoto.

Los parámetros del variador están divididos en grupos de señales como señales actuales que sirven para monitorear el drive y en grupos de parámetros que son los que se configuran dependiendo de la manera de operación del motor. Existen 05 grupos de señales actuales identificados como 01, 02, 03, 04 y 09; por otro lado también se cuentan con 30 grupos de parámetros entre los que encontramos selección de referencia, marcha/paro/dirección, velocidad constante, límites, control motor, etc.

Las señales actuales que siempre son monitoreadas del variador las realizan los parámetros MAIN CONTROL WORD y MAIN STATUS WORD. Ambas señales son palabras de 16 bits.

Tabla N° 2.2. Registro principal de control del drive: **MAIN CONTROL WORD**

Bit	Name	Value	Enter STATE/Description
0	OFF1 CONTROL	1	Enter READY TO OPERATE.
		0	Stop along currently active deceleration ramp (22.03/22.05). Enter OFF1 ACTIVE; proceed to READY TO SWITCH ON unless other interlocks (OFF2, OFF3) are active.
1	OFF2 CONTROL	1	Continue operation (OFF2 inactive).
		0	Emergency OFF, coast to stop. Enter OFF2 ACTIVE; proceed to SWITCH-ON INHIBITED.
2	OFF3 CONTROL	1	Continue operation (OFF3 inactive).
		0	Emergency stop, stop within time defined with Par. 22.07. Enter OFF3 ACTIVE; proceed to SWITCH-ON INHIBITED. Warning: Ensure motor and driven machine can be stopped using this stop mode.
3	INHIBIT OPERATION	1	Enter OPERATION ENABLED. (Note: The Run enable signal must be active; see parameter 16.01. If Par. 16.01 is set to COMM.CW, this bit also activates the Run enable signal.)
		0	Inhibit operation. Enter OPERATION INHIBITED.
4	RAMP_OUT_ZERO	1	Normal operation. Enter RAMP FUNCTION GENERATOR: OUTPUT ENABLED.
		0	Force Ramp Function Generator output to zero. Drive ramps to stop (current and DC voltage limits in force).
5	RAMP_HOLD	1	Enable ramp function. Enter RAMP FUNCTION GENERATOR: ACCELERATOR ENABLED.
		0	Halt ramping (Ramp Function Generator output held).
6	RAMP_IN_ZERO	1	Normal operation. Enter OPERATING.
		0	Force Ramp Function Generator input to zero.
7	RESET	0 ⇒ 1	Fault reset if an active fault exists. Enter SWITCH-ON INHIBITED.
		0	Continue normal operation.
8	INCHING_1	1	Not in use.
		1 ⇒ 0	Not in use.
		0	Not in use.
9	INCHING_2	1	Not in use.
		1 ⇒ 0	Not in use.
		0	Not in use.
10	REMOTE_CMD	1	Fieldbus control enabled.
		0	Control Word ⇒ 0 or Reference ⇒ 0: Retain last Control Word and Reference. Control Word = 0 and Reference = 0: Fieldbus control enabled. Reference and deceleration/acceleration ramp are locked.
11	EXT CTRL LOC	1	Select External Control Location EXT2. Effective if Par. 11.02 is set to COMM.CW.
		0	Select External Control Location EXT1. Effective if Par. 11.02 is set to COMM.CW.
12	USER MACRO CHANGE	0 ⇒ 1	User Macro 2 loaded. Effective if Par. 16.05 is set to COMM.CW.
		1 ⇒ 0	User Macro 1 loaded. Effective if Par. 16.05 is set to COMM.CW.
12 ...	Reserved		
15			

Fuente: Manual firmware del drive ACS800.

**Tabla N° 2.3. Registro principal de estado del drive: MAIN STATUS WORD**

Bit	Name	Value	STATE/Description
0	RDY_ON	1	READY TO SWITCH ON.
		0	NOT READY TO SWITCH ON.
1	RDY_RUN	1	READY TO OPERATE.
		0	OFF1 ACTIVE.
2	RDY_REF	1	OPERATION ENABLED.
		0	OPERATION INHIBITED.
3	TRIPPED	1	FAULT.
		0	No fault.
4	OFF_2_STA	1	OFF2 inactive.
		0	OFF2 ACTIVE.
5	OFF_3_STA	1	OFF3 inactive.
		0	OFF3 ACTIVE.
6	SWC_ON_INHIB	1	SWITCH-ON INHIBITED.
		0	
7	ALARM	1	Warning/Alarm.
		0	No Warning/Alarm.
8	AT_SETPOINT	1	OPERATING. Actual value equals reference value (= is within tolerance limits i.e in speed control the speed error is less than or equal to 10% of the nominal motor speed).
		0	Actual value differs from reference value (= is outside tolerance limits).
9	REMOTE	1	Drive control location: REMOTE (EXT1 or EXT2).
		0	Drive control location: LOCAL.
10	ABOVE_LIMIT	1	Bit is read from the address defined with parameter 92.10 MSW B10 PTR.
		0	Actual frequency or speed value is within supervision limit.
11	EXT CTRL LOC	1	External control location EXT2 selected.
		0	External control location EXT1 selected.
12	EXT RUN ENABLE	1	External Run enable signal received.
		0	No external Run enable received.
13			Bit is read from the address defined with parameter 92.11 MSW B13 PTR.
14			Bit is read from the address defined with parameter 92.12 MSW B14 PTR.
15		1	Communication error detected by fieldbus adapter module (on fibre optic channel CH0).
		0	Fieldbus adapter (CH0) communication OK.

Fuente: Manual firmware del drive ACS800.

## 2.2.4. Winche de izaje

El winche de izaje, es una maquinaria utilizada para elevar, bajar, empujar o tirar carga. El winche de izaje instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A. es utilizado para trasladar mineral desde 500 metros de profundidad, para la extracción de mineral desde esa profundidad traslada 2 contenedores llamados Skips a través de una estructura de madera anclada en las rocas, esta estructura es llamada Pique.

En otras palabras el sistema de izaje a través de los Piques de una mina, tiene semejanza a los ascensores de los edificios por lo que el transporte de mineral es vertical, que tiene siempre presente un torque alto ya que

cada skip pesa 4,7 Ton. y ambos se encuentran siempre sostenidos con un cable de acero de 1 ½".

Los componentes de este winche de izaje son los siguientes componentes:

- Tamboras (02)
- Frenos de bandas activados neumáticamente (02)
- Motores AC (02)
- Variadores de velocidad AC (02)
- Reductor de velocidad (piñones de ambos motores y catalina)
- Sistema de seguridad: Lilly control, límites de recorrido, etc.;
- Mandos de control;
- Relojes indicadores (02);
- Cables de acero (02);
- Skips (02);
- Poleas (02);
- Estructura de desplazamiento o castillo (Piques)

A continuación se muestra una tabla donde se detallan las características más resaltantes de cada componente del sistema de winche de izaje de la Compañía Minera Casapalca S. A.

**Tabla N° 2.4.** Características de Winche de Izaje instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A.

Componentes	Características	Cantidad
Tamboras	Medidas: 120" X 78" Material: Fierro fundido Con bandas laterales para frenado.	02
Frenos de bandas activados neumáticamente	Presión de activación: 90 PSI. Pesa de frenado de 500Kg.	02
Motores AC, tipo síncrono.	Potencia: 1050Kw Voltaje: 690V Corriente: 1181 A	02

	Cosq:0.80 Frecuencia: 60 Hz Velocidad: 850 rpm	
Variadores de velocidad AC	Marca: ABB Modelo: ACS800-17 Potencia: 55-2500 Kw Tipo de estructura: 6XR8i Frecuencia: 60 Hz Tensión: 690VAC Arrancador del ventilador del motor: 690VAC Conexiones modulares: Ethernet, DeviceNet, RS-845, F.O.	02
Reductor de velocidad (piñones de ambos motores y catalina)	Catalina Chevron. Engranajes Chevron. Engrasado neumático. Relación de transmisión: 15/125	02
Sistema de seguridad: Lilly control, límites de recorrido, etc.;	Limitador de altura. Limitador de profundidad. Limitador de sobrevelocidad.	01
Reloj indicador	Indica nivel de posición de skip con flechas. Conectado al sistema de tamboras.	02
Mandos de control	Tablero de control en cabina de operador. Uso Joystick. Activación desde PC. Monitoreo en tiempo real.	01
Cables de acero	Tipo: Cobra 6X19 Alma de nylon. Longitud: 800 m Peso: 5.8Kg/m	02
Skips Metálicos	Material: T21. Medidas: 2X2X4,5m Carga: 9,5 Ton	02
Poleas	Material: Fierro Fundido. Diámetro: 2,5m	02
Estructura de desplazamiento o castillo (Piques)	Material: Madera de Pino. Altura de cuadro: 2m Profundidad Total: 516m. Compartimientos: 03 Estaciones: Zona de carguío y Zona de Volteo.	01

Fuente: Registros de Maquinarias - CMCSA

## 2.2.5. Sistema de compensación de torque de motores AC.

Para lograr el proceso de automatización de compensación de torque de motores AC son necesarias las teorías siguientes:

### 2.2.5.1. Convertidor de frecuencia ACS-800 marca ABB

Como ya se dijo los convertidores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y la cupla de los motores asincrónicos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

El convertidor ACS800 tiene como rango de potencia entre 55 kW y 2500 kW. Todos los convertidores de frecuencia, con independencia de su potencia y tensión, tienen la misma interface de cliente y E/S que facilitan el diseño del sistema y la formación. La configuración de convertidor de frecuencia contiene un rectificador, un bus de CC y un inversor en una única unidad de convertidor de frecuencia de CA.<sup>5</sup>

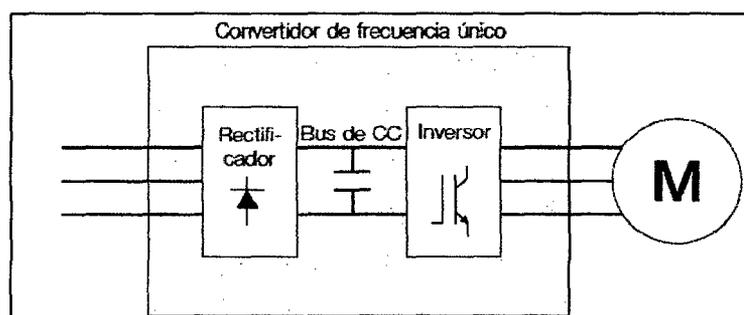


Figura N° 2.15. Etapas del convertidor de frecuencia

La fase de arranque merece una especial atención. El par debe ser el necesario para mover la carga con una aceleración adecuada hasta que se alcanza la velocidad de funcionamiento en régimen permanente, procurando que no aparezcan problemas

<sup>5</sup> ABB Drives; ACS800 Manual de Firmware, ABB Oy, 2009

eléctricos o mecánicos capaces de perjudicar al motor, a la instalación eléctrica o a los elementos que hay que mover.

Estos convertidores incluyen todos los elementos necesarios como son: reactancias integradas para filtrado de armónicos como estándar, chopper de frenado y filtrado EMC (compatibilidad electromagnética) integrados, lo que facilita el montaje en el armario. Asimismo, existe una amplia selección de distintas opciones de E/S y comunicación. También está disponible una selección de accesorios externos y de configuración para controlar varios variadores de velocidad.

Las características más resaltantes de este convertidor son:

- Rango de potencia 55 a 2500 kW
- Rango de tensión 230 a 690 V
- Montaje en la pared o el suelo del armario
- Clase de protección IP 00
- Conexión del cable de alimentación de entrada desde arriba para optimizar el tamaño del armario y el cableado dentro del mismo
- Conexión del cable a motor en el lateral inferior del módulo.
- Diseño modular que permite diversas variantes
- Ubicación libre y acceso sencillo a terminales de E/S (tarjeta de control fuera del módulo).

La estructura de tableros del drive consta de 17 tableros, el tablero de control contiene la parte electrónica del drive, así por ejemplo el panel de control, botones de encendido/pagado, slot para tarjetas de comunicación a cada módulo de rectificación, filtrado e inversión, slot para tarjetas de comunicación externa,

tarjetas de control de temperatura, apertura de braker de fuerza, entre otros. El **tablero de fuerza** contiene el braker o interruptor principal de alimentación que soporta hasta 1000V, los fusibles de protección para el circuito de fuerza del motor, los contactores de alimentación de la ventilación forzada del motor ABB. La parte de **rectificación** se encarga de rectificar la corriente eléctrica ingresada por el tablero de fuerza, la energía rectificada a CC (corriente continua) se realiza por medio de transistores de puerta aislada IGBTs y es monitoreada por el variador ya que cada módulo de rectificación tiene tarjetas de comunicación con el tablero de control. La parte de **filtrado** se encarga de reducir los armónicos y brindar una calidad de corriente CC estable al ingreso de la parte de inversión. Los tableros de filtrado no tienen tarjetas de comunicación con el drive. Finalmente la parte de **inversión u ondulación** es la encargada de entregar energía eléctrica modulada según el requerimiento del usuario hacia el motor, en esta parte se modula la frecuencia y el voltaje para controlar la velocidad y par del motor.

La comunicación entre drive y los módulos instalados en el armario se realiza mediante fibra óptica para proteger las señales de control y monitoreo. Este drive está preparado para alimentar un motor de hasta 2500 Kw de potencia a plena carga, logrando generar hasta un máximo de corriente de 3680 amperios, del mismo modo la variación de frecuencia para el control de velocidad del motor se puede lograr generando un máximo de 300 Hz de frecuencia.

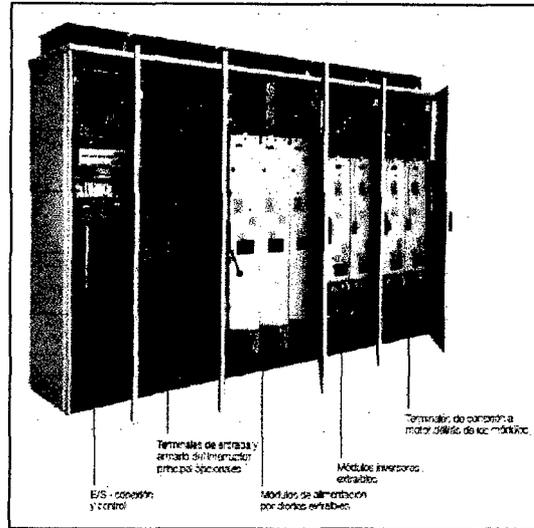


Figura N° 2.16. Convertidor de frecuencia ACS800-17 (55 a 2500 Kw)

Para que el variador de velocidad logre controlar un motor es necesario ingresar los datos de trabajo nominal de éste (descritos en la placa del motor) en su base de datos para que el variador identifique los parámetros a tener en cuenta al momento de actuar sobre el motor y proteger a éste de futuros inconvenientes como sobre corriente, sobre velocidad, etc.

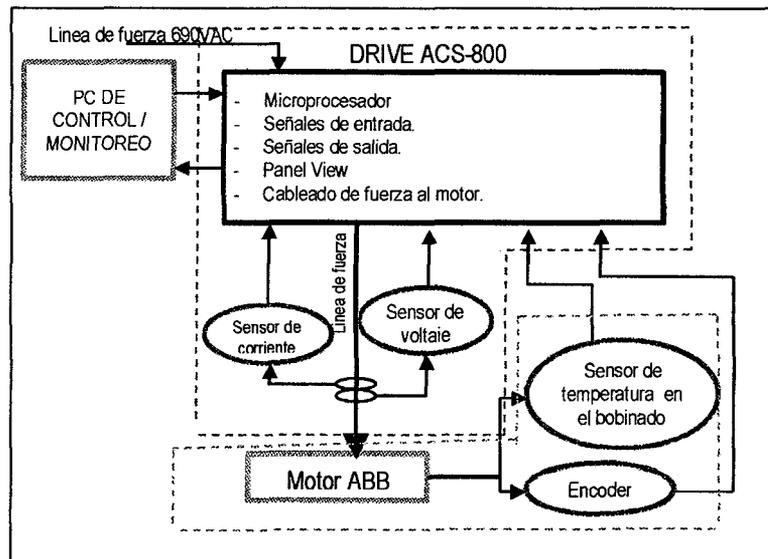


Figura N° 2.17. Diagrama de bloques del control del drives ACS-800 sobre un motor AC

En este diagrama se logra reconocer los sensores que monitorean el funcionamiento adecuado en el motor, garantizando la protección ante sobreesfuerzos, cortos circuitos, entre otros que se pueden presentar durante el funcionamiento del motor. Cabe resaltar que los sensores de corriente y voltaje se encuentran dentro del tablero del variador de velocidad, mientras que los sensores de temperatura y encoder se encuentran dentro del motor ABB.

### 2.2.5.2. Corriente de magnetización

#### **Magnetismo:**

El origen del término “magnetismo” se debe al descubrimiento, realizado por los griegos hace más de 2000 años, de un mineral (en una región del Asia Menor llamada Magnesia) capaz de atraer al hierro. Ese mineral se denomina hoy en día “magnetita”.<sup>6</sup>

A finales del siglo XVI encontramos el primer gran estudio sistemático de los fenómenos magnéticos. Dicho estudio fue realizado por W. Gilbert (médico de la reina Isabel I de Inglaterra), quien, en el periodo que va desde el año 1581 al 1600, efectuó numerosos experimentos de electricidad y magnetismo, recopilando ordenadamente los resultados más importantes de esas experiencias en un libro que tituló "De Magnete".

#### **Magnetización y corrientes eléctricas**

Los electrones en órbita en los átomos pueden tratarse como pequeños dipolos magnéticos que tienen un momento magnético asociado con su momento angular y su spin.

---

<sup>6</sup> Marcelo Alonso, Edward J. Finn: Campos y Ondas. Ed. Pearson. Madrid, 2004.

Según un modelo simple, un electrón que se mueve en una órbita alrededor de un núcleo tiene un momento magnético  $m_L$  proporcional a su momento angular  $L$ , dado por:

$$m_L = -\frac{e}{2m_e} L$$

y también presenta una contribución  $m_S$  al momento magnético total  $m$  debida al momento angular de spin  $S$ , dada por:

$$m_S = -\frac{e}{m_e} S$$

Ya que  $S \sim 2L$ , y donde  $e$  y  $m_e$  son la carga y la masa del electrón, respectivamente.

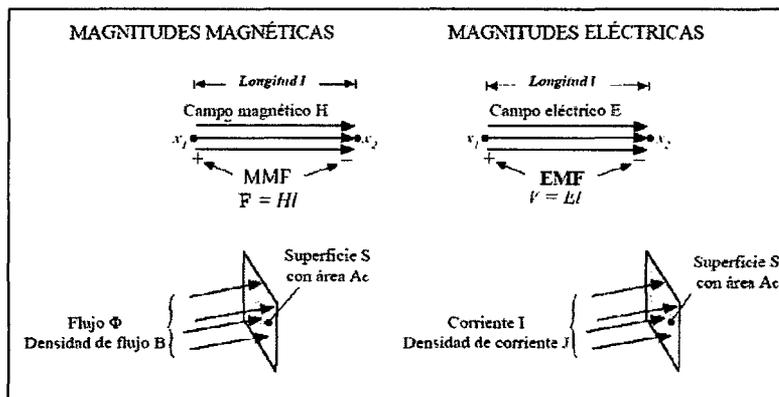


Figura N° 2.18. Similitud de Magnitud magnética y eléctrica

### Vector magnetización, M

El vector magnetización  $M$  de un material es una magnitud vectorial definida como el momento dipolar magnético del material por unidad de volumen:

$$\vec{M}(\vec{r}) = \frac{d\vec{m}}{d\tau}$$

Cuando se aplica a una muestra un campo magnético, si  $m$  es el momento dipolar magnético inducido por átomo o molécula y  $n$  el número de átomos o moléculas por unidad de volumen, la magnetización es:

$$M = n \times m$$

Donde:

$M$  = Magnetización

$n$  = número de átomos por unidad de volumen

$m$  = momento dipolar magnético

La magnetización tiene dimensiones de corriente por unidad de longitud y en el S.I. se mide en A/m.

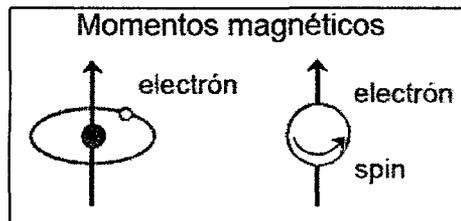


Figura N° 2.19. Momento magnético de un átomo

La corriente de magnetización efectiva por unidad de longitud,  $I_{mag}$ , sobre la superficie de un trozo de material magnetizado es igual a la componente del vector magnetización  $M$ , paralela al plano tangente a la superficie del cuerpo, y tiene dirección perpendicular a  $M$ .

### Vector intensidad magnética, H (campo magnetizante)

El vector intensidad magnética o campo magnetizante  $H$  está dado por la relación:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

H se expresa en A/m. En un medio lineal con permeabilidad magnética m está relación puede expresarse como:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (\text{medio lineal})$$

El vector H depende sólo de las corrientes libres, siendo su valor independiente de las corrientes de magnetización. La ley de Ampere para el vector H se escribe:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{libre}}$$

### 2.2.5.3. Magnetización de motor AC

El proceso de magnetización es dado por el convertidor de frecuencia, el cual se debe de programar. Este evento de magnetización se realiza con Corriente Continua CC aplicado al rotor del motor y con incremento de corriente según el tiempo de magnetización. Para lograr el proceso de magnetización al motor AC, se configuran algunos parámetros del variador.

A continuación se muestra el diagrama de proceso que el variador tiene en cuenta para controlar la magnetización del motor AC.

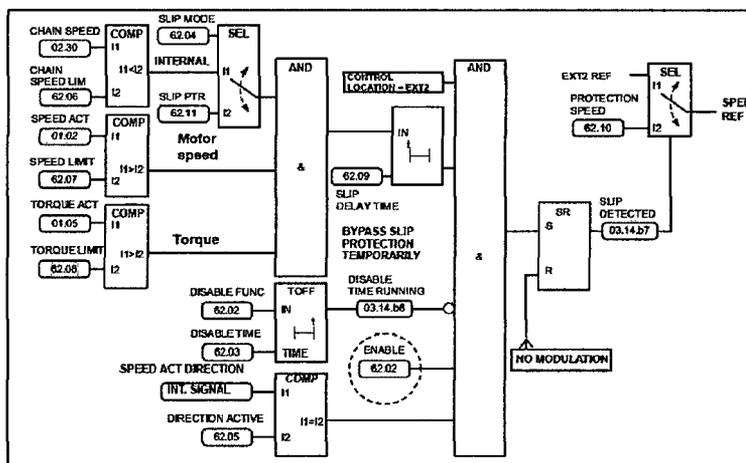


Figura N° 2.20. Diagrama de funcionamiento para la magnetización de un motor AC

Para determinar el torque o par ejercido sobre el eje del motor se desarrollan las siguientes fórmulas:

- El momento o par ejercido por una fuerza es el producto de la fuerza por la distancia ( longitud) perpendicular al eje de giro:

$$M = F * l$$

- La expresión que relaciona la velocidad lineal con la angular viene dada por la fórmula:

$$v = \omega * l, \text{ donde } l \text{ es el radio}$$

- Operando con las expresiones anteriores tenemos:

$$\begin{aligned} P = F * v &\Rightarrow F = \frac{P}{v} \\ M = F * l &\Rightarrow F = \frac{M}{l} \end{aligned} \left. \begin{array}{l} \frac{P}{v} = \frac{M}{l} \\ \frac{P}{v} = \frac{M}{l} \end{array} \right\} \begin{array}{l} P = \frac{M * v}{l} \\ P = \frac{M * \omega * l}{l} \end{array} ; P = M * \omega$$

Donde:

P: Potencia eléctrica del motor (w)

F: Fuerza ejercida sobre el eje del motor(N)

v: velocidad (rpm)

M: Momento de torsión (N/m)

l: longitud desde el eje hacia la carga (m)

$\omega$ : velocidad angular (1/rev)

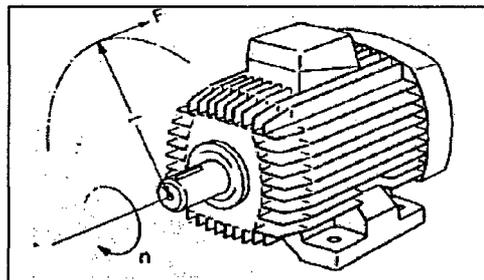


Figura N° 2.21. Par de un motor en arranque.

#### 2.2.5.4. Duración de compensación de torque

La duración de compensación de torque o tiempo de magnetización es calibrada dentro del variador para que se llegue a obtener el torque correcto al momento de liberar los frenos. Si el tiempo es demasiado corto la carga del skip hará girar al motor en sentido opuesto al sentido de rotación, si el tiempo es demasiado prolongado se corre el riesgo de que las bobinas del motor se sobrecalienten.

La magnetización de CC debería seleccionarse si se requiere un elevado par de arranque. El convertidor premagnetiza el motor antes del arranque. El tiempo de premagnetización se determina por cálculo y/o automáticamente y suele ser de 200 ms a 2 s en función del tamaño del motor.

Nota: El arranque para una máquina en giro no es posible cuando se selecciona la magnetización de CC.

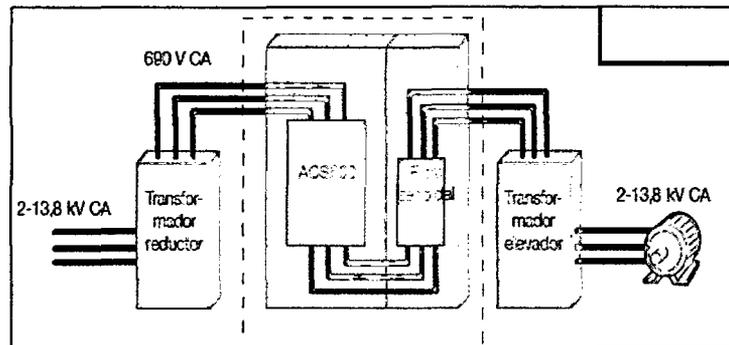


Figura N° 2.22. Diagrama de activación del motor por medio del convertidor ACS800

Para el cálculo del tiempo de magnetización se deben realizar cálculos sobre la carga real que tendrá que mover el motor AC.

$$P = 95000 + 29000 = 124000 \text{ N.}$$

$$C_m = F \cdot d$$

Donde:

**F:** fuerza de la carga.

**d:** radio de la tambora

**Cm:** compuesto mecánico o torque mecánico.

**P:** Peso total de la carga.

La corriente de magnetización resulta de la siguiente ecuación indicada en el manual del variador:

$$I_{mag} = M_{carga}/5.115$$

Donde:

**I<sub>mag</sub>** = Corriente de magnetización.

**M<sub>carga</sub>** = conjugado de carga.

**5.115** = constante de magnetización del motor (bobinado).

Se calibrará el parámetro límite de corriente continua 20.03 una vez determinando la corriente de magnetización.

La corriente de magnetización CC se comporta de manera linealizada elevándose en el tiempo, teniendo un proceso de pre-magnetización que dura entre 10 y 300 ms, luego de transcurrido este tiempo se produce la magnetización del bobinado a ser calibrado según el cálculo.

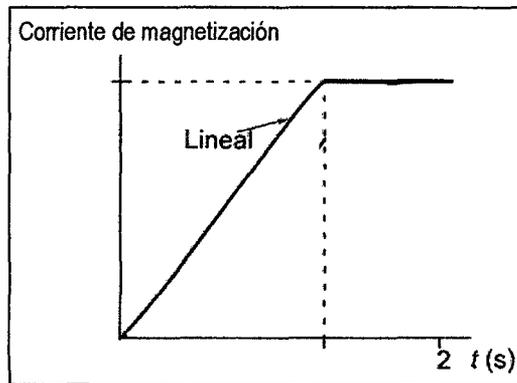
$$t_{mag} = I_{mag} / 4$$

Donde:

**t<sub>mag</sub>** = Tiempo de magnetización (ms).

**I<sub>mag</sub>** = Corriente de magnetización (A).

**2.5** = constante de linealización.



**Figura N° 2.23.** Comportamiento de corriente de magnetización en el tiempo.

Otros parámetros también importantes a ser calibrados en el variador son:

- Velocidad mínima 20.01
- Velocidad máxima 20.02
- Par máximo 20.04
- Función marcha parámetro 21.01
- Tiempo de premagnetización constante 21.02
- Torque máximo en izaje 66.17

#### 2.2.5.5. PLC ControlLogix

Los controladores lógicos programables o PLC (*programmable logic controller* en sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos muy usados en automatización industrial. Un PLC suele emplearse en procesos industriales que tengan una o varias de las siguientes necesidades:

- Espacio reducido.
- Procesos de producción periódicamente cambiantes.
- Procesos secuenciales.
- Maquinaria de procesos variables.
- Instalaciones de procesos complejos y amplios.

- Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso.

El PLC ControlLogix es de tipo modular de Gama Alta fabricado por Allen Bradley. Las características que tiene este PLC son:

- Etiquetas controladas: 32
- Hasta 100 programas continuos.
- Chasis 1756
- Uso de memoria desde 2MB hasta 8MB
- Interfaz para módulo de programación y cable serial para PC
- Funciones básicas y especiales habituales pre programadas, por ejemplo para conexión retardada, desconexión retardada, contador ascendente y descendente, temporizador
- Marcas digitales y analógicas
- Entradas y salidas 1756 ControlLogix
- Movimiento simple:
- Motores paso a paso
- Servo mediante DeviceNet
- Variador de CA analógico
- Opciones de Comunicación:
  - ✓ EtherNet/IP
  - ✓ ControlNet
  - ✓ DeviceNet
  - ✓ Data Highway Plus
  - ✓ E/S remotas universales en serie
  - ✓ Modbus mediante rutina de lógica de escalera
  - ✓ DH-485
  - ✓ SynchLink
- Lenguajes de Programación:

- ✓ Lenguaje Ladder.
- ✓ Estructura de Texto.
- ✓ Diagrama de Bloques.
- ✓ Tabla de Función Secuencial.

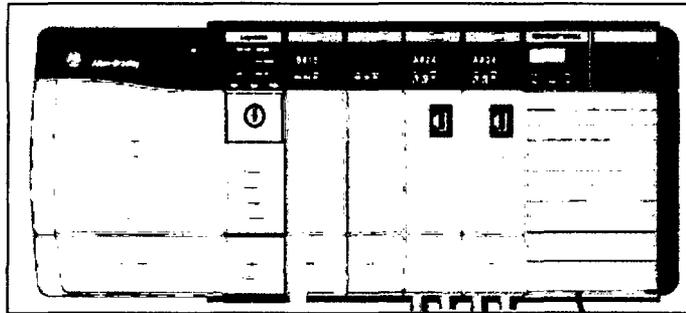


Figura N° 2.24. PLC ControlLogix

#### 2.2.5.6. Tarjeta RETA-01: Interface Variador-PLC

La tarjeta RETA-01 es un módulo del Convertidor de frecuencia ASC800 que se encarga de la comunicación e interacción con otros dispositivos por medio de Ethernet.<sup>7</sup>

La tarjeta de interface RETA-01 es un dispositivo opcional para los variadores ABB que habilita la conexión drive – Ethernet network mediante la protocolo de comunicación CIP (Common Industrial Protocol), este protocolo permite la integración total de la información entre sus diferentes niveles jerárquicos. Este protocolo define las características de las capas de aplicación para diferentes redes lo que ha dado lugar a denominarlo como la “Familia de redes CIP”, compuestas como por ejemplo: ControlNet, DeviceNet, Ethernet, entre otros. En la siguiente figura se muestra la arquitectura de red para las distintas redes que implementan CIP en sus capas superiores.

<sup>7</sup> ABB Drives; User's Manual Ethernet Adapter Module RETA-01. ABB Oy, 2007.

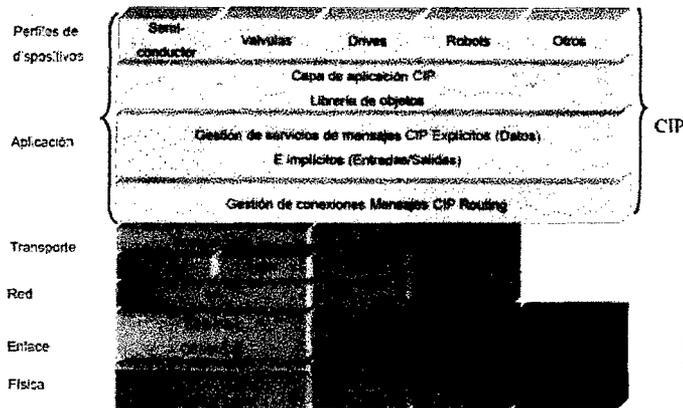


Figura N° 2.25. Familia de redes del protocolo CIP

La tarjeta RETA-01 identifica al drive como un esclavo de la red Ethernet. A través del RETA - 01 módulo de Ethernet es posible hacer lo siguiente:

- Dar los comandos de control al variador: (Start, Stop, Run enable, etc...).
- Dar la referencia de velocidad o torque del motor al variador.
- Dar los valores actuales del proceso para realimentar un proceso PID.
- Leer la información de estado y valores actuales del drive.
- Leer el registro STATUS y los valores actuales de variador.
- Modificar los parámetros del variador. Resetea el variador después de una falla.

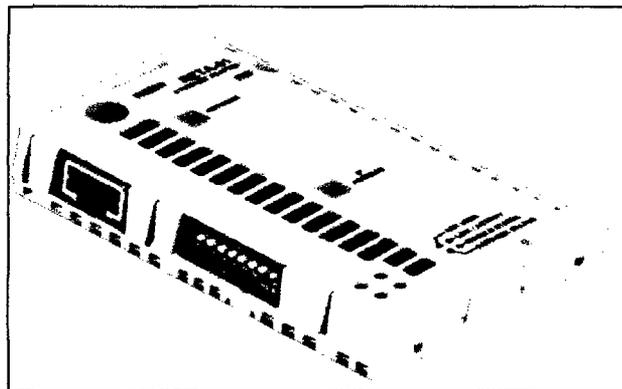


Figura N° 2.26. Tarjeta RETA-01: interface para Variador- PLC

## 2.3. HIPÓTESIS

### 2.3.1. Hipótesis general

El sistema electrónico basado en PLC compensará el torque en el motor AC de winche durante el arranque manipulando la corriente de magnetización, evitando choques del Skip con la polea de izaje.

### 2.3.2. Hipótesis específica

- El nivel de intensidad de corriente de magnetización de 2000 amperios entregado por el variador al motor AC compensará el torque necesario en el momento de arranque.
- La implementación de una subrutina en el PLC ControlLogix controlará el tiempo de magnetización de 800 ms en el motor AC para mantener la suficiente compensación de torque antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

## 2.4. VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables de estudio que permitirán demostrar las hipótesis son los siguientes:

### 2.4.1. Variables independientes

Intensidad de corriente pico = I

Duración de magnetización = TM

### 2.4.2. Variable dependiente

Compensación de Torque = CT

**DEFINICIÓN OPERATIVA DE VARIABLES E INDICADORES**

**Tabla N° 25. Operacionalización de variables**

VARIABLES	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	INDICADORES
<b>Variable Independiente:</b>	$\text{CT} = f(I, \text{TM})$	
▶ Intensidad de Corriente = I (X1)		▶ X1=Torque eléctrico máximo (T) (X <sub>1,1</sub> )
▶ Duración de magnetización= TM (X2)		▶ X2= Temperatura de bobinado (T°) (X <sub>2,1</sub> )
<b>Variable Dependiente:</b>		
▶ Compensación de torque = CT (Y)		▶ Y'=Número de arrastres (%) Y'

**FUENTE:** Creada por el autor

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO**

La investigación se desarrolló en la Compañía Minera Casapalca, ubicada en el Distrito Chicla – Provincia Huarochirí – Región Lima.

En el estudio realizado se analizó el torque eléctrico de dos motores AC al momento de arranque, estos son los encargados de dar movimiento al sistema de izaje de mineral. Estos motores tienen 1050 Kw de potencia, son de marca ABB y trabajan en forma paralela para lograr mover una carga que produce un torque mecánico cuando se liberan los frenos del motor. Del mismo modo también se evaluó el número de choques que tiene el skip con la polea, antes y después de la implementación de la compensación de torque con el controlador lógico programable (PLC).

#### **3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

En este proyecto se desarrolló el tipo de la investigación aplicada, porque se necesita evidenciar la compensación de torque en los motores AC, cuya magnitud y tiempo de duración son controlados desde el PLC durante el momento de arranque.

#### **3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN**

El nivel de investigación es explicativo, ya que en la tesis se requiere explicar el comportamiento de la variable intensidad de corriente para compensar el torque en los motores AC siendo controlado desde el PLC durante el momento de arranque.

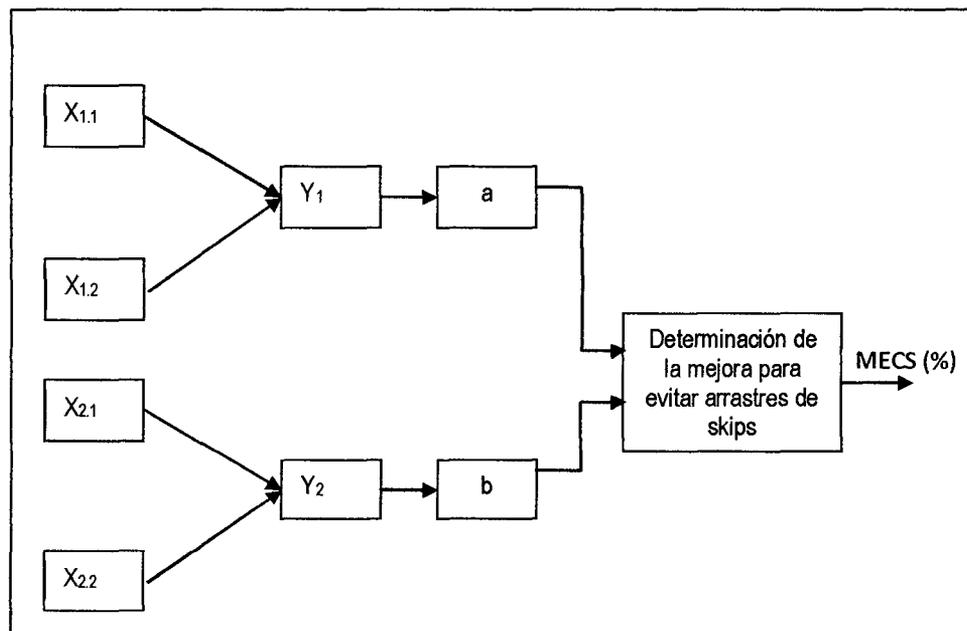
### 3.4. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Siendo una investigación aplicada se usa el método experimental, considerando la influencia de las variables independientes sobre la dependiente.

### 3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Al hacer uso del método experimental, se contó con un grupo de control representado por un sistema de arranque de motores AC con drives y el otro grupo de experimento representado por un arranque hacia los mismos motores AC con compensación de torque controlado por un PLC ControlLogix.

El diseño de la investigación fue dado conforme al siguiente esquema:



**Figura N° 3.1.** Diagrama en bloques del diseño de investigación que permitirá demostrar la compensación de torque a través de la rampa de velocidad.

Donde:

$X_{1.1}$  = Indicador de la variable intensidad de corriente pico.

$X_{1.2}$  = Indicador de la variable tiempo de magnetización.

$Y_1$  = Arrastres de skips sin compensación de torque.

a = Registro de arrastres sin el sistema electrónico compensador de torque.

$X_{2.1}$  = Indicador de la variable independiente intensidad de corriente pico.

X<sub>2.2</sub> = Indicador de la variable independiente tiempo de magnetización.

Y<sub>2</sub> = Arrastres de skips con compensación de torque.

b= Registro de arrastres con el sistema electrónico compensador de torque.

MECS (%) = Mejora para evitar arrastres de skips.

Para demostrar la hipótesis se planteó una relación de causa – efecto analizando los datos registrados en un muestreo aleatorio simple.

### 3.6. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

#### 3.6.1. Población

La población en la que se desarrolló este trabajo está conformada por el universo de datos de niveles de intensidad de corriente pico entregado del variador al motor y de la temperatura del bobinado según el tiempo expuesto a la sobrecorriente haciendo un total de 384 pares de datos. Estos datos serán tomados aleatoriamente desde el 17 de mayo al 23 de mayo, tanto antes como después de la implementación del sistema electrónico compensador de torque.

Por otro lado, para la variable “arrastres de skip” la población estará conformada por 384 pares datos que provendrán del comportamiento de los motores del winche en el arranque antes y después de la implementación del sistema electrónico compensador de torque.

#### 3.6.2. Muestra

Para la validación de la hipótesis de la investigación (tesis) el tamaño de muestra (n) es muy importante teniendo en cuenta que la validez y la calidad de los resultados dependen del tamaño de esta, en nuestra investigación utilizaremos el muestreo aleatorio simple, en donde el tamaño de muestra se calcula mediante la fórmula de Spiegel <sup>8</sup>:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Si se conoce la varianza poblacional de la variable ( $\sigma^2$ ), usamos:

<sup>8</sup>Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. 7 ed. España: Pearson; 2010.

$$n_0 = \frac{Z_{\alpha}^2 \times \sigma^2}{E^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

Si se desconoce la varianza poblacional de la variable ( $\sigma^2$ ), usamos:

$$n_0 = \frac{Z_{\alpha}^2 \times P \times Q}{E^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dónde:

$n$  = Tamaño óptimo de la muestra

$n_0$  = Tamaño de la muestra inicial o aproximada.

$N$  = Tamaño de la población bajo estudio.

$Z_{\alpha}$  = Valor Z correspondiente al nivel de significancia  $\alpha$ .

$E$  = Error de tolerancia de la estimación.

$\sigma^2$  = Varianza poblacional de la variable.

$P$  = Proporción estimada de la variable, si no se conoce entonces  $P = 0.5$  y  $Q = 0.5$

Para el cálculo de nuestra muestra usamos las formulas 3.1 y 3.3, debido a que desconocemos la varianza poblacional, por lo cual:

$N = \infty$  : Población infinita

$P$  : Desconocido entonces,  $P = 0.5$  y  $Q = 0.5$

$E = 0.05$  : Error recomendable 5%.

$(1 - \alpha) = 0.95$  : Para un nivel de confianza del 95%

Evaluamos  $Z_{\alpha/2}$ , de tablas: con  $\alpha/2 = 0.025$  :

$Z_{\alpha/2} = 1.96$

Reemplazando datos en la formula (3.3), tenemos:

$$n_0 = \frac{Z_{\alpha}^2 \times P \times Q}{E^2} = \frac{(1.96)^2 \times 0.5 \times 0.5}{(0.05)^2}$$

$$n_0 = 384.16$$

Luego reemplazando datos en la formula (3.1), tenemos:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} = \frac{384.16}{1 + \frac{384.16}{\infty}}$$

$$n = 384.16 \approx 384$$

De donde el tamaño de muestra óptimo para el presente estudio fue de 384 datos, por cada variable a monitorear requerida para demostrar la hipótesis planteada.

**Tabla N° 3.1.** Valores que toma Z y E.

Los valores Z más utilizados y sus niveles de confianza son:							
<b>Z</b>	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2	2,58
<b>Nivel de confianza</b>	75%	80%	85%	90%	95%	95,5%	99%
<b>Error (E)</b>	25%	20%	15%	10%	5%	4,5%	1%

FUENTE: Walpole, Myers, & Myers, 2010

### 3.6.3. Muestreo

El muestreo fue aleatorio simple, ya que se toma todo el universo de la población que tienen la misma oportunidad de ser seleccionado para integrar las muestras de estudio. Entonces se tomaron los valores de manera aleatoria de modo que el resultado ayudó a determinar el comportamiento adecuado del motor.

## 3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se empleó la técnica de la observación y toma de datos directos utilizando el programa DriveWindow que se encarga de monitorear parámetros como corriente, voltaje, velocidad entregados al motor por parte del drive.

Por otro lado se cuenta con el programa RSLogix 5000 que se encarga de monitorear el proceso de izaje de mineral, como ubicación de skips, velocidad de traslado, amperaje entregado y consumido por el motor, entre otros. Los datos más importantes que se tomaron son la intensidad de corriente, tiempo de magnetización y temperatura del bobinado.

## 3.8. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se tomaron los valores de intensidad de corriente que el variador entrega al motor mediante los programas DriveWindow y RSLogix 5000 para exportarlos a Excel para su tratamiento estadístico. Estos valores también se registraron en una base

de datos la cual nos indicó el número de choques sufridos antes y después de la implementación del sistema electrónico compensador de torque.

### 3.9. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para procesar los datos del trabajo de investigación, se sistematizó por grupos de pares de lecturas y se hizo el análisis estadístico correspondiente usando el "z" estadístico para un intervalo de confianza del 95 %. Se plantearon la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alterna ( $H_a$ ), que deben rechazarse y probarse respectivamente, siendo las hipótesis las siguientes:

$H_0$ : El sistema electrónico basado en PLC no compensa el torque en el motor AC de winche durante el arranque.

$H_a$ : El sistema electrónico basado en PLC compensa el torque en el motor AC de winche durante el arranque.

En la siguiente figura nos muestra la región de aceptación o rechazo de la hipótesis nula.

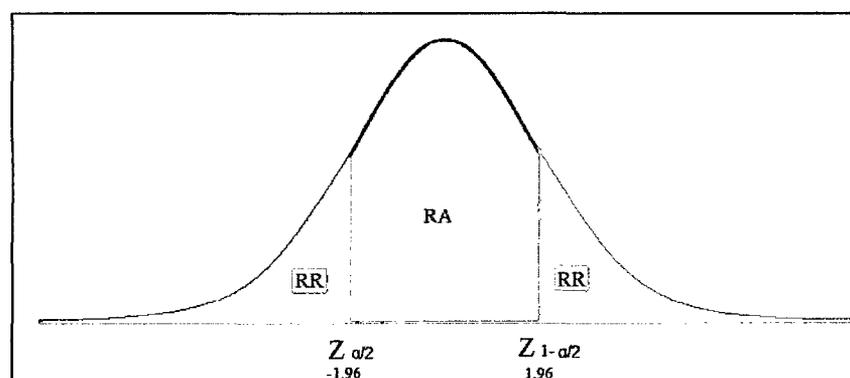


Figura N° 3.2. Curva de probabilidad, región de aceptación y de rechazo.

Los datos recogidos se analizaron con el software Excel para obtener la media y su varianza los que nos permitirán comparar en la prueba de hipótesis, graficando el histograma que nos permitirá observar la simetría de los datos.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS

### 4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1.1. Sistema de control para compensación de torque en motor AC controlado por PLC ControlLogix

El sistema de control para el winche de izaje de la Compañía Minera Casapalca S.A. ha sido renovado instalándose en su totalidad en el mes de febrero del 2014. A continuación, en la figura 4.1, se presenta el diagrama de bloques del funcionamiento de todo el sistema de izaje.

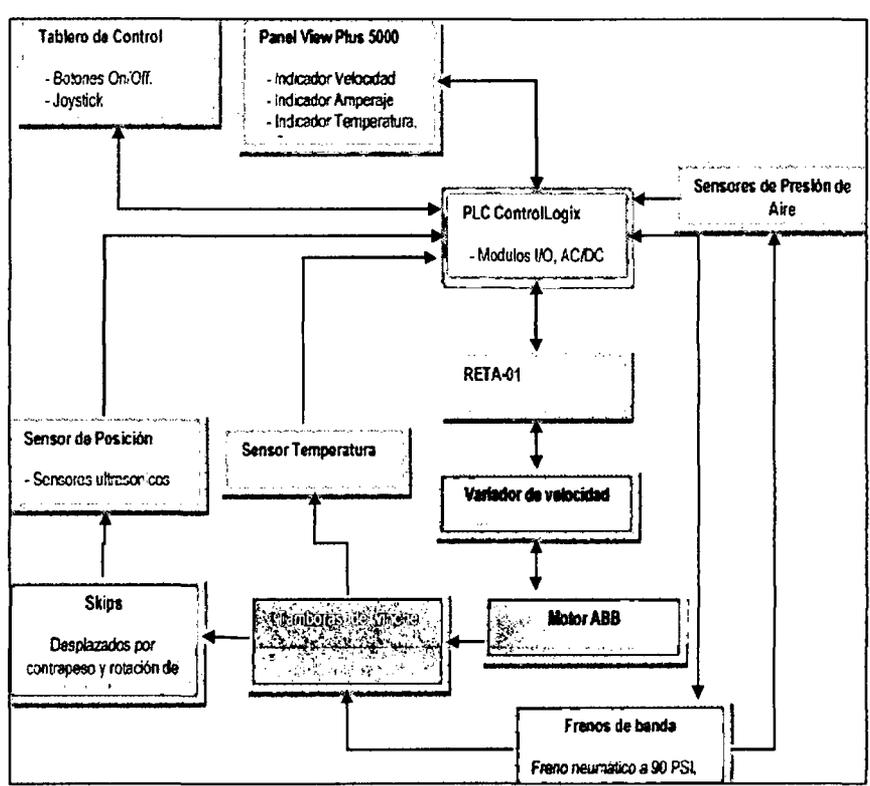


Figura N° 4.1. Diagrama de bloques para el control del sistema compensador de torque

El **tablero de control** está ubicado en la caseta del operador y es de donde se realiza las maniobras para poner en operación al equipo winche, en este tablero encontramos los botones de control como: On/Off, parada de emergencia, reset, joystick, hombre muerto, encloche/desencloche, test de frenos, modo de control manual/semiautomático. Todas estas señales son enviadas hacia el PLC. En este tablero el control de velocidad de los motores se realiza con el manejo del joystick que por cableado lleva la señal de control al módulo RTD del PLC.

El **Panel View** es el HMI o interface hombre – máquina que también se encuentra en la caseta del operador y es a través de este panel que el operador monitorea el funcionamiento del equipo, así por ejemplo se muestran las señales de corriente de consumo del motor, velocidad de recorrido de los skips, temperatura de las chumaceras y del bobinado del motor, presión de aire, indicadores de funcionamiento del equipo, El panel View también nos sirve como indicador de fallas, saliendo mensajes de las fallas que se tienen que levantar para que el equipo pueda operar normalmente.

El **PLC ControlLogix** es el encargado de procesar todas las señales de entrada y mediante un programa controlar la maniobrabilidad del equipo winche, así se puede controlar: liberación de frenos, arranque, velocidad, sentido de giro de motores, rampa de aceleración y deceleración. También se encarga de proteger al equipo winche cuando se presenten situaciones riesgosas con la activación de condiciones de trabajo o permisivos programados en el PLC, cabe destacar que para que el PLC logre el control pleno de los motores lo realiza a través del variador o drive. Gracias a que el PLC es de tipo modular se controlan señales analógicas y digitales tanto en entrada como en salida.

La tarjeta **RETA-01** es la interface que comunica el PLC con el variador a través del protocolo de comunicación CIP o Protocolo Industrial de

Comunicación. Ésta tarjeta se comunica físicamente con el PLC mediante la red Ethernet/IP y permite reconocer al variador de velocidad como si fuera un módulo en el PLC. De esta manera el PLC tiene control y supervisión sobre el funcionamiento del variador.

El Variador de velocidad o drive es el controlador del motor y la interface que existe entre la parte de control y fuerza del sistema. Logra el control de velocidad de las rpm del motor actuando sobre la frecuencia y voltaje de alimentación del motor. Este convertidor de frecuencia es alimentado con 690VAC de donde toma la alimentación a la parte de control y de fuerza. Con respecto a la parte de fuerza rectifica el voltaje a Corriente DC y luego invierte esta señal para generar pulsos de manera alterna que son aplicadas al bobinado del motor. También se encarga de proteger al motor de sobreesfuerzos y daños en el bobinado, monitoreando el comportamiento del mismo durante todo su funcionamiento.

El motor ABB es un motor AC de 1050Kw encargado de hacer rotar las tamboras del winche mediante un sistema mecánico (reductor de velocidad). El motor por su elevada potencia tiene instalados dos ventiladores encargados de refrigerar el bobinado del motor cuando entre en pleno funcionamiento.

Las tamboras de winche son el soporte mecánico circular donde se enrollan y desenrollan los cables que sujetan los skips, logrando de esta manera el movimiento vertical de los skips por todo el pique, los cables están encarretados de tal manera que cuando las tamboras giran uno se envuelve y el otro se desenvuelve. Tienen un diámetro de 2 metros y un sistema de encloche/desencloche que ayuda a colocar los skips en cualquier posición, así por ejemplo cuando se incremente la profundidad del pique y se tenga que trasladar mineral desde más profundidad.

Los **skips** son contenedores de acero en los que se llena el mineral para ser trasladados del subsuelo hacia superficie. El material del que están fabricados es acero T21 que soporta el impacto de las rocas y el desgaste que generan las mismas en el momento de la descarga. Tienen un peso bruto de 4,7 Ton y tienen la capacidad de trasladar una carga de 9.5Ton, haciendo un peso aproximado de 14.2 Ton cuando traslada el material a plena carga.

Los **frenos de banda** son accionados mecánicamente por una pesa de 500Kg. y se liberan con la activación de cilindros neumáticos a una presión de 90 PSI. Los frenos que sujetan las bandas de las tamboras son de asbesto que permite una sujeción rápida y efectiva a las tamboras cuando en PLC encuentre una situación riesgosa durante la operación del equipo. Con situación riesgosa nos referimos a por ejemplo: sobrevelocidad, situación de hombre seguro, límite de recorrido, baja presión de aire, entre otros.

Los **sensores de temperatura** se encargan de informar la temperatura de las chumaceras que soportan las tamboras y el reductor de velocidad al PLC. Estos sensores son PT100 y llevan la señal hacia acondicionadores que luego se encargan de enviar la señal al PLC.

Los **sensores de posición** han sido instalados para informar al PLC que los skips están pasando por puntos determinados en todo su recorrido. Así por ejemplo los sensores de límite de posición están instalados en los extremos de recorrido de los skips: uno más arriba de la zona volteo y otro debajo de la zona carguío. Del mismo modo están instalados sensores ultrasónicos en 3 puntos por cada compartimiento del pique, antes de llegar a la zona de volteo: a 120m, a 50m y a 0.50 m, estos sensores nos ayudan a realizar la rampa de deceleración cuando se iza mineral en modo semiautomático.

Los sensores de presión de aire informan la presión de aire con la que se cuenta en las tuberías neumáticas que activan la liberación de los frenos de banda y por ende permiten que las tamboras puedan girar libremente.

Como ya ha sido explicado el problema reside en que cuando se liberan los frenos de las tamboras existen eventos donde el skip que se encuentra en posición de carga (parte inferior) arrastra al skip en posición descarga (parte superior) corriendo el riesgo de que éste se estrelle con las poleas.

Por este motivo se implementa en el sistema el control de frenado de magnetización para compensar el momento de arranque en el motor antes de que los frenos se liberen, este frenado es implementado analizando las cantidades de corriente y tiempo de magnetización aplicados al motor, así se garantiza el arranque seguro del equipo al momento de liberar los frenos y el consumo adecuado de energía eléctrica.

#### **4.1.1.1. Motor ABB de 1050 Kw**

La Compañía Minera Casapalca ha implementado dos motores trifásicos alternos marca ABB para el winche de izaje del Pique 650. El ciclo de trabajo de estos motores inicia con el posicionamiento de los skips, uno en la zona de carguío y el otro en la zona volteo. El arranque de los motores se da cuando se carga de mineral el skip en zona carguío (Nv. 10), el recorrido de este skip termina al llegar a la zona se volteo donde descarga todo el mineral al mismo tiempo que se comienza a cargar el otro skip (ubicado ahora en la zona de carguío), luego ambos skips cambiarán de posición terminando el ciclo de trabajo para la

extracción de mineral. Este ciclo tiene 4 tiempos: carga, traslado, descarga, vacío.

Tabla N° 4.1. Ciclo de trabajo de los motores AC

	Skip 1	Skip2	Sentido de giro del motor	Duración
01 ciclo	Carga	Descarga	Detenido	20 s
	Traslado	Vacío	Horario	2 min 14s
	Descarga	Carga	Detenido	20 s
	Vacío	Traslado	Anti horario	2 min 14s
02 ciclo	.	.		
	.	.		
	.	.		

Fuente: Análisis por parte del autor.

#### 4.1.1.2. Programación en el variador de velocidad ACS-800

La programación del variador de velocidad se logra a través de una Computadora mediante el software DriveWindow, el cual se conecta al tablero de control mediante fibra óptica.

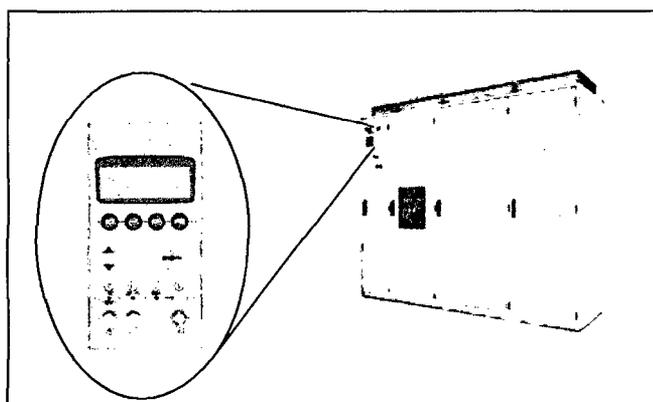


Figura N° 4.2. Panel de control del convertidor de frecuencia.

Los parámetros nominales del motor ingresados en la base de datos del variador son registrados en el grupo 99 DATOS DE PARTIDA. Los datos registrados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.2. Datos de placa del motor y datos de partida a ingresar en el drive en el grupo 99.

Parámetro	Placa del motor	Dato ingresado al variador	Ítem
Voltaje nominal	690 V	690 V	99.05
Potencia nominal	1050 Kw	1050 Kw	99.09
*Corriente nominal	1181 A	1141 A	99.06
*Frecuencia nominal	56.9 Hz	60 Hz	99.07
*Velocidad nominal	850.1 rpm	896 rpm	99.08
*Altitud	4500 msnm	4800 msnm	

Fuente: Creado por el tesista.

Los parámetros ingresados a la base del drive son diferentes a los de la placa del motor debido a que se compensa los m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) para los que fue fabricado el motor. Los m.s.n.m. de trabajo real del motor es de 4800 m.s.n.m. y no de 4500 como indica en la placa.

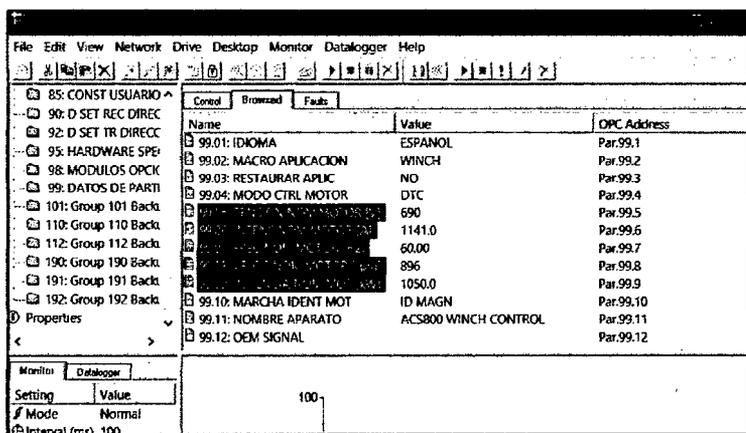


Figura N° 4.3. Datos ingresados al drive mediante el programa DriveWindow

Después de haber ingresado los datos del motor al variador se iniciará el proceso denominado IDENTIFICACIÓN DE MOTOR, mediante magnetización para que el variador de velocidad genere una función única de control sobre el motor que ya se encuentra

conectado a sus terminales. Este proceso se realiza solo la primera vez que se da pase al motor.

También es necesario identificar cada convertidor de frecuencia, esto se logra dándole a cada variador de velocidad un ID o número de identificación individual. Para este caso identificaremos a los variadores de la siguiente manera con sus respectivos motores a comandar:

**Tabla N° 4.3.** Denominación de cada drive.

ID	Variador de velocidad	Motor
ID NUMBER 1	Variador Maestro	Motor Maestro
ID NUMBER 2	Variador Esclavo	Motor Esclavo

Fuente: Creado por el tesista.

**Nota:** La denominación “Maestro” o “Esclavo” obedece a la jerarquía que le da el PLC a ambos variadores. El “Esclavo” sigue en comportamiento al “Maestro”.

#### 4.1.1.3. Control del drive vía Ethernet.

El variador de velocidad tiene la opción de ser comandado de 2 maneras:

- Local: Esto se logra con el control directo al variador desde su propio panel de control o desde una PC que tenga instalado el Drive Windows que es un software diseñado exclusivo para el monitoreo/control del variador de velocidad.
- Remoto: Este control se logra a través de una entrada de señal digital o analógica al variador, desde una conexión maestro – esclavos o con la ayuda de un adaptador Fieldbus para el módulo de comunicación.

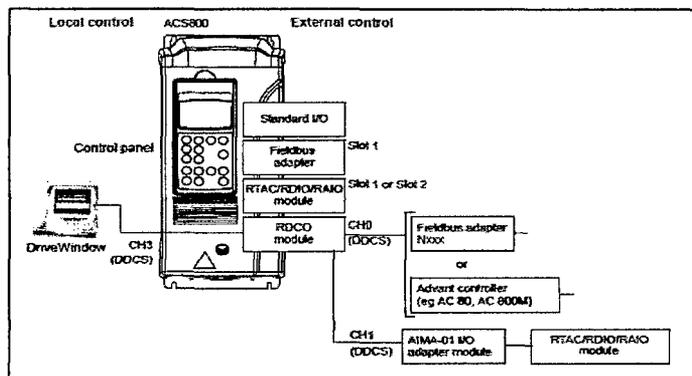


Figura N° 4.4. Formas de control del convertidor de velocidad

En este caso usaremos una comunicación remota de tipo FIELDBUS para una conexión Ethernet con la instalación de la tarjeta RETA-01.

#### a. Instalación física de la tarjeta RETA-01

Se coloca la tarjeta RETA-01 en el socket 1 o SLOT1 del tablero del control del drive en cuyo lugar se encuentra la tarjeta de comunicación local-remota. El módulo RETA-01 se conecta a la red Ethernet activa mediante un cable UTP.

Lo siguiente que se tiene que hacer es encender el drive solo en la parte de control. Si el cable Ethernet se encuentra conectado a una network activa, el led "LINK /ACTIVITY" del módulo RETA-01 debería estar parpadeando de color verde. Si no fuese así se verifica la señal Ethernet o el cable de conexionado.

#### b. Configuración en el drive

Para dar una dirección IP al drive se realiza una configuración física en el Dip Switch 01 del módulo RETA-01. La dirección IP que viene por defecto en el módulo es 192.168.0. xxx siendo programable en último octeto de la dirección IP.

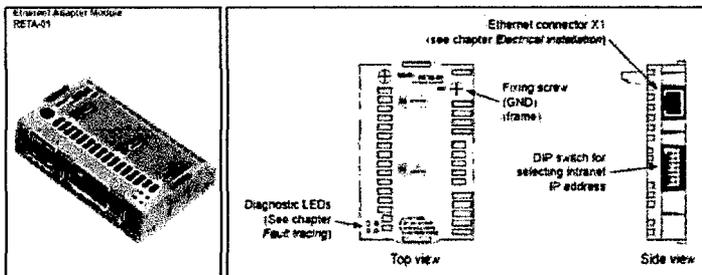


Figura N° 4.5. Configuración de IP en el dip switch de la tarjeta RETA-01 para identificación de drive.

Para la configuración de cada drive se configurará el dip switch de la siguiente manera:

Tabla N° 4.4. Selección de IP con DS1 de la tarjeta RETA-01

Dirección IP de variadores	Posición en S1 de RETA-01
Drive maestro: 192.168.0.40	OFF ●●● ● ●●● ON ●●
Drive esclavo: 192.168.0.41	OFF ●●● ● ●● ON ●●●

Fuente: Creada por el tesista.

Luego de estar seguros de que el drive se encuentra ya conectado a la red activa Ethernet, se setea el parámetro 98.02 a FIELBUS. Si la configuración es correcta el grupo de parámetros 51 debería aparecer en la lista de parámetros del drive mostrando el estado de la tarjeta RETA-01 y sus parámetros de configuración.

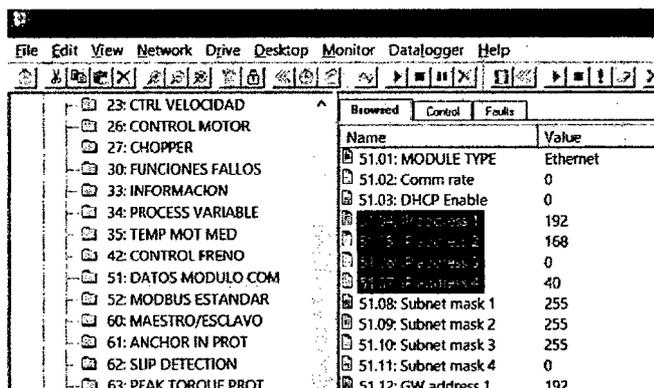


Figura N° 4.6. El grupo 51 identifica al drive, los parámetros 51.04 - 51.07 identifica la dirección IP del drive.

Para controlar el drive con señales analógicas traídas desde el PLC al módulo Ethernet se configura el parámetro 98.07 en GENERICO. De este modo se tendrá control sobre la velocidad de los motores con la maniobrabilidad del Joystick instalado en la cabina del operador.

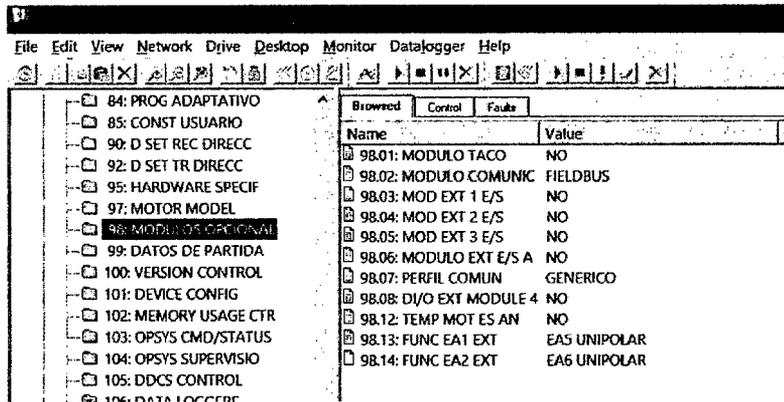


Figura N° 4.7. Grupo de parámetros 98 para activar la identificación del módulo RETA-01

Tabla N° 4.5. Las IP de los variadores de velocidad son:

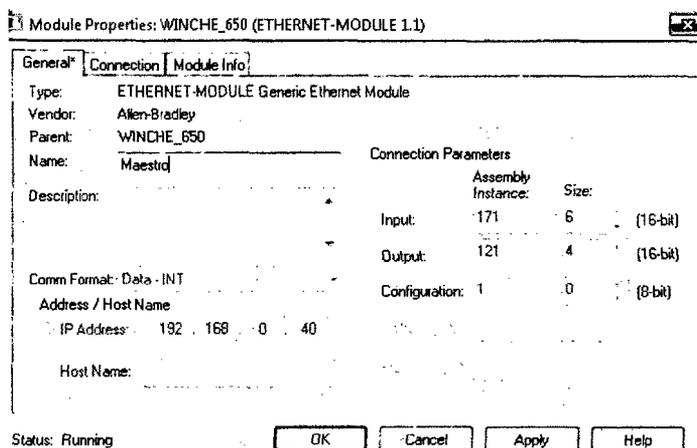
Drive	Dirección IP
Maestro	192.168.0.40
Esclavo	192.168.0.41

Fuente: Diseño del autor.

**c. Configuración en el PLC para identificar a cada drive.**

En el programa principal del ControlLogix se tiene que identificar cada drive como un módulo de control I/O, esto se realiza con el programa RSLogix5000.

Aquí se identifica cada tarjeta RETA-01 como si fuese un módulo más del ControlLogix. De este modo cada módulo RETA-01 funciona como un módulo de entrada/salida analógica/digital que se encuentra bajo el control del PLC.



**Figura N° 4.8.** Configuración del módulo de variador maestro.

Cada tarjeta RETA-01 está reconocida como una sub carpeta de las conexiones Ethernet, que identifica cada IP tanto del PLC y de los variadores. De este modo la configuración para la tarjeta es como sigue:

- Seleccionar el tipo formato con el que se comunicarán los datos entre PLC y tarjeta RETA-01.
- Activar la dirección IP de cada tarjeta.
- Activar el rango de señales entrada a la tarjeta RETA-01.
- Activar el rango de señales salida a la tarjeta RETA-01.
- Los parámetros que se configuran en el grupo 51 del drive se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 4.6.** Parámetros del grupo 51 del drive.

51.01 MODULE TYPE	ETHERNET
51.02 COMM RATE	0 (Auto-negotiation)
51.03 DHCP	1 (Enabled)
51.04 - 51.07 IP ADDRESS	10.0.0.6
51.08 - 51.11 SUBNET MASK	255.255.255.0
51.12 - 51.15 GW ADDRESS	0.0.0.0
51.16 PROTOCOL	1 (AC/DC profile)

Fuente: Manual de la tarjeta RETA-01

- Cuando se logra la configuración correcta del módulo tanto en identificación de IP y calibración de traslado de

señal se crea automáticamente las etiquetas de control del drive dentro del programa del PLC.

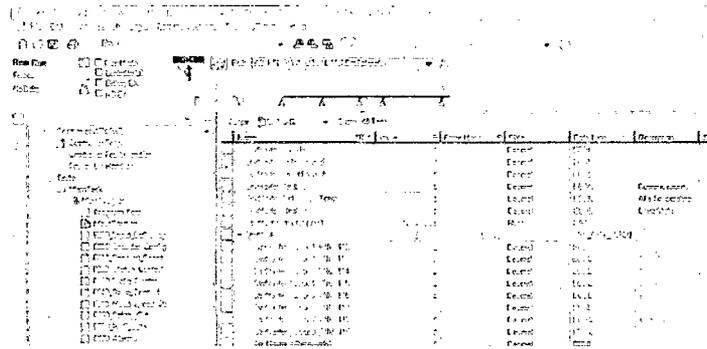


Figura N° 4.9. Drive conectado identificando las señales de control a través del módulo RETA-01.

- Cabe resaltar que se controlará los drives identificados como MAESTRO y ESCLAVO, esto se logrará con la creación de una sub rutinas de control en el programa del PLC.

#### d. Uso de Joystick para controlar funcionamiento de drives.

Una vez realizadas las identificaciones de cada drive es necesario determinar el tipo de control que se tendrá para maniobrar los motores desde la cabina del operador con un joystick.

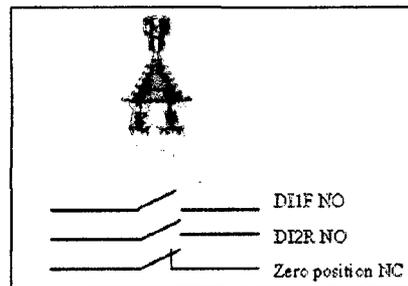


Figura N° 4.10. El sentido de giro del motor se dará de acuerdo a la activación de los switches DI1F y DI2R.

Para el control de sentido de giro se usarán las señales digitales del joystick mientras que su señal analógica se encargará de la *referencia de velocidad*. Por esta razón se debe de calibrar el parámetro 11.02 del drive es responsable de identificar si la señal de control es local o remota, así el parámetro *selección de referencia 11.02* queda con EXT2 que activa la referencia remota.

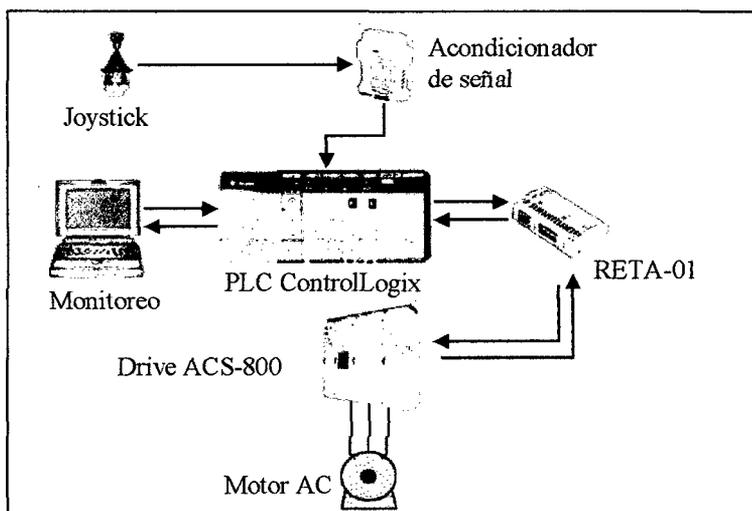


Figura N° 4.11. Diagrama de flujo de control del Joystick hacia los motores.

Como se muestra en la figura la señal analógica enviada por el joystick llega a un acondicionador MCR-C-UI-UI (-450)-DCI (-NC) que se encarga de transformar la señal de amperaje a voltaje para entregar la señal al PLC, este acondicionador ofrece una alta gama de conversiones. Para el caso nuestro se calibra el acondicionador para tener en la entrada señal de voltaje entre 4mA....20mA que viene del control del joystick y una señal de salida de 0v....+10v que va al módulo AN INPUT (entradas analógicas) del PLC. Además el joystick cuenta con dos switches cuyas señales llegan a un módulo DC INPUT (entrada digital) del PLC que nos ayudará a controlar el sentido de giro de los motores, así DI1F se activará cuando

la manivela se encuentre hacia arriba para el giro en sentido horario del motor y DI2R se activará cuando la manivela se encuentre hacia abajo para un sentido anti horario del motor. Las señales de los switches DI1F y DI2R estarán conectadas a un módulo de entrada digital del PLC.

El módulo AN INPUT está diseñado para sensar las señales analógicas que ingresan al PLC, de esta manera se toma la señal que viene desde el joystick para que sea la referencia de control del proceso de izaje: encendido, apagado, velocidad y torque del motor, liberación-cierre de frenos. Luego de que el PLC procesa esta señal de control, comanda a los drives a través del módulo RETA-01 usando el protocolo CIP, la instancia 121 del módulo RETA-01 es la encargada de procesar la información para traducir los datos recibidos del PLC y entregarlos a los parámetros respectivos del drive. Luego de que el módulo RETA-01 haya entregado la información de comando al drive éste actúa sobre el motor de acuerdo a los datos recibidos para un funcionamiento adecuado. En ese momento el drive entrega las señales de feedback al módulo RETA-01, para que luego ésta las entregue al PLC, usando la instancia 171.

**Tabla N°4.7.** Instancia 121 del módulo RETA-01: Entrega señales al drive.

Instance 121								
Byte	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0		NetRef	NetCtrl			Fault reset	Run reverse	Run forward
1								
2	Speed reference (Low byte)							
3	Speed reference (High byte)							
4	Output I/O 1 (Low Byte)							
5	Output I/O 1 (High Byte)							
6	Output I/O 2 (Low Byte)							
7	Output I/O 2 (High Byte)							
...								
67	Output I/O 32 (Low Byte)							
68	Output I/O 32 (High Byte)							

Fuente: Manual de la tarjeta RETA-01

**Tabla N° 4.8.** Instancia 171 del módulo RETA-01: Entrega señales al PLC

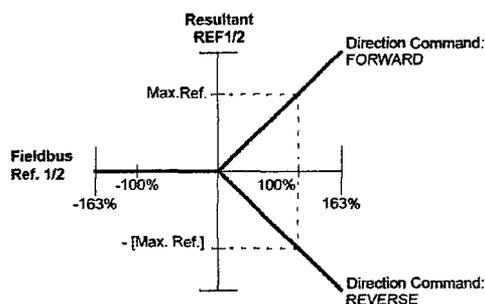
Instance 171								
Byte	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0	At reference	Ref From Net	Ctrl From Net	Ready	Running reverse	Running forward	Warning	Faulted
1	Drive state							
2	Speed actual value (Low byte)							
3	Speed actual value (High byte)							
4	Input I/O 1 (Low Byte)							
5	Input I/O 1 (High Byte)							
6	Input I/O 2 (Low Byte)							
7	Input I/O 2 (High Byte)							
...								
67	Input I/O 32 (Low Byte)							
68	Input I/O 32 (High Byte)							

Fuente: Manual de la tarjeta RETA-01

Las señales digitales desde el PLC llegan de la misma manera que las analógicas al drive. Es necesario calibrar los parámetros del drive para tener un control desde el PLC, estos parámetros son dirección de giro y rango de referencia.

**Dirección de giro 10.03:** Se configura como PETICIÓN, así el sentido de giro del motor dependerá de la posición en la que se encuentra ubicada la manivela del joystick.

Par. 10.03  
DIRECTION =  
REQUEST



**Figura N° 4.12.** Diagrama de funcionamiento del parámetro 10.03

**Rango de referencia externa 11.06:** Si se configura a REF COMUN habilitará los parámetros 11.07 Y 11.08 que son el mínimo y máximo de la referencia externa a ser medidos y tomados como control, además de tener como referencia

activa a EA2 (entrada analógica 2 del grupo 13 del drive) que es la referencia del joystick.

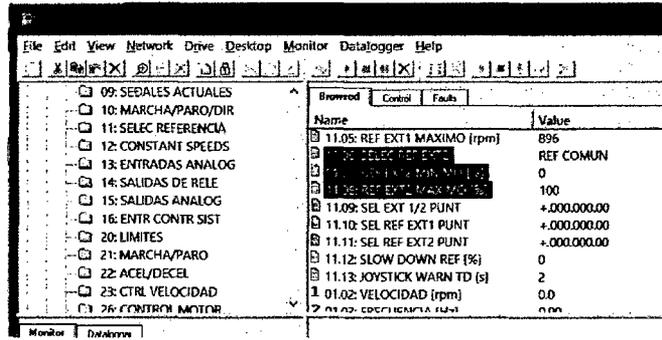


Figura N° 4.13. Selección de referencia del joystick en el drive

#### 4.1.1.4. Programación de subrutinas para control de drives y tiempo de magnetización en el motor.

Hasta el momento se ha logrado configurar el control de los drive vía Ethernet desde la cabina del operador, ahora es necesario definir los límites de torque, la corriente de magnetización y el tiempo que durará.

##### a. Límites del Torque

Para lograr controlar plenamente el torque del motor es necesario conocer su torque nominal. Esto se logra calculado los datos nominales del motor en la siguiente fórmula:

$$T_N = \frac{9550 \cdot P_N}{n_N}$$

Donde:

T<sub>N</sub>: es el torque nominal del motor en Newton metro (Nm)

P<sub>N</sub>: es la potencia nominal del motor en Kw.

n<sub>N</sub>: es la velocidad nominal del motor en rpm.

Usando esta fórmula y de acuerdo a los datos nominales del motor el torque que se obtiene es:

$$P_N = 1050 \text{ Kw.}$$

$$n_N = 850.1 \text{ rpm.}$$

El torque nominal queda con

$$T_N = \frac{9550 \cdot 1050}{850.1}$$

$$T_N = 11796 \text{ Nm} \approx 11800 \text{ Nm.}$$

La señal que es trasladada hacia el módulo RETA-01 del drive está dada entre 0 y 20 mA para poder tener un mejor rango de control. El rango de medida que tendrá la señal de referencia se aplicará el rango de torque entre 0 y 11800 Nm. Es necesario calcular el factor de escala para aplicar adecuadamente la señal de referencia del joystick.

La carga de la señal necesita ser escalada de acuerdo al torque nominal en el parámetro 13.08 según la siguiente fórmula:

$$x = \frac{100 \cdot T_{load \ cell \ max}}{T_N}$$

Donde:

x : la escala constante en el parámetro 13.08 del drive para control externo con el módulo RETA-01.

T<sub>load cell max</sub> : máxima carga de señal de control en el drive.

T<sub>N</sub> : Torque nominal del motor.

Entonces x queda así:

$$x = \frac{100.11800}{11796} = 100\%$$

De este modo el parámetro 13.08 encargado de recibir la señal analógica del joystick queda seteado al 100% para un pleno nivel de torque cuando se maniobre el joystick.

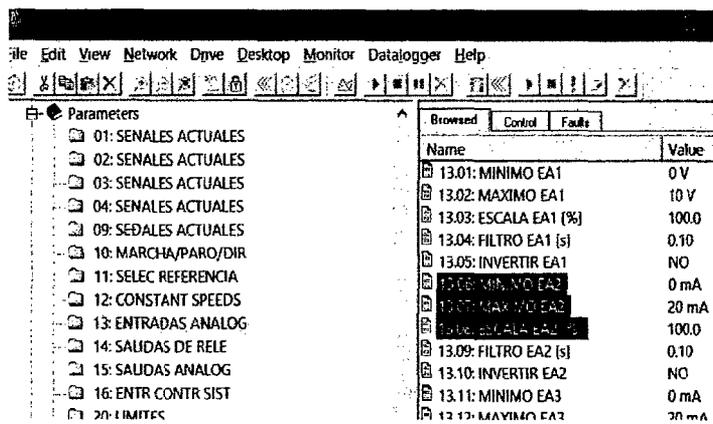


Figura N° 4.14. Parámetro 13.08 escala de control de torque en DriveWindow.

Los parámetros de control de señal de referencia quedan como sigue: Mínima referencia EA2 13.06: 0 mA y Máxima referencia EA2 13.07: 20 mA con una escala del 100% en el parámetros Escala de EA2 13.08: 100%.

**b. Premagnetización y magnetización en el motor AC.**

Cuando se activa el proceso de magnetización por Corriente Continua, el drive magnetiza de forma automática el motor antes del arranque. El tiempo de premagnetización está predefinido en el drive por 300 ms de duración en el parámetro Tiempo de premagnetización constante 20.01, sin embargo esto no garantiza el control pleno sobre el torque necesario para evitar un contragiro en el eje de motor debido a la elevada carga que tiene que mover.

La premagnetización se da con el fin de tener un campo inicial magnético en el bobinado del motor para que luego se pueda aumentar la corriente en el proceso de magnetización y por ende aumentar el torque inicial al momento de arranque.

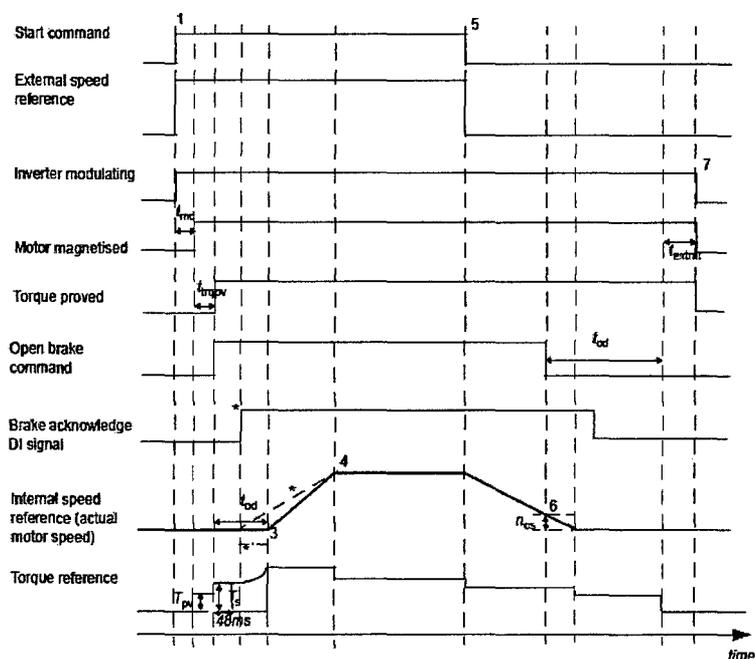


Figura N° 4.15. Secuencia de funcionamiento del drive en magnetización por CC.

Ya que la premagnetización es lineal éste puede seguir aumentando si no se liberan los frenos neumáticos en el momento adecuado, para esto se calibran los límites de corriente y se determina el tiempo adecuado para que los frenos se liberen. El proceso de magnetización dado en el drive consta de diferentes etapas como son:

1. Comando inicio.
2. Referencia de velocidad externa (por el joystick)
3. Modulación del inversor
4. Motor premagnetizado.
5. Magnetización del motor.

6. Liberación de frenos.
7. Giro del motor para romper la inercia.

c. Cálculo de la corriente de magnetización en el variador:

Para el cálculo de la corriente de magnetización se deben realizar cálculos sobre la carga real que tendrá que elevar el winche desde casi 500 metros de profundidad. Sabemos que los skips están diseñados para trasladar 9.5 Ton de carga. Entonces se realiza el siguiente cálculo real sobre la carga a ser trasladada:

Se determina el peso total a elevar, es decir el peso que tiene el skip, el cable de acero y la carga de mineral:

- Carga mineral= 9.5 Ton=9500Kg  $\approx$ 95000N.
- Peso del cable (5.8Kg/m) =5.8 x500m =2900Kg  $\approx$ 29000N.
- Peso del skip=4.7 Ton, este peso será contrarrestado con el peso del otro skip, por lo que no se tomará en cuenta para los cálculos.

Así tenemos un total de peso a ser elevado de

$P = 95000 + 29000 = 124000$  N. Peso es igual a fuerza.

$C_m = F \cdot d$

Donde:

F: fuerza de la carga.

d: radio de la tambora

El radio de la tambora es 1.25m, por lo que el conjugado de carga queda así:

$C_m = 124000 \times 1.25m = 155000Nm$ .

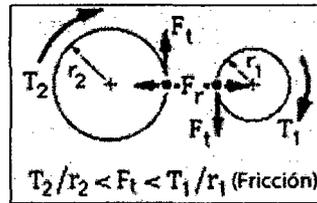


Figura N° 4.16. Relación de transmisión de fuerzas

Así  $\frac{T_2}{r_2} = \frac{T_1}{r_1}$ ; el torque aplicado sobre el eje del motor es:

$$T_1 = \frac{T_2 \times r_1}{r_2}$$

Donde:

$T_1$ : Torque de en el engranaje de tambora.

$T_2$ : Torque de la carga= 155000Nm

$r_1$ : radio del engranaje del motor= 0.15m

$r_2$ : radio del engranaje de la tambora= 1.25m

Entonces:

$$T_1 = \frac{155000 \times 0.15}{1.25} = 18600 \text{ Nm}$$

De este cálculo el torque que se aplica al engranaje en un solo punto es 18600Nm, ya que en el sistema de engranajes mecánico se ha instalado dos motores el torque aplicado a la tambora se divide en 2. Entonces cada motor aplica un torque de 9300Nm a la tambora para elevar la carga de manera plena.

La corriente de magnetización en CC entregada al motor hace que el bobinado de este se comporte como un imán cilíndrico. Para el cálculo de la corriente se aplica la siguiente ecuación indicada en el manual del variador:

$$I_{mag} = M_{carga}/5.115$$

Donde:

$I_{mag}$  = Corriente de magnetización.

$M_{carga}$  = conjugado de carga.

5.115 = constante de magnetización del motor (bobinado).

Sabiendo que  $M_{carga} = 9300 \text{ Nm}$ , el valor de la corriente de magnetización máxima está dado entre:

$$I_{mag} = \frac{9300}{5.11} = 1818.18 \approx 1818 \text{ A como mínimo}$$

Debido a que 1802 A es la corriente magnética ideal aplicada al motor, se le da un 10% más para cuando se presente el exceso de carga en los skips. Así debido a este cálculo se la corriente de magnetización programada en el variador será:

$$I_{mag \text{ variador}} = I_{mag} + 10\% I_{mag} = 1818 + 181 = 1999 \text{ A} \approx 2000 \text{ A}$$

Es decir se calibra el parámetro límite de corriente 20.03 a 2000 A en corriente continua, terminando aquí el cálculo de corriente de magnetización.

El proceso de magnetización en el motor AC se realiza con la calibración de algunos parámetros en el drive, de esta manera la corriente necesaria para la magnetización se entregará al motor según los cálculos realizados.

- Velocidad mínima 20.01 seteado a -896 rpm, es la máxima rpm obtenida en sentido anti horario.
- Velocidad máxima 20.02 seteado a 896 rpm, es la máxima rpm obtenida en sentido horario.
- Par máximo 20.04 seteado a 100%.

- **Función marcha parámetro 21.01** Selecciona el tipo de inicio del motor. Para este caso se configura inicio magnetizado del motor MAGCC CNST.
- **Tiempo de premagnetización constante 21.02** Dado en ms y predeterminado con 300ms de duración en la premagnetización.
- **Torque máximo en izaje 66.17:** Dado en porcentaje y calibrado a 250% cuando el motor está funcionando.

Para garantizar una magnetización plena del bobinado del motor se aumenta el tiempo de magnetización, esto se logra aumentando el tiempo de frenado en las bandas de las tambores (frenos neumáticos) en la programación del PLC.

La programación del PLC se realiza a través del programa RSLogix5000. Aquí se identifican los módulos que tiene instalado el PLC en su chasis, estos módulos son:

- Entradas DC :1756-IB16
- Entradas ENCODER: MODULO AMCI\_\_7264\_02
- Salidas DC :1756-OB16E
- Salidas Relay :1756-OW16I
- Entradas RTD :1756-IR6I
- Módulo Ethernet :1756-ENBT/A
- Módulo drive : RETA-01(Módulo instalado virtualmente en el chasis del PLC, identificado con Ethernet).
- Entradas analógicas:1756-IF16
- Salidas analógicas :1756-OF6VI

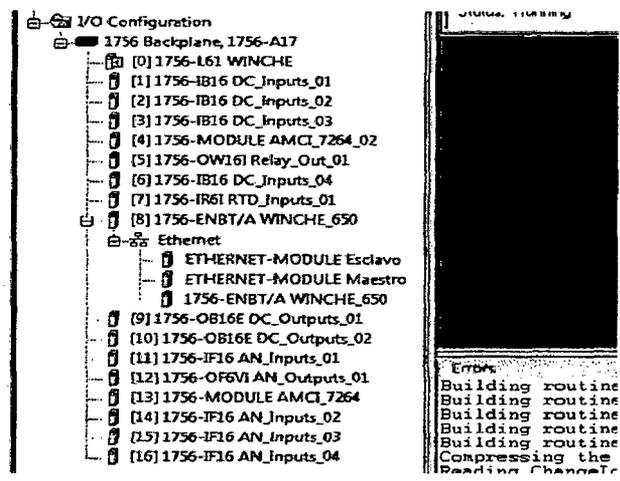


Figura N° 4.17. Módulos instalados en el chasis del ControlLogix identificados con el programa RSLogix5000.

Cuando el PLC ha identificado todos los módulos que están bajo su control se puede realizar las subrutinas de programación deseadas. Para tener control sobre los variadores, el torque y liberación de frenos se crean 2 subrutinas: una de control sobre el drive maestro y la otra sobre el control del drive esclavo, además de modificar la subrutina brake\_control donde se aumentará una línea más de programación que controlará el tiempo de magnetización.

El PLC envía señales digitales y la señal de referencia hacia los drives, del mismo modo los drives enviarán datos de feedback al PLC como por ejemplo feedback de velocidad, corriente, torque, etc. que servirán para el monitoreo del equipo. (Ver estructura de mando en la programación del PLC en Anexos)

Para generar el tiempo de magnetización se tiene que tener en cuenta las señales de feedback de corriente que vienen de los drive maestro y esclavo controlando el desfase que se produciría por un mal funcionamiento en alguno de ellos. El rango de.

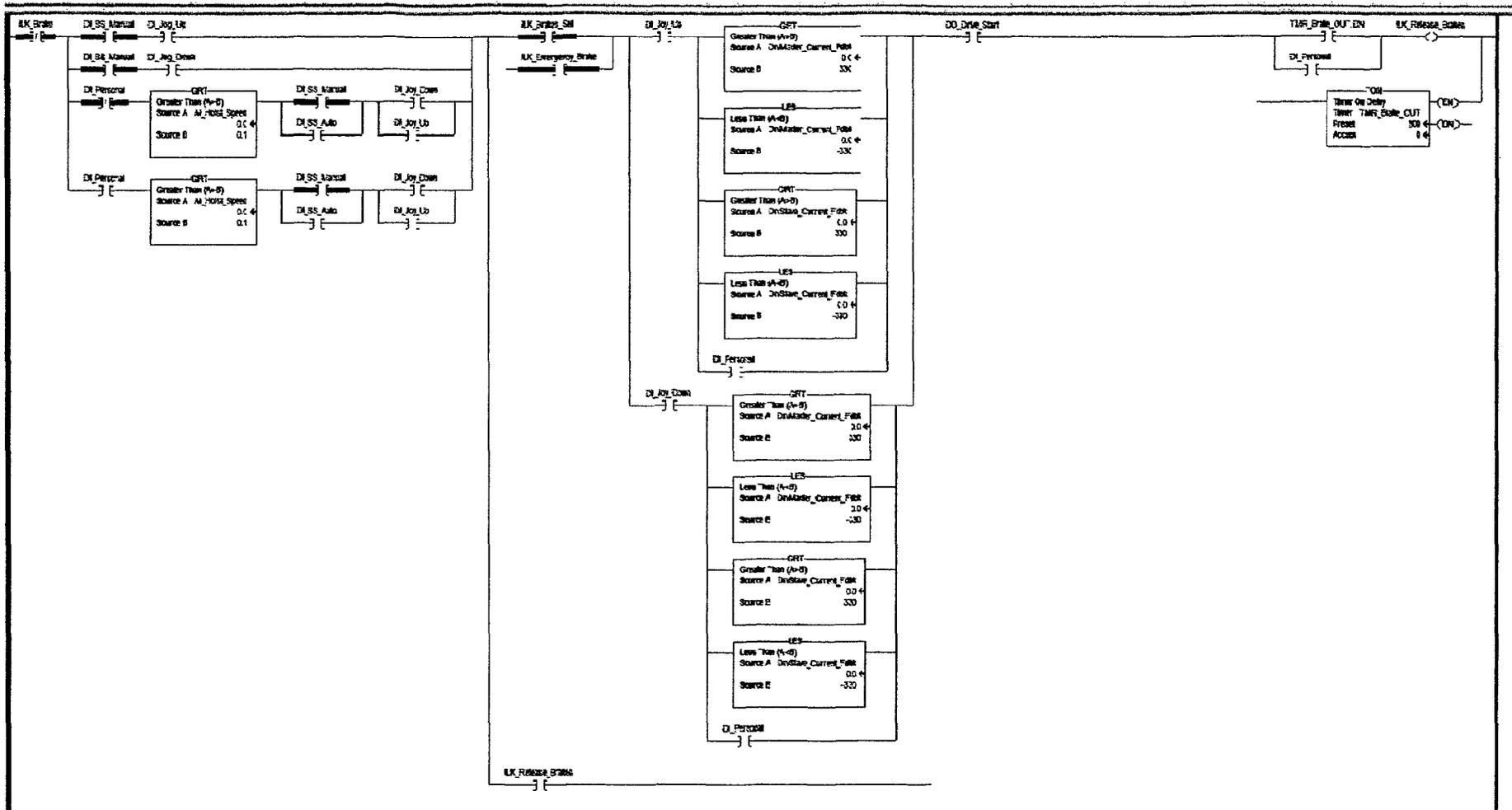


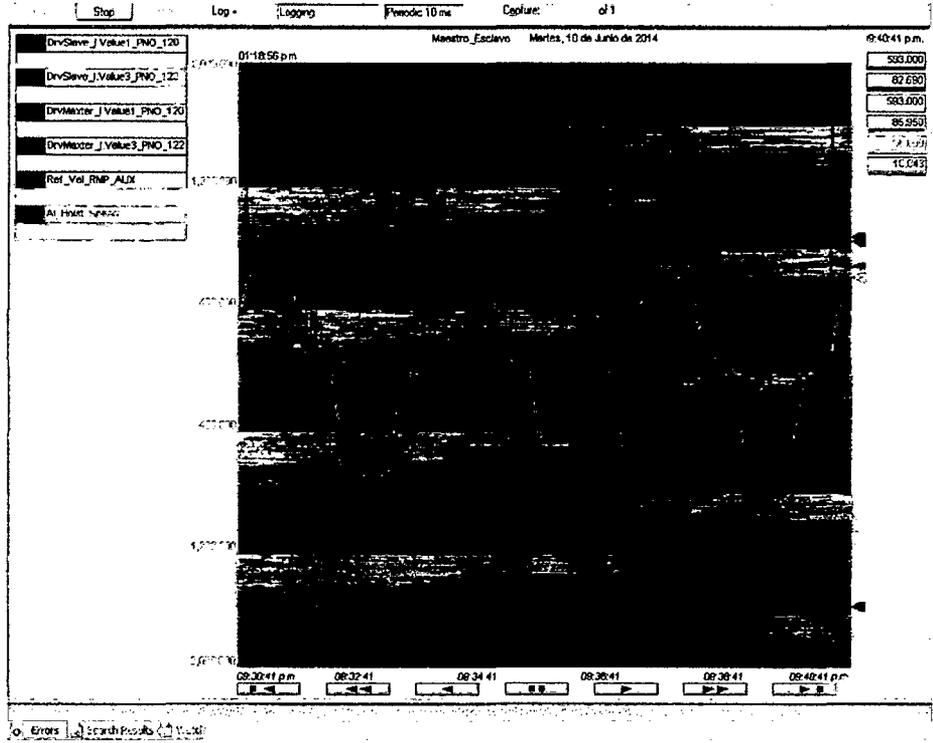
Figura N° 4.18. Net creada en la rutina brake\_control para el tiempo de magnetización.

desfase máximo permitido es de 330 A. El tiempo de magnetización será calibrado según el comportamiento del equipo cuando se comienza con el izaje de carga, éste debe ser suficientemente amplio para garantizar una corriente de magnetización que genere la compensación de torque pero no tal elevada para evitar el sobre calentamiento en el bobinado del motor. El tiempo de magnetización es realizado para ambos sentidos de giro de los motores.

#### **4.1.1.5. Monitoreo del proceso de izaje en RSLogix5000 y Drive Windows.**

El programa RSLogix5000 tiene la opción para generar gráficas del comportamiento de todas las señales de entrada, salida y de las señales temporales.

La gráfica principal que se monitorea es la de la rampa de velocidad y de corriente entregada hacia los motores. La figura 4.21 monitorea el comportamiento de los motores en el proceso de izaje de mineral tanto en sentido horario como anti horario. Aquí se pueden observar las señales enviadas a los drives como son **Ref\_Vel\_RPM\_AUX** (referencia de velocidad del joystick de color celeste) y **AI\_Hoist\_Speed** (entrada analógica del joystick de color naranja), por otro también se puede observar las gráficas de las señales de feedback que envían los drives al PLC como son: **DrvMaxter\_I.Value1\_PNO\_120** (feedback de la velocidad de color amarillo), **DrvMaxter\_I.Value3\_PNO\_122** (feedback de corriente del drive maestro de color verde) y **DrvSlave\_I.Value3\_PNO\_122** (feedback de corriente del drive esclavo de color rojo).



**Figura N° 4.19.** Monitoreo del comportamiento de los motores AC en el proceso de izaje de mineral.

Del mismo modo se cuenta con el programa DriveWindow que se encarga de monitorear a un solo drive, es decir que para monitorear los 2 drives es necesario contar con dos PCs. La comunicación entre drive y PC se realiza mediante fibra óptica para aislar las señales del ruido. El DriveWindow solo monitorea el comportamiento del drive y del motor comandado por este, no del proceso de izaje.

Las señales actuales que se pueden monitorear con el DriveWindow son en un máximo de seis. Por esta razón señales actuales que se monitorean son: Velocidad, frecuencia, intensidad de corriente, par y tensión de salida hacia el motor, y la última señal monitoreada es la tensión de Bus CC del drive.

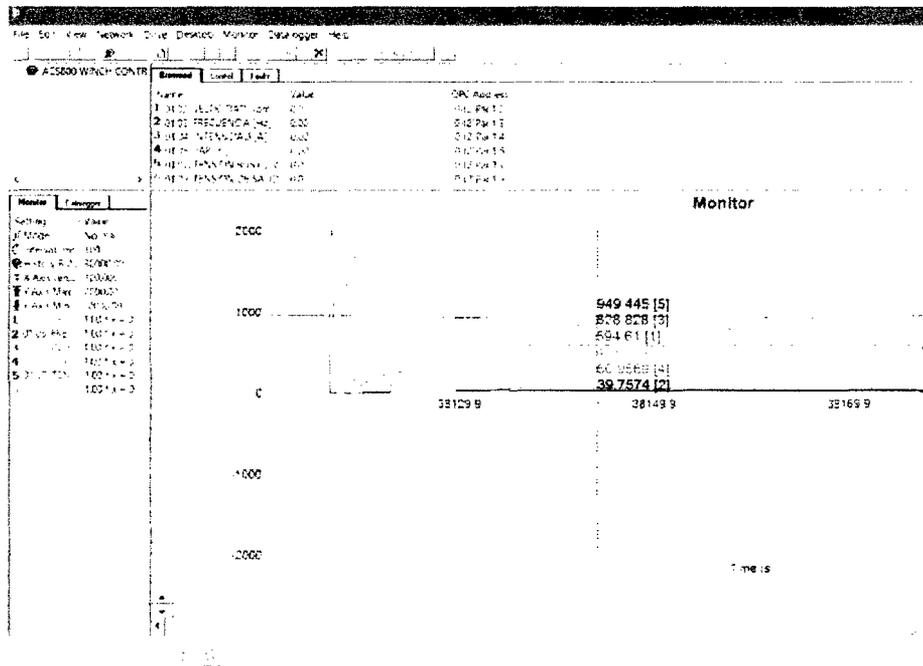
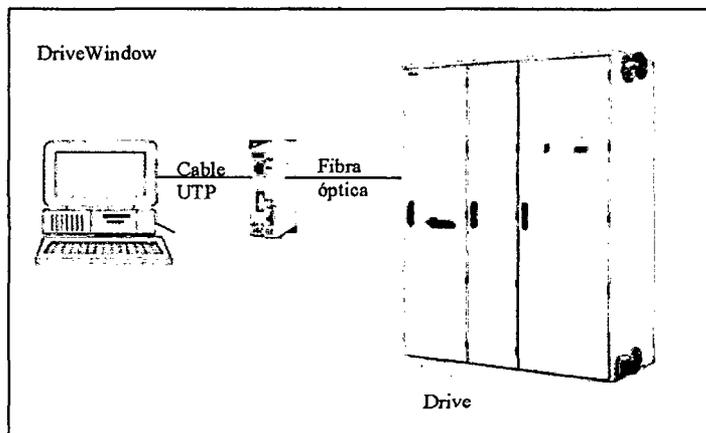


Figura N° 4.20. Monitoreo del comportamiento del motor esclavo.

Para un monitoreo adecuado del comportamiento de ambos variadores el DriveWindow tiene la opción de generar un histórico a ser configurado. De esta manera obtendremos datos exactos durante el tiempo programado con la opción History Buffer (en segundos).

#### 4.1.2. Toma de datos

Los datos fueron tomados del 17 al 20 de mayo y del 22 al 25 de mayo del 2014, la toma de datos se realizó desde las 8:00 am hasta las 5:00 pm, los primeros 4 días sirvieron para registrar los datos antes de la instalación del sistema electrónico compensador de torque y los otros 4 días después de su instalación. Tanto en el antes y después de la instalación del sistema electrónico se tomaron 384 muestras para ser evaluadas. Los valores tomados son obtenidos del monitoreo que se realiza al variador maestro con el DriveWindow ya que éste se encarga de modelar la intensidad de magnetización.



**Figura N° 4.21.** Conexión entre PC y drive usando la interface USB-Fibra óptica.

Los datos obtenidos se muestran en las tablas de anexos sección C, de la Tabla C.1 a la tabla C.8, de esta manera la Tabla C.1 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 17/05/14, la Tabla C.2 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 18/05/14, la Tabla C.3 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 19/05/14, la Tabla C.4 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 20/05/14, la Tabla C.5 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 22/05/14, la Tabla C.6 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 23/05/14, la Tabla C.7 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 24/05/14 y la Tabla C.8 indica la toma de las 96 muestras obtenidas el día 25/05/14.

**4.1.3. Tratamiento estadístico de las muestras tomadas.**

Para efectos de análisis estadístico se calcula el torque máximo que se generará en el momento de arranque del motor AC (esta variará dependiendo de la carga a ser elevada) comparándolo con el torque nominal que se genera cuando el motor está a pleno funcionamiento. En nuestro proceso estamos usando un drive como controlador de velocidad del motor, la corriente pico llega a elevarse hasta 2,2 veces la corriente nominal del motor (por control del drive), lo mismo sucede con el torque, el torque nominal se determina con la siguiente fórmula:

$$T_N = \frac{9550 * P}{rpm}$$

$$T_N = 11796 \text{ Nm} \approx 11800 \text{ Nm.}$$

Las tablas C.1 al C.8 nos permiten realizar el tratamiento estadístico de las muestras tomadas en ambos variadores de velocidad para validar las hipótesis empleando la “z estadística”.

La tabla 4.9 muestra los niveles de corriente pico y de torque obtenidos desde el 17/05/14 hasta 25/05/14 en el sistema electrónico compensador de torque de motor AC y el sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque. La unidad de torque se tiene en porcentaje (%) debido a que normalmente es expresada en esos términos. La tabla 4.10 muestra los niveles de torque expresados en Nm que es la unidad física de medida del torque, y se lleva a estas unidades para realizar el tratamiento estadístico.

En promedio del torque obtenido es de -1491.59 Nm en el momento de arranque del motor AC en el sistema sin compensación de torque, el signo negativo indica que el sentido de giro del motor es contrario al que se desea generar, teniendo como consecuencia el arrastre de skips. El promedio de torque obtenido con la implementación del sistema electrónico compensador de torque es de 19123.99 Nm que es aproximadamente en doble del torque nominal del motor cuyo comportamiento es normal al momento de arrancar el motor logrando de esta manera una salida correcta de los skips, es decir que con este sistema ya no existe arrastres de skips.

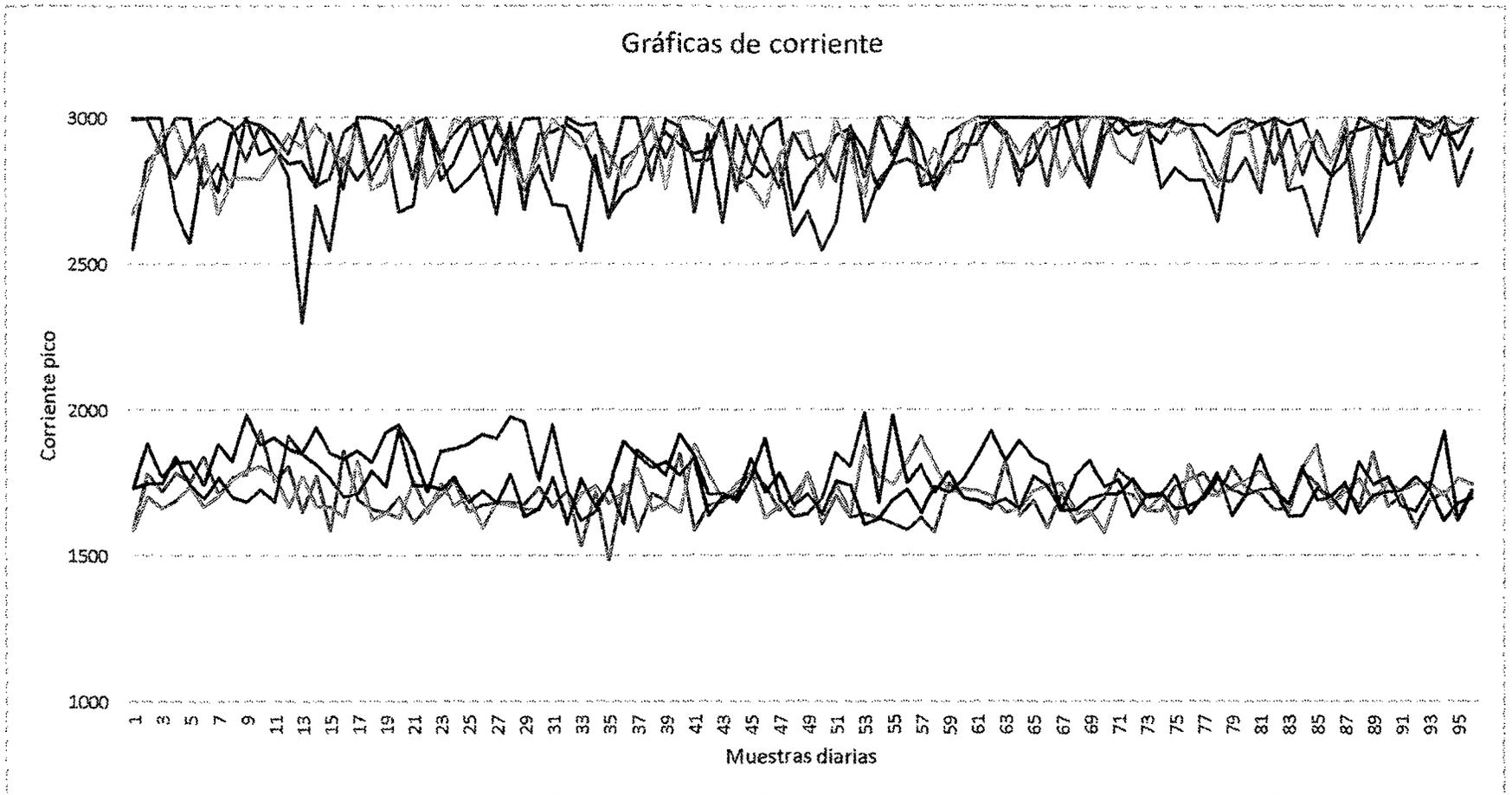
**Tabla N° 4.9. Muestras tomadas con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensacion de torque en el motor AC.**  
La unidad del torque está en %.

N° de muestra	Niveles de corriente pico y torque máximo sin el sistema electrónico compensador de torque para motor AC										Niveles de corriente pico y torque máximo con el sistema electrónico compensador de torque para motor AC									
	17/05/2014		18/05/2014		19/05/2014		20/05/2014		Corriente promedio (A)	Torque promedio (%)	22/05/2014		23/05/2014		24/05/2014		25/05/2014		Corriente promedio (A)	Torque promedio (%)
	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)			Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)		
01	2550	-15	2998	-15	2673	-10	2994	-16	2803.75	-14.00	1588	156	1586	149	1733	163	1732	164	1659.75	158.00
02	2851	-14	3000	-11	2786	-12	3000	-13	2909.25	-12.50	1782	169	1701	161	1748	164	1885	178	1779	168.00
03	2894	-12	3000	-12	2946	-11	2891	-12	2932.75	-11.75	1721	163	1661	156	1748	165	1773	168	1725.75	163.00
04	3000	-15	2687	-15	2976	-13	2794	-10	2864.25	-13.25	1783	167	1688	158	1839	174	1816	173	1781.5	168.00
05	3000	-14	2574	-13	2846	-15	2894	-11	2828.5	-13.25	1757	165	1738	164	1744	164	1826	182	1766.25	168.75
06	2765	-15	2863	-19	2910	-11	2973	-9	2877.75	-13.50	1841	178	1669	157	1696	160	1746	165	1738	165.00
07	2843	-14	2746	-11	2673	-10	3000	-11	2815.5	-11.50	1709	161	1706	161	1770	167	1884	179	1767.25	167.00
08	2764	-12	2950	-12	2790	-9	2973	-15	2869.25	-12.00	1770	168	1762	167	1699	160	1824	173	1763.75	167.00
09	3000	-13	2986	-13	2793	-15	2850	-9	2907.25	-12.50	1779	169	1790	170	1683	167	1983	188	1808.75	173.50
10	2874	-16	2975	-15	2786	-13	2975	-15	2902.5	-14.75	1930	183	1805	171	1727	162	1881	178	1835.75	173.50
11	2900	-16	2896	-14	2851	-14	2941	-9	2897	-13.25	1756	186	1776	168	1683	158	1903	180	1779.5	173.00
12	2800	-15	2843	-15	2943	-15	2876	-13	2865.5	-14.50	1808	172	1664	156	1911	182	1867	176	1812.5	171.50
13	2300	-10	2851	-15	2900	-16	3000	-14	2762.75	-13.75	1650	157	1772	167	1851	175	1852	176	1781.25	168.75
14	2700	-13	2763	-15	2976	-18	2764	-12	2800.75	-14.50	1774	169	1665	156	1812	171	1938	183	1797.25	169.75
15	2546	-9	2946	-15	2916	-14	2790	-11	2799.5	-12.25	1586	158	1664	156	1764	165	1854	175	1717	163.50
16	2863	-8	2756	-14	2834	-15	2948	-13	2850.25	-12.50	1859	178	1630	153	1699	160	1832	174	1755	166.25
17	2786	-10	3000	-15	2960	-16	2986	-11	2933	-13.00	1689	158	1824	173	1713	161	1860	176	1771.5	167.00
18	2851	-15	3000	-15	2756	-18	2786	-12	2848.25	-15.00	1657	157	1621	152	1792	169	1821	173	1722.75	162.75
19	2940	-14	2987	-19	2780	-14	2884	-11	2897.75	-14.50	1647	155	1644	154	1737	164	1922	183	1737.5	164.00
20	2680	-12	2946	-15	2934	-13	2976	-13	2884	-13.25	1700	160	1629	152	1935	184	1950	186	1803.5	170.50
21	2699	-13	2976	-14	3000	-16	2790	-11	2866.25	-13.50	1613	150	1756	166	1740	164	1860	177	1742.25	164.25
22	2984	-14	3000	-13	2764	-9	3000	-10	2937	-11.50	1664	153	1645	154	1743	164	1721	163	1693.25	158.50
23	2860	-15	2786	-12	2843	-13	2876	-9	2841.25	-12.25	1709	160	1746	165	1728	162	1859	176	1760.5	165.75
24	2746	-18	2845	-11	2995	-15	2947	-10	2883.25	-13.50	1756	166	1668	156	1771	168	1866	177	1765.25	166.75
25	2790	-12	2961	-11	2976	-14	3000	-9	2931.75	-11.50	1649	155	1705	161	1682	158	1883	179	1729.75	163.25
26	2850	-15	2992	-12	3000	-14	2849	-10	2922.75	-12.75	1673	156	1592	150	1723	163	1917	182	1726.25	162.75
27	2673	-16	2840	-12	3000	-13	2976	-11	2872.25	-13.00	1682	156	1682	158	1679	157	1901	181	1736	163.00
28	2984	-14	2964	-15	2864	-11	2878	-13	2922.5	-13.25	1682	157	1670	157	1779	168	1976	188	1776.75	167.50
29	2754	-15	2687	-11	2764	-15	2997	-12	2800.5	-13.25	1676	157	1659	155	1633	153	1960	187	1732	163.00
30	2836	-16	2943	-13	2876	-13	3000	-13	2913.75	-13.75	1735	164	1655	155	1661	156	1760	166	1702.75	160.25
31	2706	-13	2951	-14	2997	-12	2786	-15	2860	-13.50	1664	155	1770	168	1766	166	1950	186	1787.5	168.75
32	2698	-14	2978	-15	2943	-11	3000	-14	2904.75	-13.50	1724	161	1616	151	1605	150	1728	163	1668.25	156.25
33	2546	-12	2946	-13	2897	-12	2974	-15	2840.75	-13.00	1533	150	1712	161	1765	166	1618	151	1657	157.00
34	2870	-8	2830	-15	2961	-13	2981	-15	2910.5	-12.75	1718	160	1738	164	1666	156	1650	155	1693	158.75
35	2657	-12	2670	-14	2874	-14	2794	-14	2748.75	-13.50	1486	148	1677	157	1736	164	1742	165	1660.25	158.50
36	2861	-9	2743	-12	2794	-15	3000	-11	2849.5	-11.75	1744	164	1717	162	1893	180	1610	151	1741	164.25
37	2894	-10	2768	-15	2890	-11	3000	-9	2888	-11.25	1583	149	1799	170	1848	175	1863	177	1773.25	167.75
38	2976	-11	2890	-15	3000	-10	2786	-15	2913	-12.75	1714	160	1653	155	1803	171	1822	173	1748	164.75
39	2863	-13	2950	-14	2760	-12	2994	13	2891.75	-6.50	1685	158	1678	157	1822	173	1776	168	1740.25	164.00
40	2976	-15	2910	-13	3000	-9	2971	-9	2964.25	-11.50	1850	179	1648	154	1777	168	1916	183	1797.75	171.00
41	2675	-12	2876	-11	3000	-12	2851	-15	2850.5	-12.50	1586	149	1880	179	1835	174	1846	175	1786.75	169.25
42	2943	-14	2890	-12	2986	-11	2853	-14	2918	-12.75	1671	157	1783	167	1636	153	1710	162	1700	159.75
43	2643	-13	3000	-13	2940	-10	3000	-13	2895.75	-12.25	1686	158	1688	158	1702	160	1714	162	1697.5	159.50
44	2976	-9	2768	-11	2830	-14	2749	-11	2830.75	-11.25	1723	161	1748	165	1699	160	1686	158	1714	161.00
45	2846	-10	2803	-15	2764	-13	2976	-10	2847.25	-12.00	1787	169	1791	170	1834	174	1768	165	1795	169.50
46	2796	-11	2964	-15	2694	-11	2876	-9	2832.5	-11.50	1740	169	1627	152	1716	161	1903	182	1746.5	166.00
47	2843	-12	3000	-14	2870	-12	2761	-13	2868.5	-12.75	1653	155	1670	157	1786	168	1690	160	1699.75	160.00
48	2597	-10	2684	-12	2945	-13	2948	-12	2793.5	-11.75	1701	161	1657	155	1671	158	1631	153	1665	156.75

a

49	2679	-13	2790	-14	2953	-11	2857	-11	2819.75	-12.25	1777	168	1785	169	1709	160	1640	154	1727.75	162.75
50	2548	-10	2850	-15	2764	-10	2875	-15	2759.25	-12.50	1609	150	1635	153	1645	154	1697	159	1646.5	154.00
51	2643	-10	2941	-14	2998	-12	2784	-14	2841.5	-12.50	1706	161	1744	165	1757	165	1853	176	1765	166.75
52	2963	-12	2967	-15	2876	-13	2976	-12	2945.5	-13.00	1632	153	1645	154	1742	165	1807	170	1706.5	160.50
53	2647	-10	2894	-15	2734	-14	2798	-13	2768.25	-13.00	1642	154	1875	177	1608	151	1990	188	1778.75	167.50
54	2783	-11	2753	-16	3000	-15	3000	-11	2884	-13.25	1627	152	1773	169	1624	153	1680	158	1676	158.00
55	2840	-15	2846	-14	3000	-12	2871	-15	2889.25	-14.00	1607	150	1742	164	1689	159	1980	188	1754.5	165.25
56	2860	-9	2975	-13	2946	-11	3000	-15	2945.25	-12.00	1587	150	1823	173	1726	162	1750	165	1721.5	162.50
57	2831	-8	2908	-15	2764	-10	2768	-12	2817.75	-11.25	1629	151	1910	181	1644	154	1810	172	1748.25	164.50
58	2796	-7	2753	-16	2895	-11	2779	-15	2805.75	-12.25	1582	150	1819	171	1739	164	1716	161	1714	161.50
59	2946	-12	2846	-13	2810	-15	2846	-13	2862	-13.25	1749	165	1717	162	1718	162	1788	169	1743	164.50
60	2978	-13	2854	-11	2976	-9	2911	-13	2929.75	-11.50	1699	159	1731	164	1763	166	1699	160	1723	162.25
61	3000	-11	2976	-9	3000	-12	2907	-11	2970.75	-10.75	1687	158	1722	162	1836	174	1687	159	1733	163.25
62	3000	-15	2985	-10	2761	-15	3000	-10	2936.5	-12.50	1658	155	1704	160	1928	183	1670	157	1740	163.75
63	3000	-13	2931	-11	2954	-14	2946	-15	2957.75	-13.25	1825	174	1646	154	1825	172	1693	159	1747.25	164.75
64	3000	-14	2816	-9	2876	-11	2768	-12	2865	-11.50	1635	153	1659	155	1895	180	1658	155	1711.75	160.75
65	3000	-14	2853	-12	2941	-12	2946	-19	2935	-14.25	1688	158	1722	163	1837	184	1774	167	1755.25	168.00
66	3000	-11	2957	-9	2985	-13	2768	-13	2927.5	-11.50	1596	150	1745	164	1812	182	1741	164	1723.5	165.00
67	3000	-10	2978	-10	2798	-15	3000	-15	2944	-12.50	1714	162	1750	166	1656	155	1654	155	1693.5	159.50
68	3000	-15	3000	-15	2890	-9	2845	-19	2933.75	-14.50	1609	150	1643	155	1776	167	1654	155	1670.5	156.75
69	3000	-13	2768	-15	3000	-10	2761	-10	2882.25	-12.00	1639	153	1651	155	1825	173	1693	159	1702	160.00
70	3000	-14	3000	-15	3000	-11	2940	-9	2985	-12.25	1697	159	1575	149	1735	163	1708	160	1678.75	157.75
71	2946	-15	3000	-14	2879	-19	3000	-15	2956.25	-15.75	1794	170	1720	163	1761	166	1709	160	1746	164.75
72	2987	-14	2943	-9	2843	-11	2976	-13	2937.25	-11.75	1752	165	1706	161	1632	153	1763	167	1713.25	161.50
73	2990	-12	2957	-9	2973	-13	2991	-12	2977.75	-11.50	1655	155	1652	155	1708	161	1700	160	1678.75	157.75
74	2761	-15	2915	-13	2981	-19	2970	-13	2906.75	-15.00	1652	155	1706	161	1715	162	1708	160	1695.25	159.50
75	2830	-19	2994	-10	2945	-15	3000	-15	2942.25	-14.75	1739	164	1610	150	1660	156	1778	168	1696.75	159.50
76	2786	-18	2976	-11	2976	-9	2976	-11	2928.5	-12.25	1762	167	1811	171	1669	156	1640	154	1720.5	162.00
77	2789	-13	2980	-12	2830	-10	2894	-14	2873.25	-12.25	1784	169	1709	160	1695	159	1706	160	1723.5	162.00
78	2647	-12	2941	-13	2764	-11	2791	-13	2785.75	-12.25	1710	162	1703	160	1765	167	1783	169	1740.25	164.50
79	2946	-11	2981	-15	2953	-13	2784	-15	2916	-13.50	1806	172	1733	163	1724	163	1635	153	1724.5	162.75
80	2957	-9	3000	-11	2994	-15	2867	-13	2954.5	-12.00	1734	164	1760	167	1707	161	1710	162	1727.75	163.50
81	2983	-8	2976	-11	2776	-15	2745	-12	2870	-11.50	1711	162	1789	169	1846	175	1725	163	1767.75	167.25
82	2843	-13	3000	-13	3000	-15	3000	-9	2960.75	-12.50	1656	155	1745	164	1722	163	1732	164	1713.75	161.50
83	2961	-9	2976	-12	2768	-14	2751	-13	2864	-12.00	1663	156	1649	154	1677	157	1633	153	1655.5	155.00
84	2806	-11	2994	-10	2913	-14	2764	-14	2869.25	-12.25	1792	170	1800	170	1806	171	1635	153	1758.25	166.00
85	2956	-12	2865	-9	2937	-13	2597	-15	2838.75	-12.25	1746	165	1879	178	1688	158	1730	164	1760.75	166.25
86	2846	-13	2801	-11	2842	-12	2798	-15	2821.75	-12.75	1670	157	1661	156	1698	159	1700	161	1682.25	158.25
87	2976	-14	2942	-15	3000	-11	2846	-15	2941	-13.75	1735	164	1723	162	1642	154	1752	166	1713	161.50
88	2576	-15	2960	-14	2674	-10	3000	-13	2802.5	-13.00	1667	156	1763	167	1823	173	1645	154	1724.5	162.50
89	2673	-16	2976	-12	2981	-11	2978	-15	2902	-13.50	1855	176	1685	159	1745	165	1705	161	1747.5	165.25
90	3000	-12	2840	-11	2997	-12	2948	-9	2946.25	-11.00	1669	156	1751	165	1773	168	1718	162	1727.75	162.75
91	3000	-11	2865	-13	2768	-11	2768	-12	2850.25	-11.75	1708	161	1723	162	1668	156	1722	163	1705.25	160.50
92	3000	-10	2973	-15	2945	-10	3000	-11	2979.5	-11.50	1592	150	1748	165	1651	155	1770	168	1690.25	159.50
93	2987	-12	2856	-14	2941	-9	2964	-13	2937	-12.00	1689	158	1748	164	1735	164	1726	163	1724.5	162.25
94	2941	-11	2976	-15	3000	-16	3000	-15	2979.25	-14.25	1717	162	1706	161	1925	184	1619	151	1741.75	164.50
95	2953	-13	2893	-11	2974	-15	2768	-14	2897	-13.25	1620	152	1766	167	1623	152	1679	157	1672	157.00
96	3000	-11	2994	-9	2981	-15	2894	-16	2967.25	-12.75	1715	162	1747	164	1724	163	1696	159	1720.5	162.00

Fuente: Sistematizado por el autor de los datos tomados en las tablas C.1 al C.8.



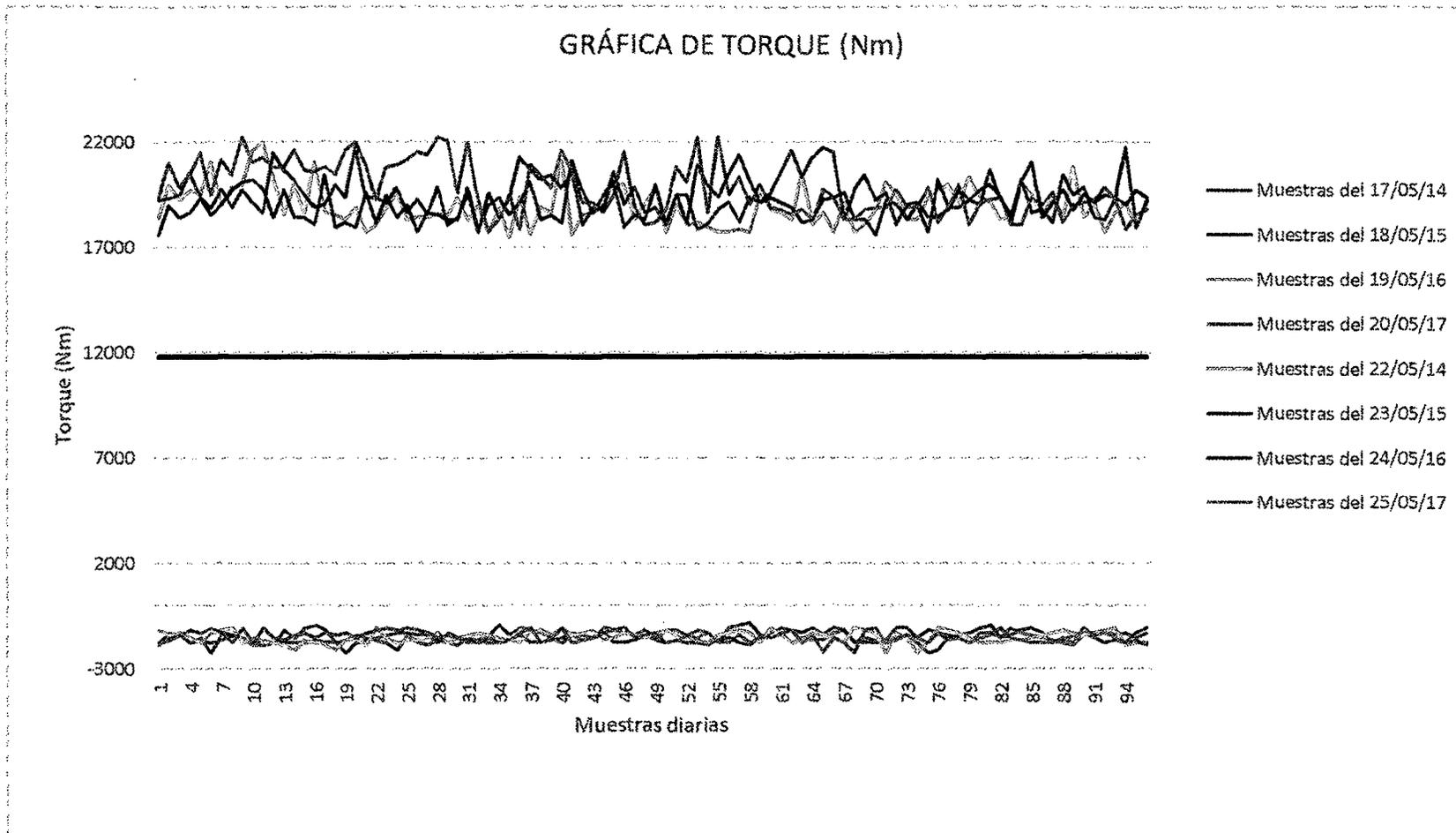
**Figura N° 4.22.** Representación gráfica de los datos muestreados de corriente pico del sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque.

**Tabla N° 4.10. Muestras tomadas con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensacion de torque en el motor AC.**  
La unidad del torque está en Nm.

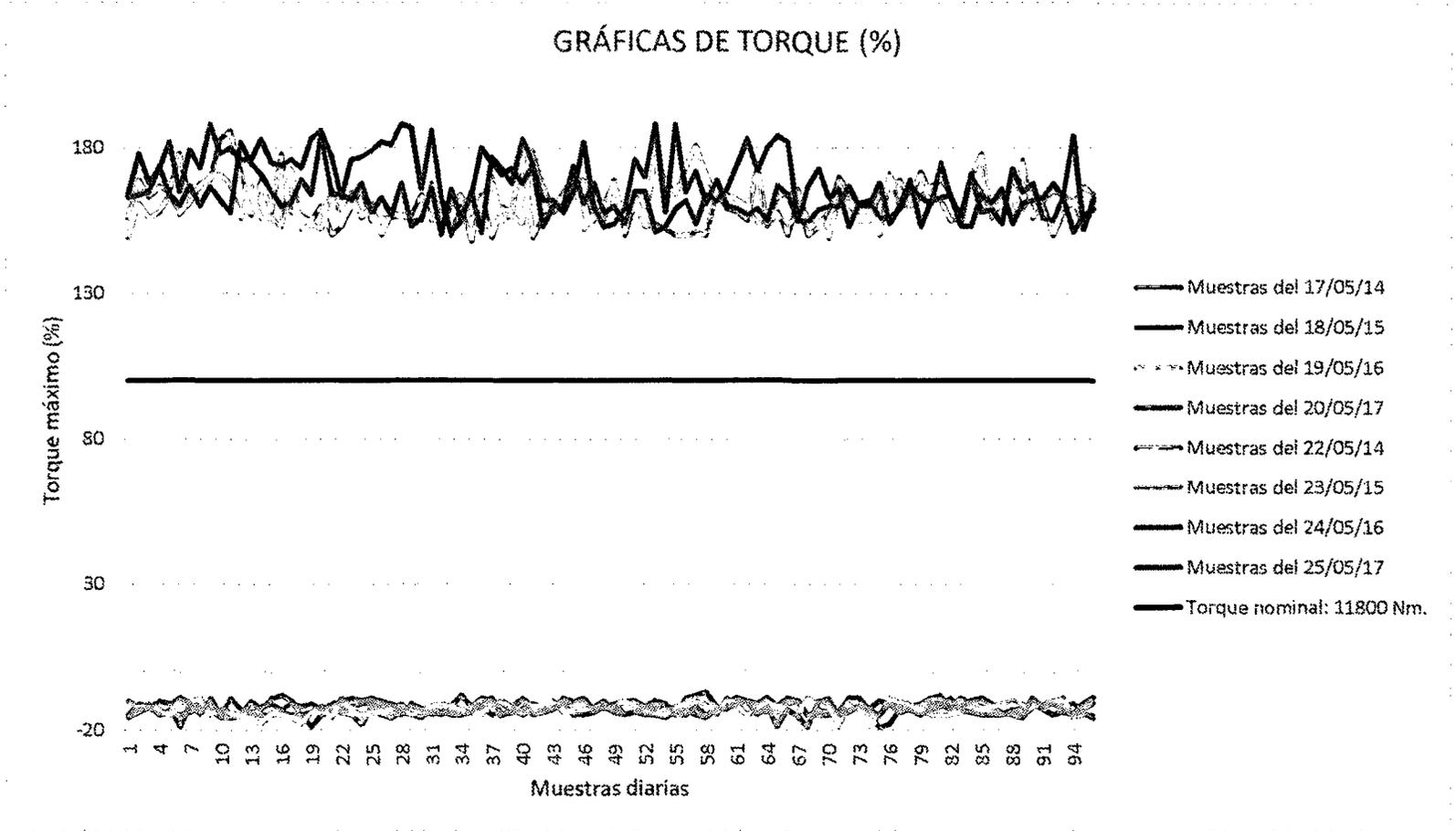
N° de muestra	Niveles de corriente pico y torque máximo sin el sistema electrónico compensador de torque para motor AC										Niveles de corriente pico y torque máximo con el sistema electrónico compensador de torque para motor AC									
	17/05/2014		18/05/2014		19/05/2014		20/05/2014		Corriente promedio (A)	Torque promedio (Nm)	22/05/2014		23/05/2014		24/05/2014		25/05/2014		Corriente promedio (A)	Torque promedio (Nm)
	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)			Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)	Corriente pico (A)	Torque máximo (Nm)		
01	2550	-1770	2998	-1770	2673	-1180	2994	-1888	2803.75	-1652.00	1588	18408	1586	17582	1733	19234	1732	19352	1659.75	18644.00
02	2851	-1652	3000	-1298	2786	-1416	3000	-1534	2909.25	-1475.00	1782	19942	1701	18998	1748	19352	1885	21004	1779	19824.00
03	2894	-1416	3000	-1416	2946	-1298	2891	-1416	2932.75	-1386.50	1721	19234	1661	18408	1748	19470	1773	19824	1725.75	19234.00
04	3000	-1770	2687	-1770	2976	-1534	2794	-1180	2864.25	-1563.50	1783	19706	1688	18644	1839	20532	1816	20414	1781.5	19824.00
05	3000	-1652	2574	-1534	2846	-1770	2894	-1298	2828.5	-1563.50	1757	19470	1738	19352	1744	19352	1826	21476	1766.25	19912.50
06	2765	-1770	2863	-2242	2910	-1298	2973	-1062	2877.75	-1593.00	1841	21004	1669	18526	1696	18880	1746	19470	1738	19470.00
07	2843	-1652	2746	-1298	2673	-1180	3000	-1298	2815.5	-1357.00	1709	18998	1706	18998	1770	19706	1884	21122	1767.25	19706.00
08	2764	-1416	2950	-1416	2790	-1062	2973	-1770	2869.25	-1416.00	1770	19824	1762	19706	1699	18880	1824	20414	1763.75	19706.00
09	3000	-1534	2986	-1534	2793	-1770	2850	-1062	2907.25	-1475.00	1779	19942	1790	20060	1683	19706	1983	22184	1808.75	20473.00
10	2874	-1888	2975	-1770	2786	-1534	2975	-1770	2902.5	-1740.50	1930	21594	1805	20178	1727	19116	1881	21004	1835.75	20473.00
11	2900	-1888	2896	-1652	2851	-1652	2941	-1062	2897	-1563.50	1756	21948	1776	19824	1683	18644	1903	21240	1779.5	20414.00
12	2800	-1770	2843	-1770	2943	-1770	2876	-1534	2865.5	-1711.00	1808	20296	1664	18408	1911	21476	1867	20768	1812.5	20237.00
13	2300	-1180	2851	-1770	2900	-1888	3000	-1652	2762.75	-1622.50	1650	18526	1772	19706	1851	20650	1852	20768	1781.25	19912.50
14	2700	-1534	2763	-1770	2976	-2124	2764	-1416	2800.75	-1711.00	1774	19942	1655	18408	1812	20178	1938	21594	1797.25	20030.50
15	2546	-1062	2946	-1770	2916	-1652	2790	-1298	2799.5	-1445.50	1586	18644	1664	18408	1764	19470	1854	20650	1717	19930.00
16	2863	-944	2756	-1652	2834	-1770	2948	-1534	2850.25	-1475.00	1859	21004	1630	18054	1699	18880	1832	20532	1755	19617.50
17	2786	-1180	3000	-1770	2960	-1888	2986	-1298	2933	-1534.00	1689	18644	1824	20414	1713	18998	1860	20768	1771.5	19706.00
18	2851	-1770	3000	-1770	2756	-2124	2786	-1416	2848.25	-1770.00	1657	18526	1621	17936	1792	19942	1821	20414	1722.75	19204.50
19	2940	-1652	2987	-2242	2780	-1652	2884	-1298	2897.75	-1711.00	1647	18290	1644	18172	1737	19352	1922	21594	1737.5	19352.00
20	2680	-1416	2946	-1770	2934	-1534	2976	-1534	2884	-1563.50	1700	18880	1629	17936	1935	20178	1950	21948	1803.5	20119.00
21	2699	-1534	2976	-1652	3000	-1888	2790	-1298	2866.25	-1593.00	1613	17700	1756	19588	1740	19352	1860	20886	1742.25	19981.50
22	2984	-1652	3000	-1534	2764	-1062	3000	-1180	2937	-1357.00	1664	18054	1645	18172	1743	19352	1721	19234	1693.25	18703.00
23	2860	-1770	2786	-1416	2843	-1534	2876	-1062	2841.25	-1445.50	1709	18880	1746	19470	1728	19116	1859	20768	1760.5	19558.50
24	2746	-2124	2845	-1298	2995	-1770	2947	-1180	2883.25	-1593.00	1756	19588	1668	18408	1771	19824	1866	20886	1765.25	19676.50
25	2790	-1416	2961	-1298	2976	-1652	3000	-1062	2931.75	-1357.00	1649	18290	1705	18998	1682	18644	1883	21122	1729.75	19263.50
26	2850	-1770	2992	-1416	3000	-1652	2849	-1180	2922.75	-1504.50	1673	18408	1592	17700	1723	19234	1917	21476	1726.25	19204.50
27	2673	-1888	2840	-1416	3000	-1534	2976	-1298	2872.25	-1534.00	1682	18408	1682	18644	1679	18526	1901	21358	1736	19234.00
28	2984	-1652	2964	-1770	2864	-1298	2878	-1534	2922.5	-1563.50	1682	18526	1670	18526	1779	19824	1976	22184	1776.75	19765.00
29	2754	-1770	2687	-1298	2764	-1770	2997	-1416	2800.5	-1622.50	1676	18526	1659	18290	1633	18054	1960	22066	1732	19234.00
30	2836	-1888	2943	-1534	2876	-1534	3000	-1534	2913.75	-1622.50	1735	19352	1655	18290	1661	18408	1760	19588	1702.75	18909.50
31	2706	-1534	2951	-1652	2997	-1416	2786	-1770	2860	-1593.00	1664	18290	1770	19824	1766	19588	1950	21948	1787.5	19912.50
32	2698	-1652	2978	-1770	2943	-1298	3000	-1652	2904.75	-1593.00	1724	18998	1616	17818	1605	17700	1728	19234	1668.25	18437.50
33	2546	-1416	2946	-1534	2897	-1416	2974	-1770	2840.75	-1534.00	1533	17700	1712	18998	1765	19588	1618	17818	1657	18526.00
34	2870	-944	2830	-1770	2961	-1534	2981	-1770	2910.5	-1504.50	1718	18880	1738	19352	1666	18408	1650	18290	1693	18732.50
35	2657	-1416	2670	-1652	2874	-1652	2794	-1652	2748.75	-1593.00	1486	17464	1677	18526	1736	19352	1742	19470	1660.25	18703.00
36	2861	-1062	2743	-1416	2794	-1770	3000	-1298	2849.5	-1386.50	1744	19352	1717	19116	1893	21240	1610	17818	1741	19381.50
37	2894	-1180	2768	-1770	2890	-1298	3000	-1062	2888	-1327.50	1583	17582	1799	20060	1848	20650	1863	20886	1773.25	19794.50
38	2976	-1298	2890	-1770	3000	-1180	2786	-1770	2913	-1504.50	1714	18880	1653	18290	1803	20178	1822	20414	1748	19440.50
39	2863	-1534	2950	-1652	2760	-1416	2994	-1534	2891.75	-1534.00	1685	18644	1678	18526	1822	20414	1776	19824	1740.25	19352.00
40	2976	-1770	2910	-1534	3000	-1062	2971	-1062	2964.25	-1357.00	1850	21122	1648	18172	1777	19824	1916	21594	1797.75	20178.00
41	2675	-1416	2876	-1298	3000	-1416	2851	-1770	2850.5	-1475.00	1586	20650	1880	21122	1835	20532	1846	20594	1786.75	19971.50
42	2943	-1652	2890	-1416	2986	-1298	2853	-1652	2918	-1504.50	1671	18526	1783	19706	1636	18054	1710	19116	1700	18850.50
43	2643	-1534	3000	-1534	2940	-1180	3000	-1534	2895.75	-1445.50	1686	18644	1688	18644	1702	18880	1714	19116	1697.5	18821.00
44	2976	-1062	2768	-1298	2830	-1652	2749	-1298	2830.75	-1327.50	1723	18998	1748	19470	1699	18880	1686	18644	1714	18998.00
45	2846	-1180	2803	-1770	2764	-1534	2976	-1180	2847.25	-1416.00	1787	19942	1791	20060	1834	20532	1768	19470	1795	20001.00
46	2796	-1298	2964	-1770	2694	-1298	2876	-1062	2832.5	-1357.00	1740	19942	1627	17936	1716	18998	1903	21476	1746.5	19588.00
47	2843	-1416	3000	-1652	2870	-1416	2761	-1534	2868.5	-1504.50	1653	18290	1670	18526	1786	19824	1690	18880	1699.75	18880.00
48	2597	-1180	2684	-1416	2945	-1534	2948	-1416	2793.5	-1386.50	1701	18998	1657	18290	1671	18644	1631	18054	1665	18496.50

N° de muestra	Niveles de corriente pico y torque máximo sin el sistema electrónico compesador de torque para motor AC										Niveles de corriente pico y torque máximo con el sistema electrónico compesador de torque para motor AC									
	17/05/2014		18/05/2014		19/05/2014		20/05/2014		Corriente promedio		22/05/2014		23/05/2014		24/05/2014		25/05/2014		Corriente promedio	
	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente (A)	Torque (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Corriente (A)	Torque (%)
49	2679	-1534	2790	-1652	2953	-1298	2857	-1298	2819.75	-1445.50	1777	19824	1785	19942	1709	18880	1640	18172	1727.75	19204.50
50	2548	-1180	2850	-1770	2764	-1180	2875	-1770	2759.25	-1475.00	1609	17700	1635	18054	1645	18172	1697	18762	1646.5	18172.00
51	2643	-1180	2941	-1652	2998	-1416	2794	-1652	2841.5	-1475.00	1706	18998	1744	19470	1757	19470	1853	20768	1765	19676.50
52	2963	-1416	2967	-1770	2876	-1534	2976	-1416	2945.5	-1534.00	1632	18054	1645	18172	1742	19470	1807	20060	1706.5	18939.00
53	2647	-1180	2894	-1770	2734	-1652	2798	-1534	2768.25	-1534.00	1642	18172	1875	20886	1608	17818	1990	22184	1778.75	19765.00
54	2783	-1298	2753	-1888	3000	-1770	3000	-1298	2884	-1563.50	1627	17936	1773	19942	1624	18054	1680	18644	1676	18644.00
55	2840	-1770	2846	-1652	3000	-1416	2871	-1770	2889.25	-1652.00	1607	17700	1742	19352	1689	18762	1980	22184	1754.5	19499.50
56	2860	-1062	2975	-1534	2946	-1298	3000	-1770	2945.25	-1416.00	1587	17700	1823	20414	1726	19116	1750	19470	1721.5	19175.00
57	2831	-944	2908	-1770	2764	-1180	2768	-1416	2817.75	-1327.50	1629	17818	1910	21358	1644	18172	1810	20296	1748.25	19411.00
58	2796	-826	2753	-1888	2895	-1298	2779	-1770	2805.75	-1445.50	1582	17700	1819	20178	1739	19352	1716	18998	1714	19057.00
59	2946	-1416	2846	-1534	2810	-1770	2846	-1534	2862	-1563.50	1749	19470	1717	19116	1718	19116	1788	19942	1743	19411.00
60	2978	-1534	2854	-1298	2976	-1062	2911	-1534	2929.75	-1357.00	1699	18762	1731	19352	1763	19588	1699	18880	1723	19145.50
61	3000	-1298	2976	-1062	3000	-1416	2907	-1298	2970.75	-1268.50	1687	18644	1722	19116	1836	20532	1687	18762	1733	19263.50
62	3000	-1770	2985	-1180	2761	-1770	3000	-1180	2936.5	-1475.00	1658	18290	1704	18880	1928	21594	1670	18526	1740	19322.50
63	3000	-1534	2931	-1298	2954	-1652	2946	-1770	2957.75	-1563.50	1825	20532	1646	18172	1825	20296	1693	18762	1747.25	19440.50
64	3000	-1652	2816	-1062	2876	-1298	2768	-1416	2865	-1357.00	1635	18054	1659	18290	1895	21240	1658	18290	1717.75	18966.50
65	3000	-1652	2853	-1416	2941	-1416	2946	-2242	2935	-1681.50	1688	18644	1722	19234	1837	21712	1774	19706	1755.25	19824.00
66	3000	-1298	2957	-1062	2985	-1534	2768	-1534	2927.5	-1357.00	1596	17700	1745	19352	1812	21476	1741	19352	1723.5	19470.00
67	3000	-1180	2978	-1180	2798	-1770	3000	-1770	2944	-1475.00	1714	19116	1750	19588	1656	18290	1654	18290	1693.5	18821.00
68	3000	-1770	3000	-1770	2890	-1062	2845	-2242	2933.75	-1711.00	1609	17700	1643	18290	1776	19706	1654	18290	1670.5	18496.50
69	3000	-1534	2768	-1770	3000	-1180	2761	-1180	2882.25	-1416.00	1639	18054	1651	18290	1825	20414	1693	18762	1702	18880.00
70	3000	-1652	3000	-1770	3000	-1298	2940	-1062	2985	-1445.50	1697	18762	1575	17582	1735	19234	1708	18880	1678.75	18614.50
71	2946	-1770	3000	-1652	2879	-2242	3000	-1770	2956.25	-1858.50	1794	20060	1720	19234	1761	19588	1709	18880	1746	19440.50
72	2987	-1652	2943	-1062	2843	-1298	2976	-1534	2937.25	-1386.50	1752	19470	1706	18998	1632	18054	1763	19706	1713.25	19057.00
73	2990	-1416	2957	-1062	2973	-1534	2991	-1416	2977.75	-1357.00	1655	18290	1652	18290	1708	18998	1700	18880	1678.75	18614.50
74	2761	-1770	2915	-1534	2981	-2242	2970	-1534	2906.75	-1770.00	1652	18290	1706	18998	1715	19116	1708	18880	1695.25	18821.00
75	2830	-2242	2994	-1180	2945	-1770	3000	-1770	2942.25	-1740.50	1739	19352	1610	17700	1660	18408	1778	19824	1696.75	18821.00
76	2786	-2124	2976	-1298	2976	-1062	2976	-1298	2928.5	-1445.50	1762	19706	1811	20178	1669	18408	1640	18172	1720.5	19116.00
77	2789	-1534	2980	-1416	2830	-1180	2894	-1652	2873.25	-1445.50	1784	19942	1709	18880	1695	18762	1706	18880	1723.5	19116.00
78	2647	-1416	2941	-1534	2764	-1298	2791	-1534	2785.75	-1445.50	1710	19116	1703	18880	1765	19706	1783	19942	1740.25	19411.00
79	2946	-1298	2981	-1770	2953	-1534	2784	-1770	2916	-1593.00	1806	20296	1733	19234	1724	19234	1635	18054	1724.5	19204.50
80	2957	-1062	3000	-1298	2994	-1770	2867	-1534	2954.5	-1416.00	1734	19352	1760	19706	1707	18998	1710	19116	1727.75	19293.00
81	2983	-944	2976	-1298	2776	-1770	2745	-1416	2870	-1357.00	1711	19116	1789	19942	1846	20650	1725	19234	1767.75	19735.50
82	2843	-1534	3000	-1534	3000	-1770	3000	-1062	2960.75	-1475.00	1656	18290	1745	19352	1722	19234	1732	19352	1713.75	19057.00
83	2961	-1062	2976	-1416	2768	-1652	2751	-1534	2864	-1416.00	1663	18408	1649	18172	1677	18526	1633	18054	1655.5	18290.00
84	2806	-1298	2994	-1180	2913	-1652	2764	-1652	2869.25	-1445.50	1792	20060	1800	20060	1806	20178	1635	18054	1758.25	19588.00
85	2956	-1416	2865	-1062	2937	-1534	2597	-1770	2838.75	-1445.50	1746	19470	1879	21004	1689	18644	1730	19352	1760.75	19617.50
86	2846	-1534	2801	-1298	2842	-1416	2798	-1770	2821.75	-1504.50	1670	18526	1661	18408	1698	18762	1700	18998	1682.25	18673.50
87	2976	-1652	2942	-1770	3000	-1298	2846	-1770	2941	-1622.50	1735	19352	1723	19116	1642	18172	1752	19588	1713	19057.00
88	2576	-1770	2960	-1652	2674	-1180	3000	-1534	2802.5	-1534.00	1667	18408	1763	19706	1823	20414	1645	18172	1724.5	19175.00
89	2673	-1888	2976	-1416	2981	-1298	2978	-1770	2902	-1593.00	1855	20768	1685	18762	1745	19470	1705	18998	1747.5	19499.50
90	3000	-1416	2840	-1298	2997	-1416	2948	-1062	2946.25	-1298.00	1669	18408	1751	19470	1773	19824	1718	19116	1727.75	19204.50
91	3000	-1298	2865	-1534	2768	-1298	2768	-1416	2850.25	-1386.50	1708	18998	1723	19116	1668	18408	1722	19234	1705.25	18939.00
92	3000	-1180	2973	-1770	2945	-1180	3000	-1298	2979.5	-1357.00	1592	17700	1748	19470	1651	18290	1770	19824	1690.25	18821.00
93	2987	-1416	2856	-1652	2941	-1062	2964	-1534	2937	-1416.00	1689	18644	1748	19352	1735	19352	1726	19234	1724.5	19145.50
94	2941	-1298	2976	-1770	3000	-1888	3000	-1770	2979.25	-1681.50	1717	19116	1706	18998	1925	21712	1619	17818	1741.75	19411.00
95	2953	-1534	2893	-1298	2974	-1770	2768	-1652	2897	-1563.50	1620	17936	1766	19706	1623	17936	1679	18526	1672	18526.00
96	3000	-1298	2994	-1062	2981	-1770	2894	-1888	2967.25	-1504.50	1715	19116	1747	19352	1724	19234	1696	18762	1720.5	19116.00

Fuente: Sistematizado por el autor de los datos tomados en las tablas C.1 al C.8.



**Figura N° 4.23.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque (Nm) en el sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque.



**Figura N° 4.24.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque (%) del sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque.

Tabla N° 4.11. Formato de adquisición de muestras en Excel.

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Temperatura bobinado (°C)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	2550	-15	70.1	Arrastra	08:00:00 a.m.	17/05/2014
02	2851	-14	71.4	Arrastra	08:04:10 a.m.	17/05/2014
03	2894	-12	86.3	Arrastra	08:09:25 a.m.	17/05/2014
04	3000	-15	90.4	Arrastra	08:12:33 a.m.	17/05/2014
05	3000	-14	89.1	Arrastra	08:17:37 a.m.	17/05/2014
06	2765	-15	78.2	Arrastra	08:20:55 a.m.	17/05/2014
07	2843	-14	84.5	Arrastra	08:26:43 a.m.	17/05/2014
08	2764	-12	74.5	Arrastra	08:30:42 a.m.	17/05/2014
09	3000	-13	88.6	Arrastra	08:33:10 a.m.	17/05/2014
10	2874	-16	81.4	Arrastra	08:35:47 a.m.	17/05/2014
11	2900	-16	89.3	Arrastra	08:40:26 a.m.	17/05/2014
12	2800	-15	75.7	Arrastra	08:51:57 a.m.	17/05/2014
13	2300	-10	70.4	Arrastra	08:53:14 a.m.	17/05/2014
14	2700	-13	81.1	Arrastra	09:00:05 a.m.	17/05/2014
15	2546	-9	79.9	Arrastra	09:08:40 a.m.	17/05/2014
16	2863	-8	85.4	Arrastra	09:11:18 a.m.	17/05/2014
17	2786	-10	76.6	Arrastra	09:16:23 a.m.	17/05/2014
18	2851	-15	75.4	Arrastra	09:22:07 a.m.	17/05/2014
19	2940	-14	84.1	Arrastra	09:30:49 a.m.	17/05/2014
20	2680	-12	74.1	Arrastra	09:34:32 a.m.	17/05/2014
21	2699	-13	76.3	Arrastra	09:39:46 a.m.	17/05/2014
22	2984	-14	81.5	Arrastra	09:45:59 a.m.	17/05/2014
23	2860	-15	80.6	Arrastra	09:51:27 a.m.	17/05/2014
24	2746	-18	76.9	Arrastra	09:56:38 a.m.	17/05/2014
25	2790	-12	74.1	Arrastra	10:01:35 a.m.	17/05/2014
26	2850	-15	81.5	Arrastra	10:09:40 a.m.	17/05/2014
27	2673	-16	68.3	Arrastra	10:18:05 a.m.	17/05/2014
28	2984	-14	82.4	Arrastra	10:21:11 a.m.	17/05/2014
29	2754	-15	76.6	Arrastra	10:24:41 a.m.	17/05/2014
30	2836	-16	84.2	Arrastra	10:32:38 a.m.	17/05/2014
31	2706	-13	74.6	Arrastra	10:37:16 a.m.	17/05/2014
32	2698	-14	76.9	Arrastra	10:42:18 a.m.	17/05/2014
33	2546	-12	71.4	Arrastra	10:48:23 a.m.	17/05/2014
34	2870	-8	84.6	Arrastra	11:04:02 a.m.	17/05/2014
35	2657	-12	72.1	Arrastra	11:09:17 a.m.	17/05/2014
36	2861	-9	89.6	Arrastra	11:13:56 a.m.	17/05/2014
37	2894	-10	85.5	Arrastra	11:18:45 a.m.	17/05/2014
38	2976	-11	90.1	Arrastra	11:21:22 a.m.	17/05/2014
39	2863	-13	84	Arrastra	11:29:35 a.m.	17/05/2014
40	2976	-15	89.6	Arrastra	11:33:20 a.m.	17/05/2014
41	2675	-12	75.4	Arrastra	11:37:12 a.m.	17/05/2014
42	2943	-14	87.1	Arrastra	11:41:43 a.m.	17/05/2014
43	2643	-13	74.6	Arrastra	11:46:34 a.m.	17/05/2014
44	2976	-9	90.2	Arrastra	11:54:10 a.m.	17/05/2014
45	2846	-10	86.9	Arrastra	11:59:07 a.m.	17/05/2014
46	2796	-11	74.7	Arrastra	01:00:11 p.m.	17/05/2014
47	2843	-12	84.3	Arrastra	01:06:06 p.m.	17/05/2014
48	2597	-10	62.6	Arrastra	01:09:10 p.m.	17/05/2014

51	1706	161	42.1	No arrastra	01:05:00 p.m.	17/05/2014
52	1632	153	41.7	No arrastra	01:07:25 p.m.	17/05/2014
53	1642	154	41.7	No arrastra	01:09:50 p.m.	17/05/2014
54	1627	152	41.8	No arrastra	01:12:15 p.m.	17/05/2014
55	1607	150	40.7	No arrastra	01:14:40 p.m.	17/05/2014
56	1587	150	40.9	No arrastra	01:17:05 p.m.	17/05/2014
57	1629	151	41.1	No arrastra	01:19:30 p.m.	17/05/2014
58	1582	150	40.6	No arrastra	01:21:55 p.m.	17/05/2014
59	1749	165	42.7	No arrastra	01:24:20 p.m.	17/05/2014
60	1699	159	42.7	No arrastra	01:26:45 p.m.	17/05/2014
61	1687	158	42.5	No arrastra	01:29:10 p.m.	17/05/2014
62	1658	155	42.8	No arrastra	01:31:35 p.m.	17/05/2014
63	1825	174	45.9	No arrastra	01:34:00 p.m.	17/05/2014
64	1635	153	46.7	No arrastra	02:17:10 p.m.	17/05/2014
65	1688	158	42.5	No arrastra	02:19:45 p.m.	17/05/2014
66	1596	150	39.8	No arrastra	02:22:20 p.m.	17/05/2014
67	1714	162	40.7	No arrastra	02:24:55 p.m.	17/05/2014
68	1609	150	39.8	No arrastra	02:27:30 p.m.	17/05/2014
69	1639	153	39.5	No arrastra	02:30:05 p.m.	17/05/2014
70	1697	159	40.7	No arrastra	02:32:40 p.m.	17/05/2014
71	1794	170	42.8	No arrastra	02:35:15 p.m.	17/05/2014
72	1752	165	42.3	No arrastra	02:37:50 p.m.	17/05/2014
73	1655	155	42.7	No arrastra	02:40:25 p.m.	17/05/2014
74	1652	155	42.8	No arrastra	02:43:00 p.m.	17/05/2014
75	1739	164	41.5	No arrastra	02:45:35 p.m.	17/05/2014
76	1762	167	40.7	No arrastra	02:48:10 p.m.	17/05/2014
77	1784	169	43.8	No arrastra	02:50:45 p.m.	17/05/2014
78	1710	162	42.2	No arrastra	02:53:20 p.m.	17/05/2014
79	1806	172	45.6	No arrastra	02:55:55 p.m.	17/05/2014
80	1734	164	44.3	No arrastra	02:58:30 p.m.	17/05/2014
81	1711	162	42.7	No arrastra	03:01:05 p.m.	17/05/2014
82	1656	155	41.6	No arrastra	03:03:40 p.m.	17/05/2014
83	1663	156	41.1	No arrastra	03:06:15 p.m.	17/05/2014
84	1792	170	42	No arrastra	03:08:50 p.m.	17/05/2014
85	1746	165	42.3	No arrastra	03:11:25 p.m.	17/05/2014
86	1670	157	41.6	No arrastra	03:14:00 p.m.	17/05/2014
87	1735	164	43.7	No arrastra	04:15:14 p.m.	17/05/2014
88	1667	156	42.1	No arrastra	04:17:48 p.m.	17/05/2014
89	1855	176	45.8	No arrastra	04:20:22 p.m.	17/05/2014
90	1669	156	43.1	No arrastra	04:22:56 p.m.	17/05/2014
91	1708	161	44.9	No arrastra	04:25:30 p.m.	17/05/2014
92	1592	150	43.6	No arrastra	04:28:04 p.m.	17/05/2014
93	1689	158	44.5	No arrastra	04:30:38 p.m.	17/05/2014
94	1717	162	43.7	No arrastra	04:51:10 p.m.	17/05/2014
95	1620	152	42.7	No arrastra	04:56:18 p.m.	17/05/2014
96	1715	162	43.2	No arrastra	05:01:26 p.m.	17/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

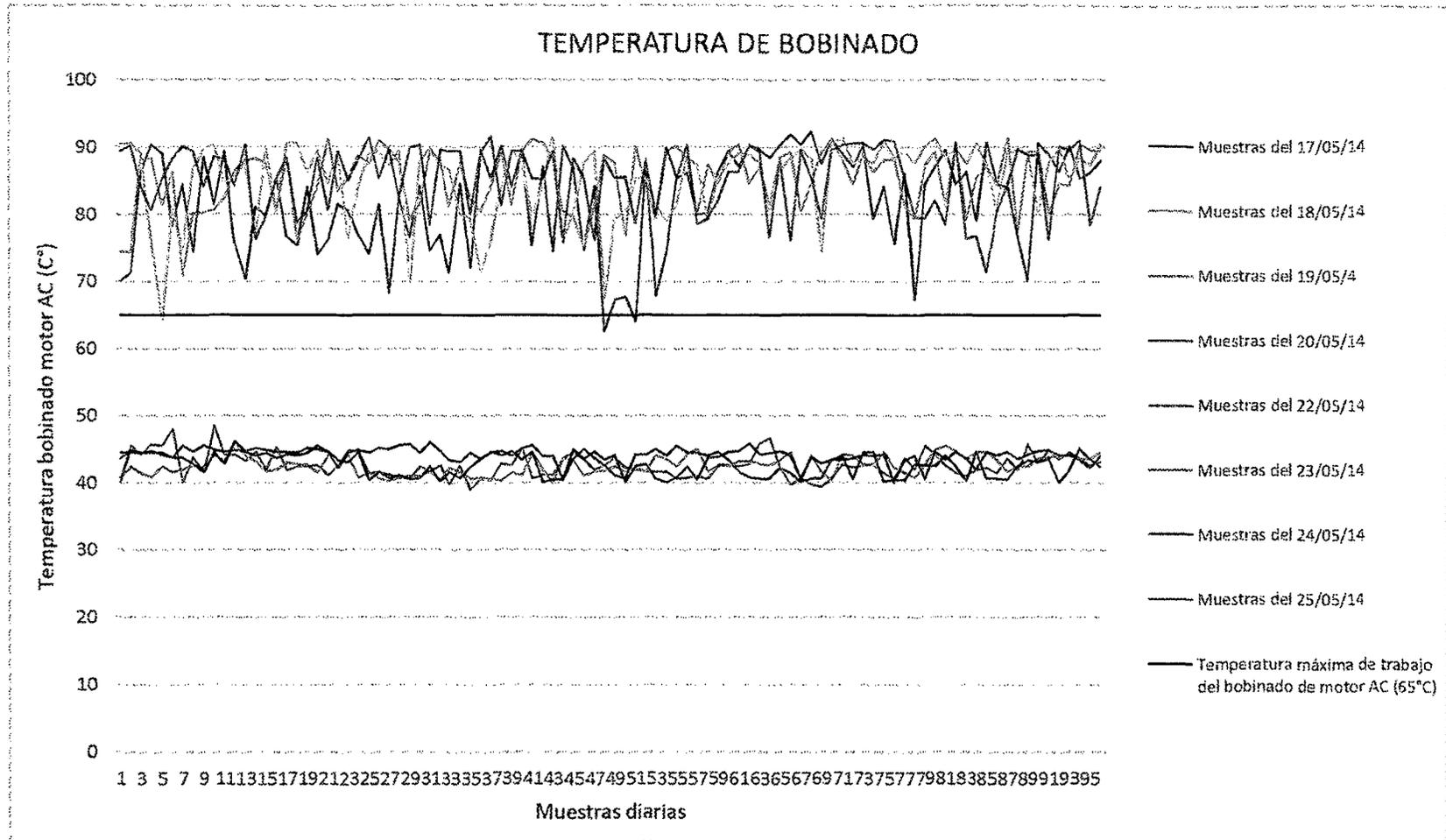


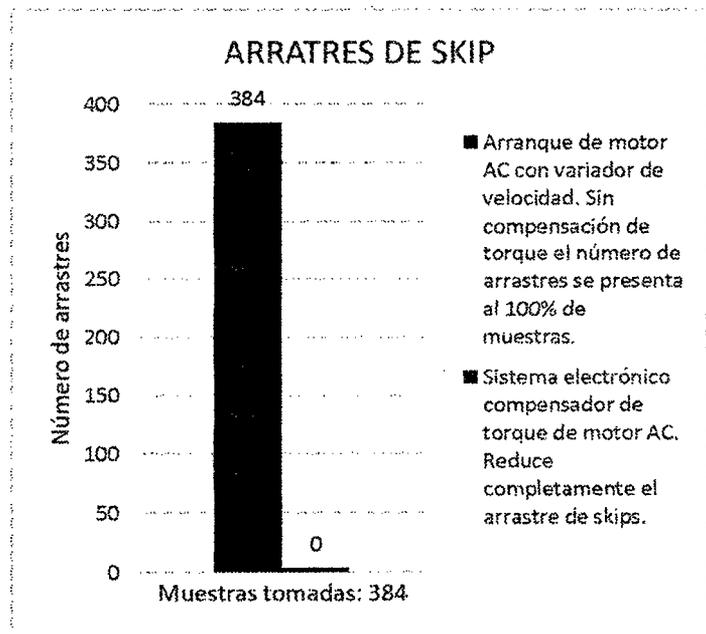
Figura N° 4.25. Representación gráfica de la temperatura del bobinado del motor AC al momento de producirse las corrientes pico.

Para validar el estudio del sistema electrónico compensador de torque se tomó en cuenta el número de arrastres de skips producidos antes y después de su implementación, esto se puede observar en el gráfico, en la siguiente tabla se muestra el número de arrastres del skip debido al peso que tiene a 500 metros de profundidad, notándose la eliminación de arrastres de skip en su totalidad al instalar el sistema electrónico compensador de torque en motor AC del winche.

**Tabla N° 4.12.** Arrastres de skips con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y sin la compensación de torque.

	<b>Arranque de motor AC con variador de velocidad.</b>	<b>Sistema electrónico compensador de torque de motor AC</b>
<b>Muestras tomadas</b>	384	384
<b>Arrastres de skip</b>	384	0
<b>% sin arrastres</b>	0%	100%

Fuente: Creado por el autor.



**Figura N° 4.26.** Representación gráfica de arrates de skips en el sistema electrónico compensador de torque en motor AC y en el sistema sin compensación de torque.

## 4.2. DISCUSIÓN

El sistema de arranque de motor AC con variador de velocidad de la Compañía Minera Casapalca S.A. produce arrastres que ocasionan pérdidas por choque de skip con la polea teniendo un 0% de veces sin arrastre. Con la implementación del sistema electrónico compensador de torque en motor AC los arrastres de skips se eliminan a un 100%. Esto ocurre porque en el momento de arranque los variadores inducen corriente de magnetización CC sobre el bobinado de los motores para generar un torque eléctrico que compense el torque mecánico de la carga, permitiendo que en el momento en que se liberen los frenos y la carga quede suspendida se obtenga el torque necesario para mover la carga en el sentido correcto de giro. La corriente de magnetización y su duración son los adecuados para garantizar que el bobinado no se deteriorará por sobrecalentamiento.

### 4.2.1. Prueba de hipótesis

#### Hipótesis general:

El sistema electrónico basado en PLC compensa el torque en el motor AC de winche durante el arranque y evita choques del Skip con la polea de izaje.

Las hipótesis de trabajo son las siguientes:

**H<sub>0</sub>:** El sistema electrónico basado en PLC no compensa el torque en el motor AC de winche durante el arranque ni evita choques del Skip con la polea de izaje.

**H<sub>a</sub>:** El sistema electrónico basado en PLC compensa el torque en el motor AC de winche durante el arranque y evita choques del Skip con la polea de izaje.

Donde:

**H<sub>0</sub>:** es la hipótesis nula y

**H<sub>a</sub>:** es la hipótesis alterna.

Agrupamos los datos de consumo de torque máximo al momento de arranque de la Tabla 4.10 sin el sistema de compensación en frecuencias, para tal efecto se hace uso del SPSS.

Frecuencias:

N	Válidos	384
	Perdidos	0

Tabla N° 4.13. Torque (Nm) de arranque sin el sistema de compensación de torque en motor AC.

	Torque en Nm	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válidos	-826	1	0.26	0.26	0.26
	-944	4	1.04	1.04	1.30
	-1062	9	2.34	2.34	3.65
	1180	45	11.72	11.72	15.36
	-1298	61	15.89	15.89	31.25
	-1416	50	13.02	13.02	44.27
	-1534	60	15.63	15.63	59.90
	-1652	45	11.72	11.72	71.61
	-1770	85	22.14	22.14	93.75
	-1888	13	3.39	3.39	97.14
	-2124	4	1.04	1.04	98.18
	-2242	7	1.82	1.82	100.00
	<b>Total</b>		384	100.00	100.00

FUENTE: Sistematizada por el tesista.

Descriptivos:

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Tip.
Torque máximo de arranque en el sistema sin compensación de torque en motor AC	384	-826.0	-2242.0	1241.151	78.489
	384				

Para el caso del sistema electrónico compensador de torque en motor AC la media de torque máximo es 9.0123.

Se desea probar que se tiene una compensación de torque en un 95%.

Por lo que la nueva media debería ser  $\mu_1 = (1 - 0.95) * \mu_0 = 331.8029$

Por lo que, recopilando:

$$\mu_0 = 1241.151$$

$$\mu_1 = 74.4690$$

$$\sigma = 78.489$$

Tabla N° 4.14. Tabla de niveles de confianza para  $z_\alpha$

Nivel de confianza	99.73%	99%	98%	96%	95.45%	95%	90%	80%	68.27%	50%
$Z_\alpha$	3.00	2.58	2.33	2.05	2.00	1.96	1.645	1.28	1.00	0.6745

Para un nivel de significación al 95 %, el valor de  $z_\alpha = 1.96$

En general, para eventos de cola única inferior, el intervalo de aceptación de la hipótesis alterna es

$$\left(-\infty, \mu_1 - z_\alpha * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

En nuestro caso, parte de los parámetros ya mostrados, el valor de  $n = 384$ . Y por tanto, el intervalo de aceptación de la hipótesis alterna es

$$\left(-\infty, 74.4699 - 1.96 * \frac{78.489}{\sqrt{384}}\right) = (0,06661)$$

#### Prueba de la hipótesis general:

Como la media de torque máximo con el sistema electrónico compensador de torque en motor AC es 9.0123, que está en la zona de derecha se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna con un nivel de confianza de 95 %. Quedando de esta manera probada y demostrada la hipótesis general.

#### Hipótesis específica

- El nivel de intensidad de corriente de 2000 amperios entregado por el variador al motor AC genera la compensación de torque necesaria en el momento de arranque.
- La subrutina implementada en el PLC genera el tiempo de magnetización de 800 ms en el motor AC para mantener la suficiente compensación de torque y evitar que el bobinado del motor se sobrecaliente antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

Las hipótesis específicas de trabajo son las siguientes:

H<sub>01</sub>: El nivel de intensidad de corriente de 2000 amperios entregado por el variador al motor AC no genera la compensación de torque necesaria en el momento de arranque.

H<sub>11</sub>: El nivel de intensidad de corriente de 2000 amperios entregado por el variador al motor AC genera la compensación de torque necesaria en el momento de arranque.

H<sub>02</sub>: La subrutina implementada en el PLC no genera el tiempo de magnetización de 800 ms en el motor AC para mantener la suficiente compensación de torque y evitar que el bobinado del motor se sobrecaliente antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

H<sub>12</sub>: La subrutina implementada en el PLC genera el tiempo de magnetización de 800 ms en el motor AC para mantener la suficiente compensación de torque y evitar que el bobinado del motor se sobrecaliente antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

Donde:

H<sub>01</sub>: es la hipótesis específica 1 nula.

H<sub>11</sub>: es la hipótesis específica 1 alterna

H<sub>02</sub>: es la hipótesis específica 2 nula

H<sub>12</sub>: es la hipótesis específica 2 alterna.

Para proceder con la prueba de la hipótesis específica 1, se agrupan las muestras de corriente pico promedio producidas en el momento de arranque del motor AC (Ver gráfica 4.24), demostrándose que se genera el torque necesario para la salida adecuada de los skips (hasta 185% del torque nominal del motor).

Para proceder con la prueba de la hipótesis específica 2, se toma en cuenta la temperatura del bobinado (como consecuencia de los picos de corriente) al momento de arranque, Figura 4.27, donde se observa que la temperatura de estas no superan los 65°C (temperatura límite de trabajo) cuando se implementa el sistema electrónico compensador de torque en motor AC.

#### **Prueba de la hipótesis específica 1:**

- El sistema electrónico compensador de torque en motor AC, genera el torque necesario para la salida de los skips sin arrastre con una alimentación de 2000 A de corriente de magnetización.

#### **Prueba de la hipótesis específica 2:**

- El tiempo producido en la subrutina del PLC es el necesario para que mantener una temperatura de trabajo menor a 65°C en el bobinado del motor evitando su desgaste prematuro, como se puede apreciar en la figura 4.27.

## CONCLUSIONES

1. El sistema electrónico basado en PLC compensa el torque de motor AC de winche durante el arranque de los motores AC, evitando de esta manera el arrastre del skip ubicado en la zona volteo en un 100%.
2. El nivel de intensidad de corriente de magnetización de 2000 A compensa el torque en el motor AC al momento del arranque.
3. La creación de una subrutina en el programa ladder del PLC ControlLogix controla el tiempo de magnetización de 800 ms manteniendo la compensación de torque antes de iniciar los movimientos de rotación en el sistema de winche.

## RECOMENDACIONES

1. Si se desea aumentar la profundidad de extracción de mineral a más de 500 metros, se deberá reprogramar tanto la corriente de magnetización como el tiempo de duración de la misma en el PLC ControlLogix y en el drive ACS800 respectivamente ya que el torque mecánico de la carga aumentará.
2. La corriente de magnetización jamás deberá pasar de 2500 A ya que éste es el límite soportado por los módulos IGBTs del drive ACS800.
3. El tiempo de magnetización deberá ser el adecuado para no deteriorar el aislamiento del bobinado del motor AC, teniendo como referencia 85°C de temperatura máxima de trabajo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1]. Merino AJM. Arranque industrial de motores asíncronos. Teoría, cálculo y aplicaciones. 2a ed. Madrid: McGraw-Hill; 1995.
- [2]. Serrano IL, Cervera VA, Riera GM. Motores asíncronos trifásicos. Descripción general y teoría básica. 1a ed. España: Latinoamérica; 1999.
- [3]. Serrano IL, Cervera VA, Riera GM. Motores asíncronos trifásicos. Curvas características y otros datos de interés industrial. 2a ed. España: Latinoamérica; 1999.
- [4]. Talk K. Electric Motor Sandtheir Controls. 1a ed. Reino Unido: Oxford Science Publications; 2000.
- [5]. ACS800 Manual de Firmware 2009; 124.
- [6]. Marcelo A, Finn EJ. Campos y Ondas. 3a ed. Madrid: Pearson; 2004.
- [7]. User`s Manual Ethernet Adapter Module RETA-01 2007; 1003.
- [8]. Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. 7 ed. España: Pearson; 2010.

## ARTÍCULO CIENTÍFICO

## SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE EN MOTOR AC DE WINCHE EN LA COMPAÑÍA MINERA CASAPALCA S. A. – HUAROCHIRÍ – LIMA

Cristhiam José Gonzalo Oré

Universidad Nacional de Huancavelica Facultad de Ingeniería Electrónica – Sistemas,  
Escuela Académico Profesional de Electrónica

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se diseña e implementa un sistema electrónico compensador de torque de motores AC para evitar que el skip choque con la polea de izaje (arrastre de skip), los dos motores tienen características idénticas y son controlados por variadores de velocidad o drives ACS-800, las muestras de estudios fueron tomadas en la Compañía Minera Casapalca S.A. El sistema se basa en el control de drives desde un Controlador Lógico Programable (PLC) ControlLogix, el programa de aplicación recepciona una señal de referencia proveniente de un joystick (entre 0 y 10 voltios) y envía la señal procesada entre 0 y 20 mA hacia los drives a través del módulo RETA-01 para que el motor AC tenga el torque suficiente al momento de arranque y logre izar una carga de 9.5 ton que se encuentra a 500 m de profundidad. Para la evaluación este sistema se tomaron 384 muestras antes y después de su implementación durante 08 días desde el 17/05/14 al 20/05/14 y del 21/05/14 al 25/05/14, a partir de la 8:00 am hasta las 5:00 pm. La toma de muestras se realiza a través del programa DriveWindows que se encarga de monitorear los parámetros de señales de entrada y salida en el variador. Los datos adquiridos se almacenan en una hoja de cálculo Excel. Al hacer el tratamiento estadístico de los datos se llega a la conclusión que teniendo una corriente de magnetización de 2000 amperios que se producen en 800 milisegundos se genera el torque eléctrico necesario para elevar la carga evitando los arrastres de skips al 100%.

**Palabras clave:** Torque, convertidor de frecuencia drive, skip, magnetización, Fieldbus.

### ABSTRACT

Presently investigation work is designed and it implements a system electronic compensator of torque of motors AC to avoid that the skip collides with the izaje (skip haulage) pulley, the two motors have characteristic identical and they are controlled by variadores of speed or drives ACS-800, the samples of studies were taken in the Mining Company Casapalca S.A. The system is based on the drives control from a Logical Programmable (PLC) Controller ControlLogix, the program of application recepciona a reference sign coming from a joystick (between 0 and 10 volts) and he/she sends the sign processed between 0 and 20 MA toward the drives through the module CHALLENGE-01 so that the motor AC has the enough torque to the outburst moment and be able to hoist a load of 9.5 rhyme that is 500 m of depth. For the evaluation this system took 384 you show before and after its implementation during 08 days from the 17/05/14 at the 20/05/14 and of the 21/05/14 at the 25/05/14, starting from the 8:00 am until the 5:00 pm. The taking of samples is carried out through the program DriveWindows that takes charge of monitorear the parameters of entrance signs and exit in the variador. The acquired data are stored in a calculation leaf Excel. When making the statistical treatment of the data you reaches the conclusion that having a current of magnetization of 2000 amperes in 800 miliseconds the

electric torque necessary is generated to elevate the load avoiding the skips haulages to 100%.

**Keywords:** Torque, convertor of frequency or drive, skip, magnetization, Fieldbus.

**INTRODUCCIÓN**

La Compañía Minera Casapalca S.A. tiene un winche de izaje que traslada mineral desde 500 m de profundidad. El winche de izaje tiene dos motores AC que se encargan de mover la posición de dos skips en la estructura del Pique. Los motores AC son maniobrados por drives o variadores de velocidad, teniendo como principal problema el arrastre de los skips al momento de arrancar los motores ya que también en este instante se liberan los frenos y los skips quedan suspendidos mientras que el motor aún no ha desarrollado el torque eléctrico necesario para mantener o elevar el peso de la carga. Para solucionar este problema se planteó diseñar e implementar un sistema electrónico compensador de torque en motor AC. Se planteó como hipótesis: que la implementación de un sistema electrónico compensador de torque evitaría el arrastre de los skips al momento de arrancar los motores, para que se tenga una salida correcta de izaje de mineral. Con la implementación del sistema electrónico se llegó a probar el cumplimiento de las hipótesis a partir de muestras generadas en forma aleatoria en base a datos reales.

**MATERIAL Y MÉTODOS**

En el desarrollo de este trabajo se ha utilizado diversos materiales industriales entre los que más resaltan: las tablas de toma de datos, PLC ControlLogix, tarjeta RETA-01, software DriveWindow y RSLogix5000 para el monitoreo y adquisición de datos del proceso, el programa Excel para registrar y procesar los datos obtenidos, computadora portátil de buenas prestaciones para soportar el desarrollo e implementación de la interface HMI con el Operador. Se empleó el método experimental para adquirir los datos de torque, corriente pico y temperatura de bobinado en el sistema eléctrico.

**RESULTADOS**

Como resultado se tuvo la compensación de torque en motor AC. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la figura 01. El proceso de control comienza en el tablero de control está ubicado en la caseta del operador, de donde se realiza las maniobras para poner en operación al equipo winche, en este tablero encontramos los botones de control como: On/Off, parada de emergencia, reset, joystick, hombre muerto, encloche/desencloche, test de frenos, modo de control manual/semiautomático. Todas estas señales son enviadas hacia el PLC. En este tablero el control de velocidad de los motores se realiza con el manejo del joystick que por cableado lleva la señal de control al módulo RTD del PLC. En la caseta del operador también se cuenta con un Panel View que es la interface hombre-máquina.

El PLC ControlLogix es el encargado de procesar todas las señales de entrada y mediante un programa controlar la maniobrabilidad del equipo winche, también se encarga de proteger al equipo winche cuando se presenten situaciones riesgosas

La tarjeta RETA-01 es la interface que comunica el PLC con el variador a través del protocolo de comunicación CIP o Protocolo Industrial de Comunicación. Ésta tarjeta se

comunica físicamente con el PLC mediante la red Ethernet/IP y permite reconocer al variador de velocidad como si fuera un módulo en el PLC. De esta manera el PLC tiene control y supervisión sobre el funcionamiento del variador. El proceso de control se puede visualizar en la figura 02.

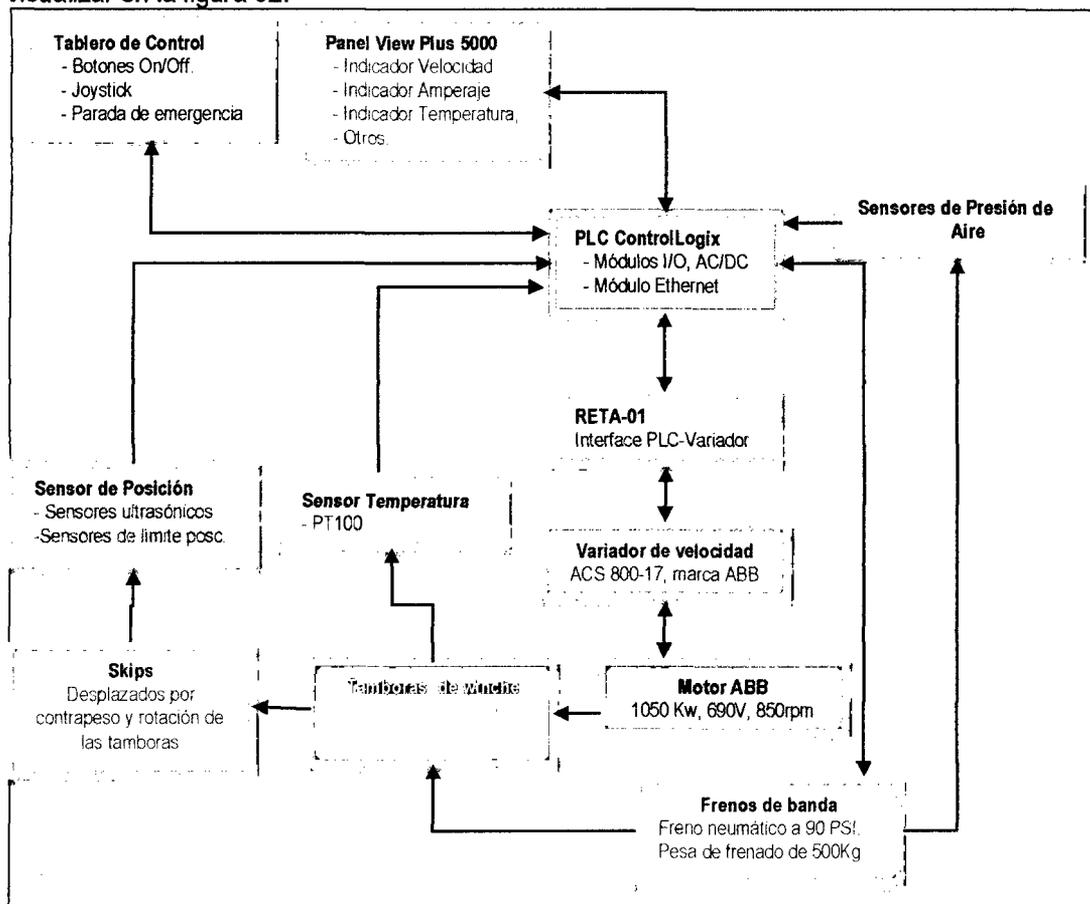


Figura 01. Diagrama de bloques para el control del sistema compensador de torque

El Variador de velocidad o drive es el controlador del motor y la interface que existe entre la parte de control y fuerza del sistema. Logra el control de velocidad de las rpm del motor actuando sobre la frecuencia y voltaje de alimentación del motor. Este convertidor de frecuencia es alimentado con 690VAC de donde toma la alimentación a la parte de control y de fuerza.

El motor ABB es un motor AC de 1050Kw encargado de hacer rotar las taboras del winche mediante un sistema mecánico (reductor de velocidad). El motor por su elevada potencia tiene instalados dos ventiladores encargados de refrigerar el bobinado del motor cuando entre en pleno funcionamiento.

Las taboras de winche son el soporte mecánico circular donde se enrollan y desenrollan los cables que sujetan los skips, logrando de esta manera el movimiento vertical de los skips por todo el pique, los cables están encarretados de tal manera que cuando las taboras giran uno se envuelve y el otro se desenvuelve. Tienen un diámetro de 2 metros

y un sistema de encloche/desencloche que ayuda a colocar los skips en cualquier posición, así por ejemplo cuando se incrementa la profundidad del pique y se tenga que trasladar mineral desde más profundidad.

Los skips son contenedores de acero en los que se llena el mineral para ser trasladados del subsuelo hacia superficie. El material del que están fabricados es acero T21 que soporta el impacto de las rocas y el desgaste que generan las mismas en un ratio de la descarga. Tienen un peso bruto de 4,7 Ton y tienen la capacidad de trasladar una carga de 9.5Ton, haciendo un peso aproximado de 14.2 Ton cuando traslada el material a plena carga.

Los frenos de banda son accionados mecánicamente por una pesa de 500 Kg. y se liberan con la activación de cilindros neumáticos a una presión de 90 PSI. Los frenos que sujetan las bandas de las tambores son de asbesto que permite una sujeción rápida y efectiva a las tambores cuando en PLC encuentre una situación riesgosa durante la operación del equipo. Con situación riesgosa nos referimos a por ejemplo: sobrevelocidad, situación de hombre seguro, límite de recorrido, baja presión de aire, entre otros.

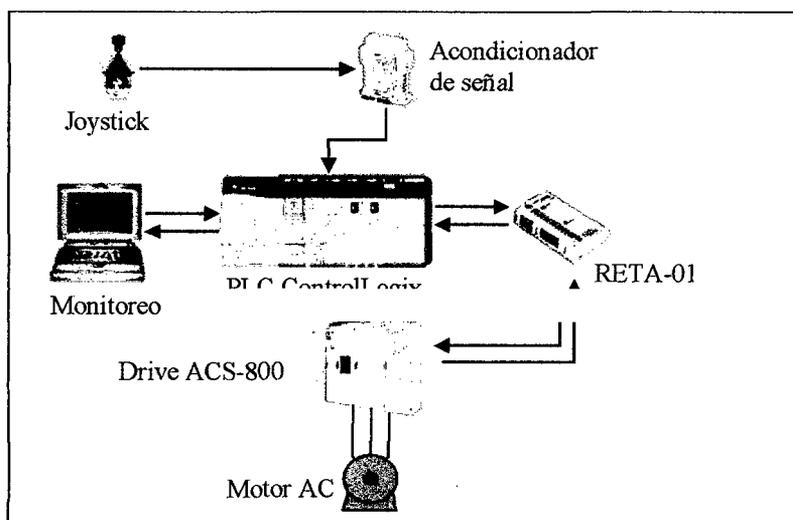


Figura 02. Diagrama de flujo de control del Joystick hacia los motores

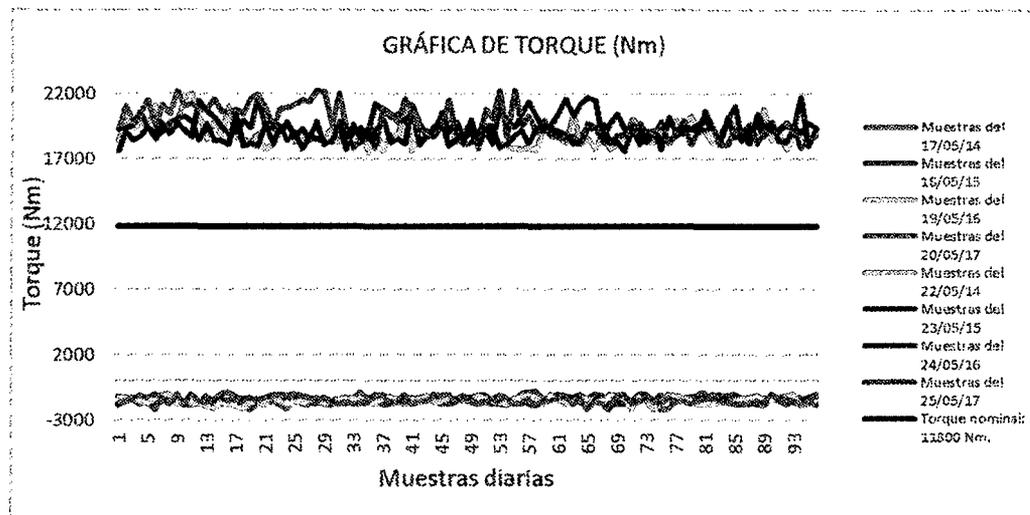
Los sensores de temperatura se encargan de informar la temperatura de las chumaceras que soportan las tambores y el reductor de velocidad al PLC. Estos sensores son PT100 y llevan la señal hacia acondicionadores que luego se encargan de enviar la señal al PLC. Los sensores de posición han sido instalados para informar al PLC que los skips están pasando por puntos determinados en todo su recorrido. Así por ejemplo los sensores de límite de posición están instalados en los extremos de recorrido de los skips: uno más arriba de la zona volteo y otro debajo de la zona carguío. Del mismo modo están instalados sensores ultrasónicos en 3 puntos por cada compartimento del pique, antes de llegar a la zona de volteo: a 120 m, a 50 m y a 0.50 m, estos sensores nos ayudan a realizar la rampa de deceleración cuando se iza mineral en modo semiautomático.

Los sensores de presión de aire informan la presión de aire con la que se cuenta en las tuberías neumáticas que activan la liberación de los frenos de banda y por ende permiten que las taboras puedan girar libremente.

Para efectos de análisis estadístico se calcula el torque máximo que se generará en el momento de arranque del motor AC (esta variará dependiendo de la carga a ser elevada) comparándolo con el torque nominal que se genera cuando el motor está a pleno funcionamiento. En nuestro proceso estamos usando un drive como controlador de velocidad del motor, la corriente pico llega a elevarse hasta 2,2 veces la corriente nominal del motor (por control del drive), lo mismo sucede con el torque, el torque nominal se determina con la siguiente fórmula:

$$T_{on} = (9550 \cdot P) / \text{rpm}$$

$$T_{on} = 11796 \text{ Nm} \approx 11800 \text{ Nm.}$$



**Figura 03.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque (Nm) en el sistema electrónico compensador de torque de motor AC y del sistema de arranque de motor AC sin compensación de torque.

## DISCUSIÓN

El sistema de arranque de motor AC con variador de velocidad de la Compañía Minera Casapalca S.A. produce arrastres que ocasionan pérdidas por choque de skip con la polea teniendo un 0% de veces sin arrastre. Con la implementación del sistema electrónico compensador de torque en motor AC los arrastres de skips se eliminan a un 100%. Esto ocurre porque en el momento de arranque los variadores inducen corriente de magnetización CC sobre el bobinado de los motores para generar un torque eléctrico que compense el torque mecánico de la carga, permitiendo que en el momento en que se liberen los frenos y la carga quede suspendida se obtenga el torque necesario para mover la carga en el sentido correcto de giro. La corriente de magnetización y su duración son los adecuados para garantizar que el bobinado no se deteriorará por sobrecalentamiento.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Merino AJM. Arranque industrial de motores asíncronos. Teoría, cálculo y aplicaciones. 2a ed. Madrid: McGraw-Hill; 1995.
- [2]. Serrano IL, Cervera VA, Riera GM. Motores asíncronos trifásicos. Descripción general y teoría básica. 1a ed. España: Latinoamérica; 1999.
- [3]. Serrano IL, Cervera VA, Riera GM. Motores asíncronos trifásicos. Curvas características y otros datos de interés industrial. 2a ed. España: Latinoamérica; 1999.
- [4]. Talk K. *Electric Motor Sandtheir Controls*. 1a ed. Reino Unido: Oxford SciencePublications; 2000.
- [5]. ACS800 Manual de Firmware 2009; 124.
- [6]. Marcelo A, Finn EJ. Campos y Ondas. 3a ed. Madrid: Pearson; 2004.
- [7]. User`s Manual Ethernet Adapter Module RETA-01 2007; 1003.
- [8]. ACS800-17 Manual de Hardware 2005; 132.

**ANEXOS**

## A. INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE

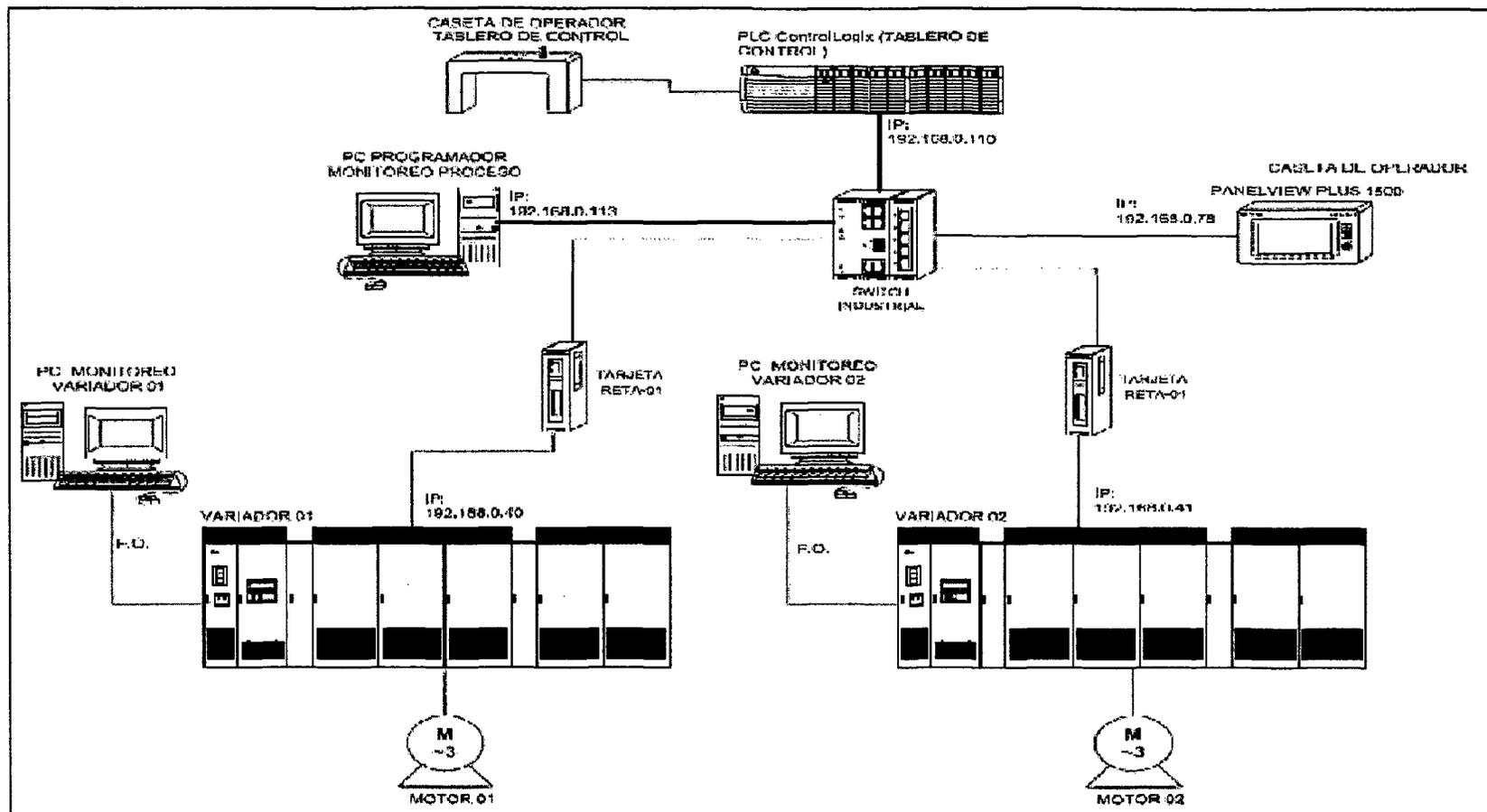
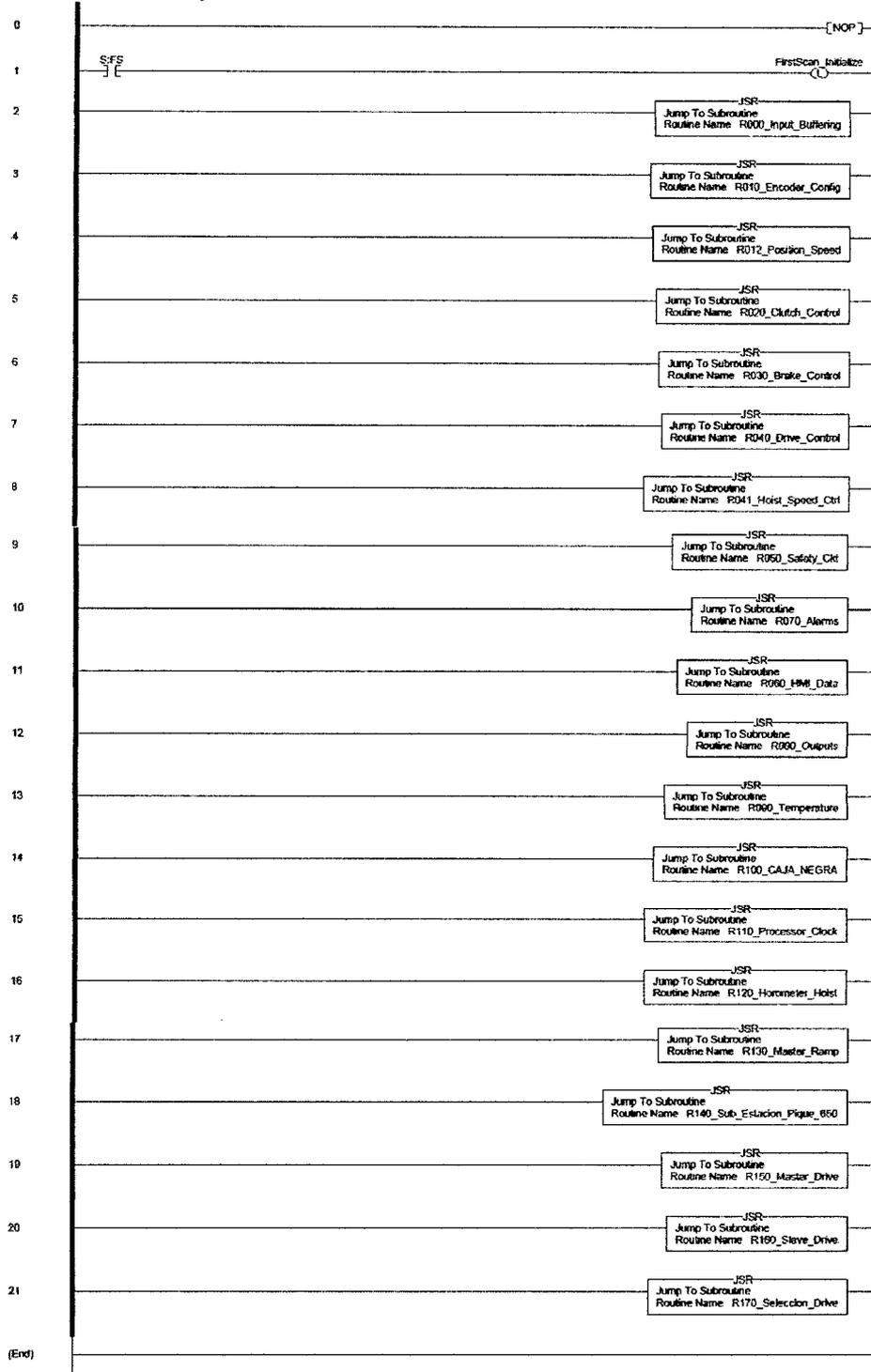


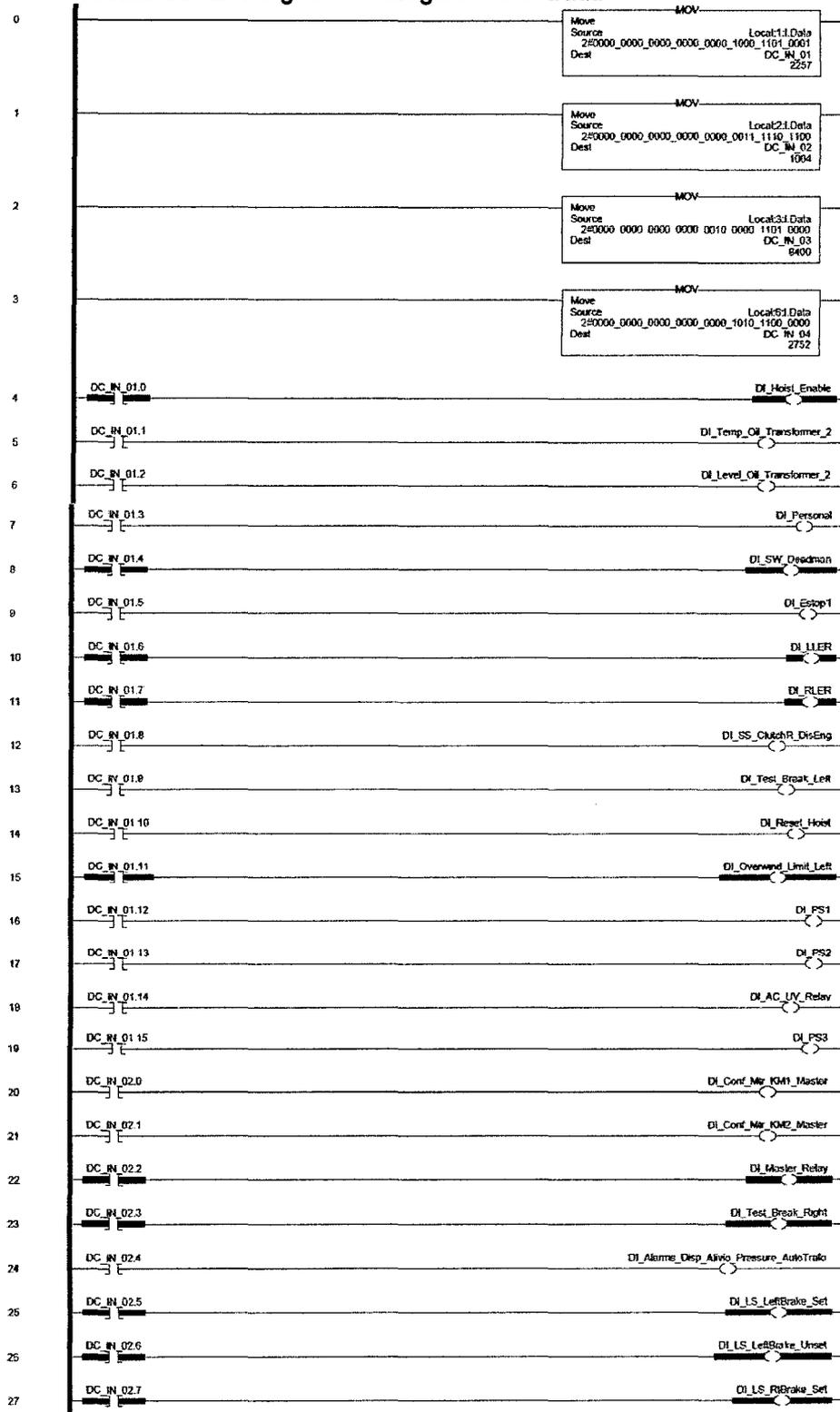
Figura A.1: Esquema del sistema electrónico para compensación de torque de motores AC del sistema de winche en la Compañía Minera Casapalca S.A

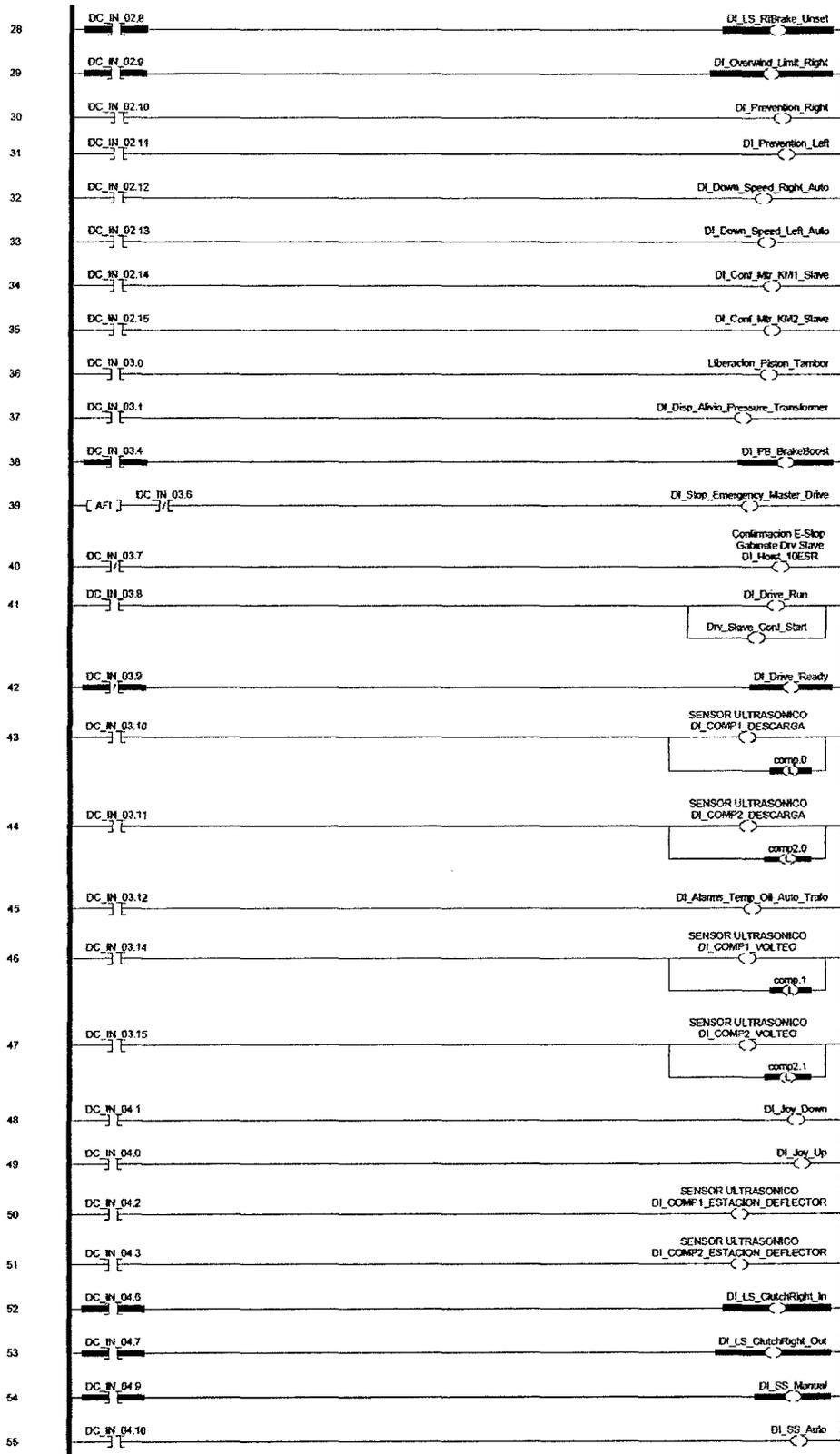
## B. DIAGRAMA LADDER DEL SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE

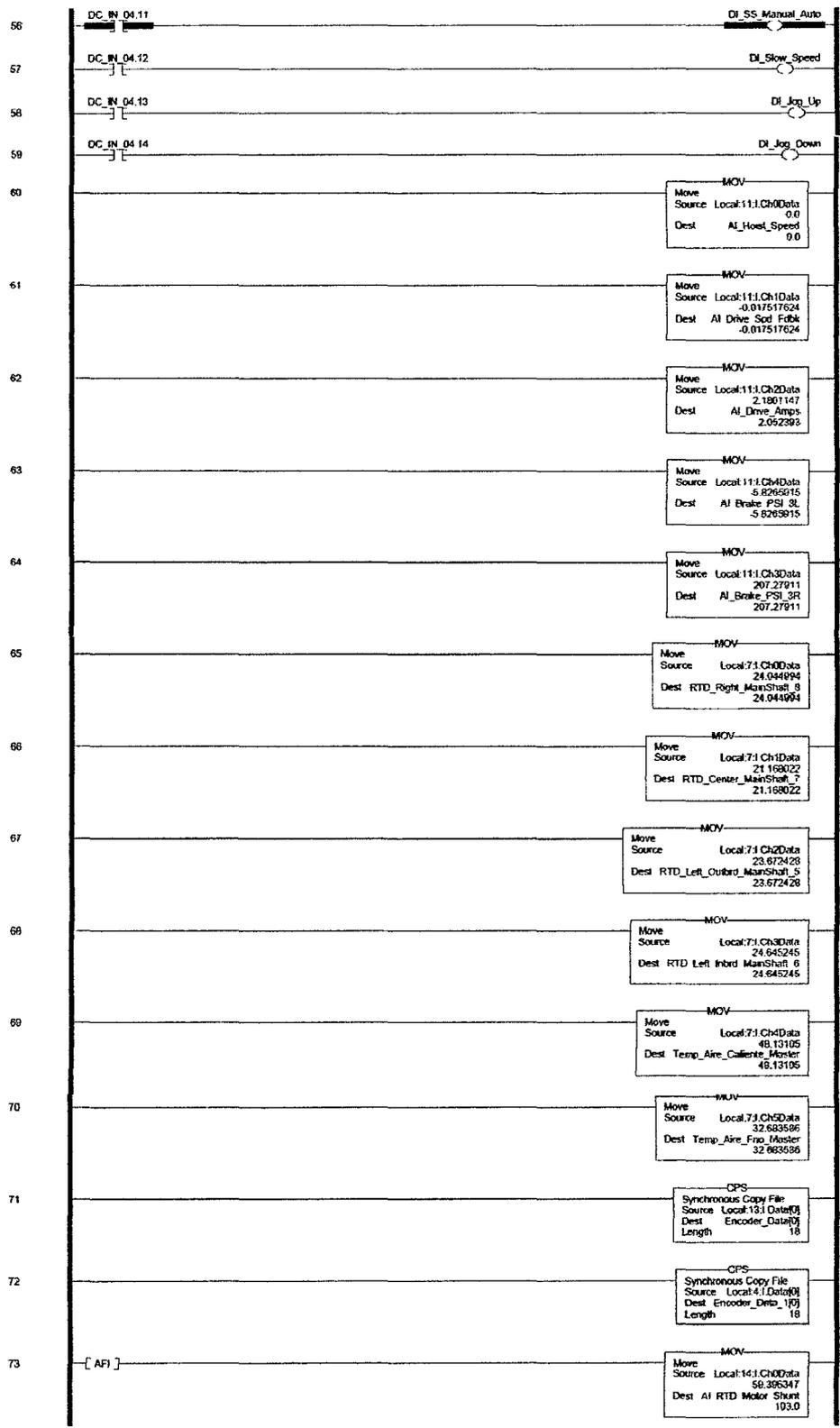
### B.1 Rutina Principal

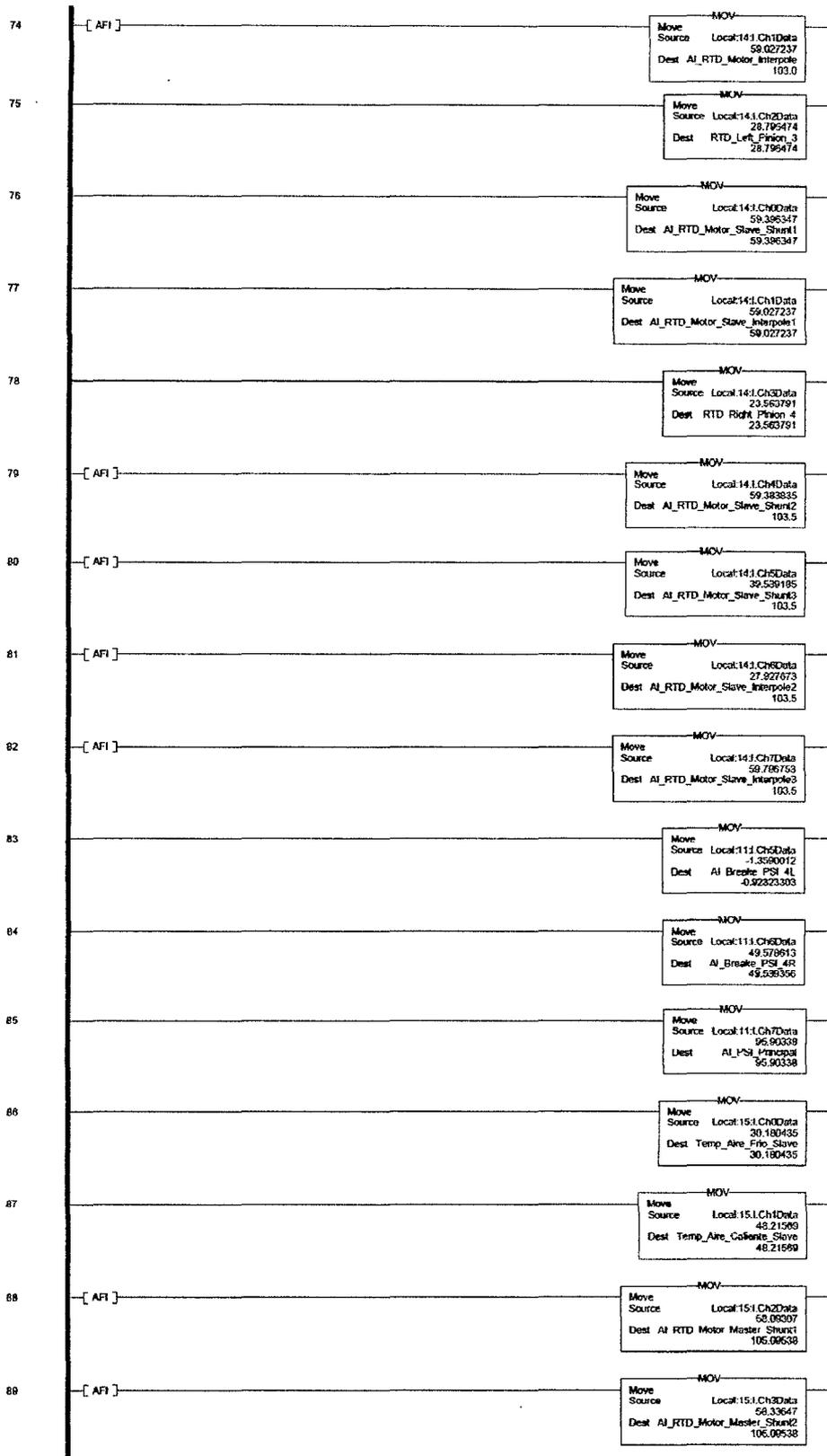


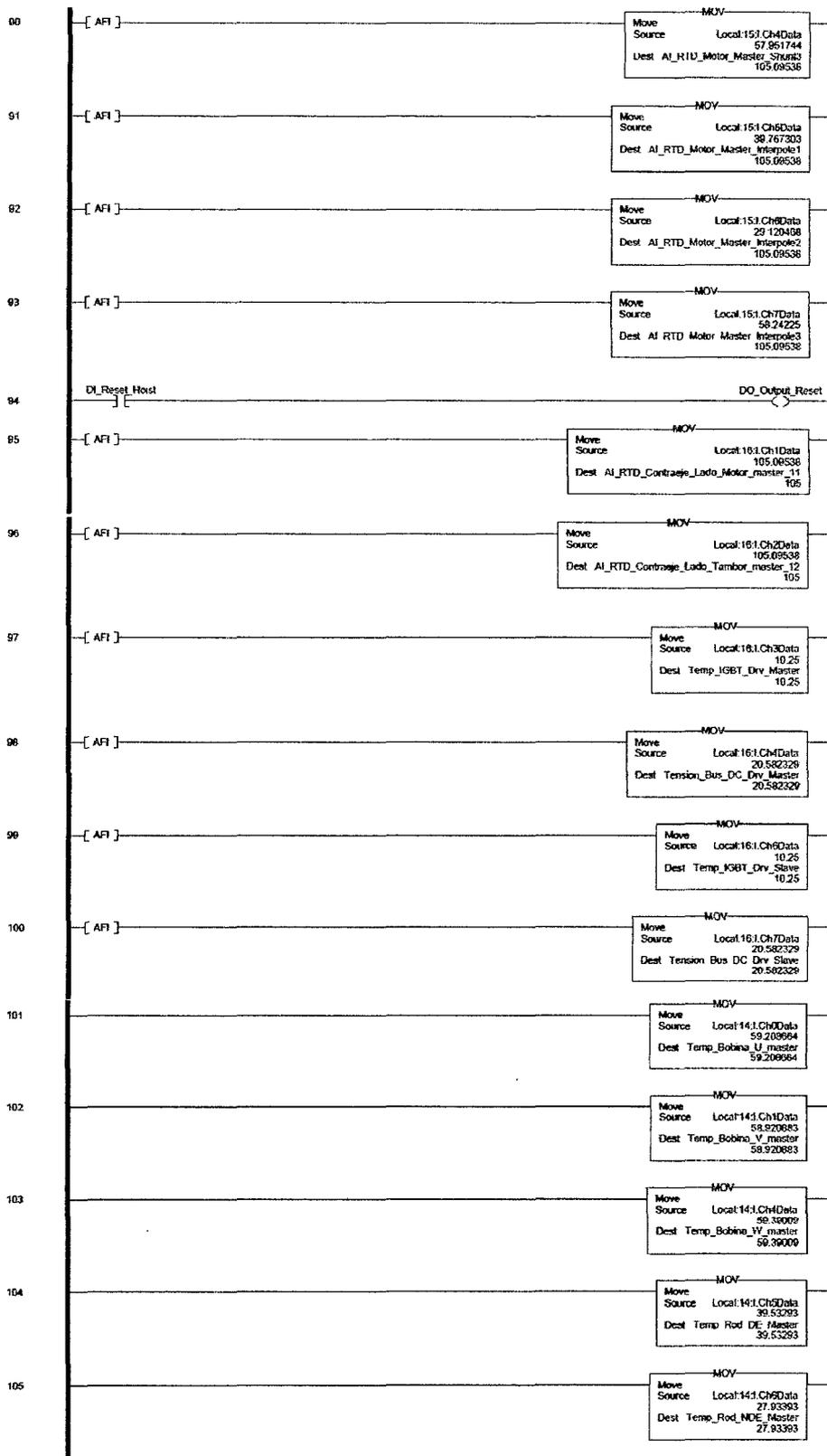
## B.2 Subrutina Señales digitales/analógicas de entrada

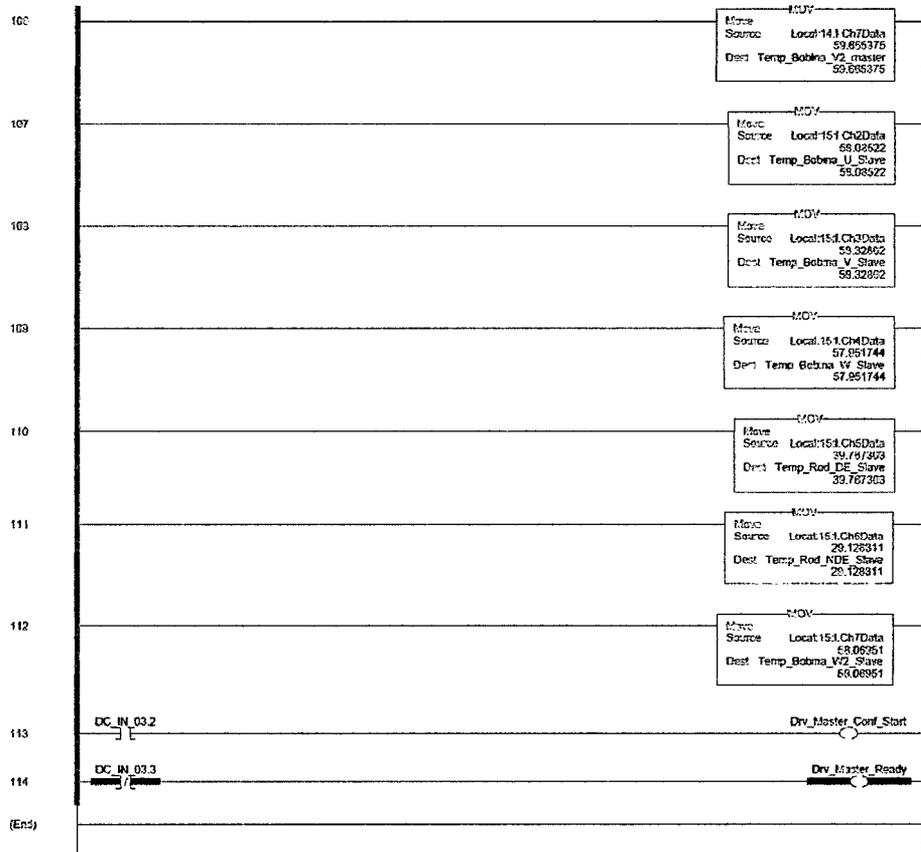




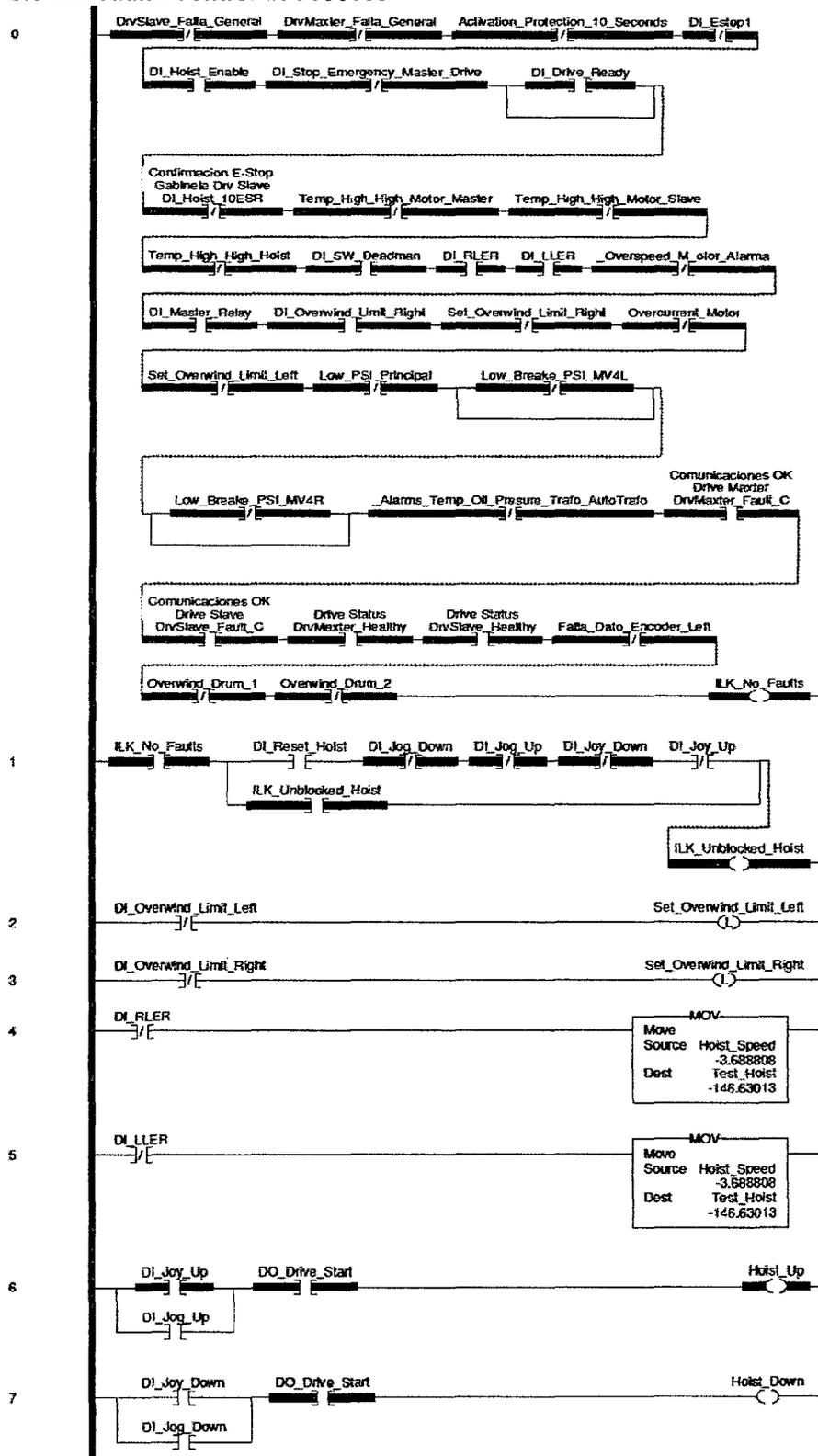




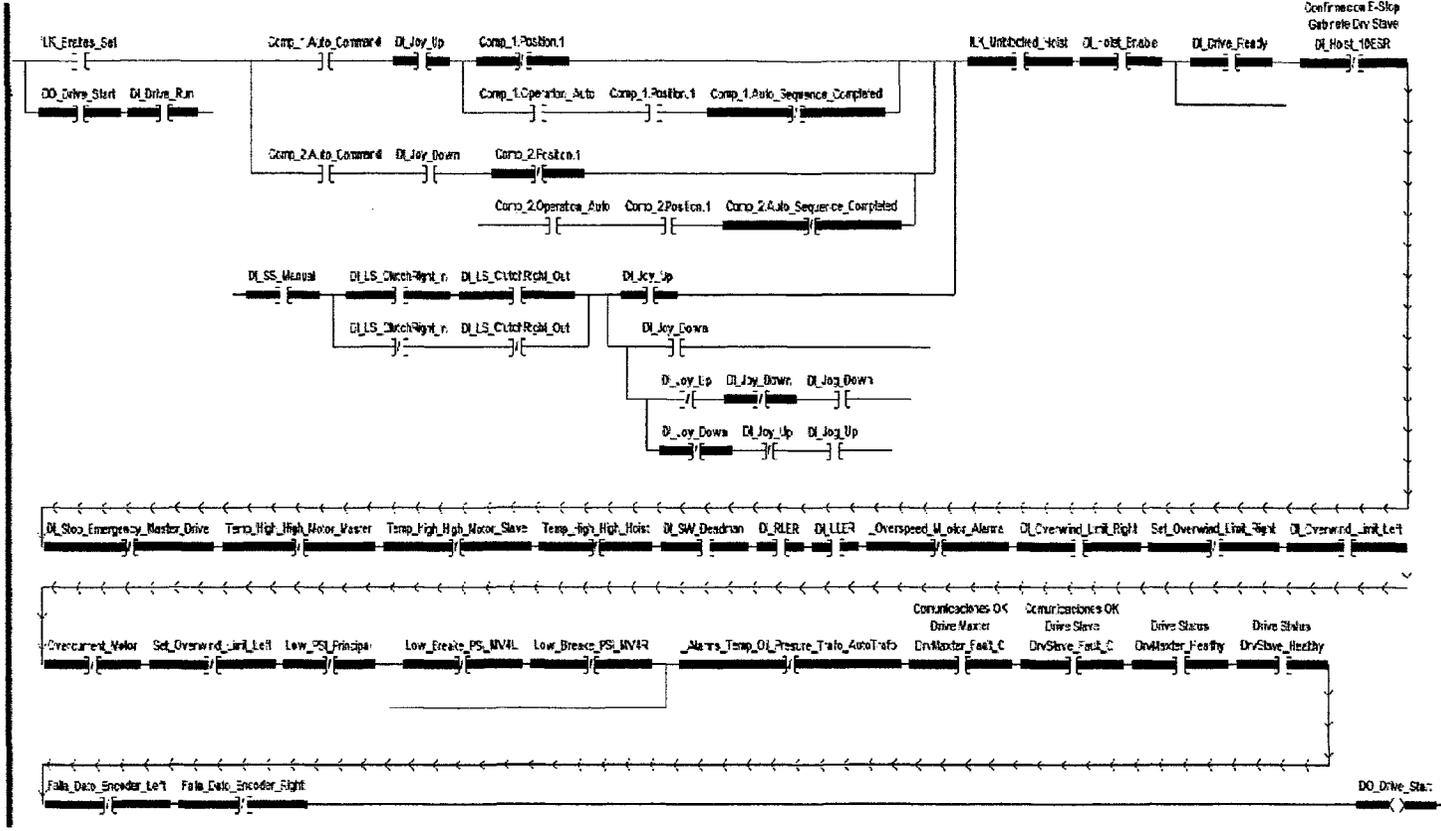




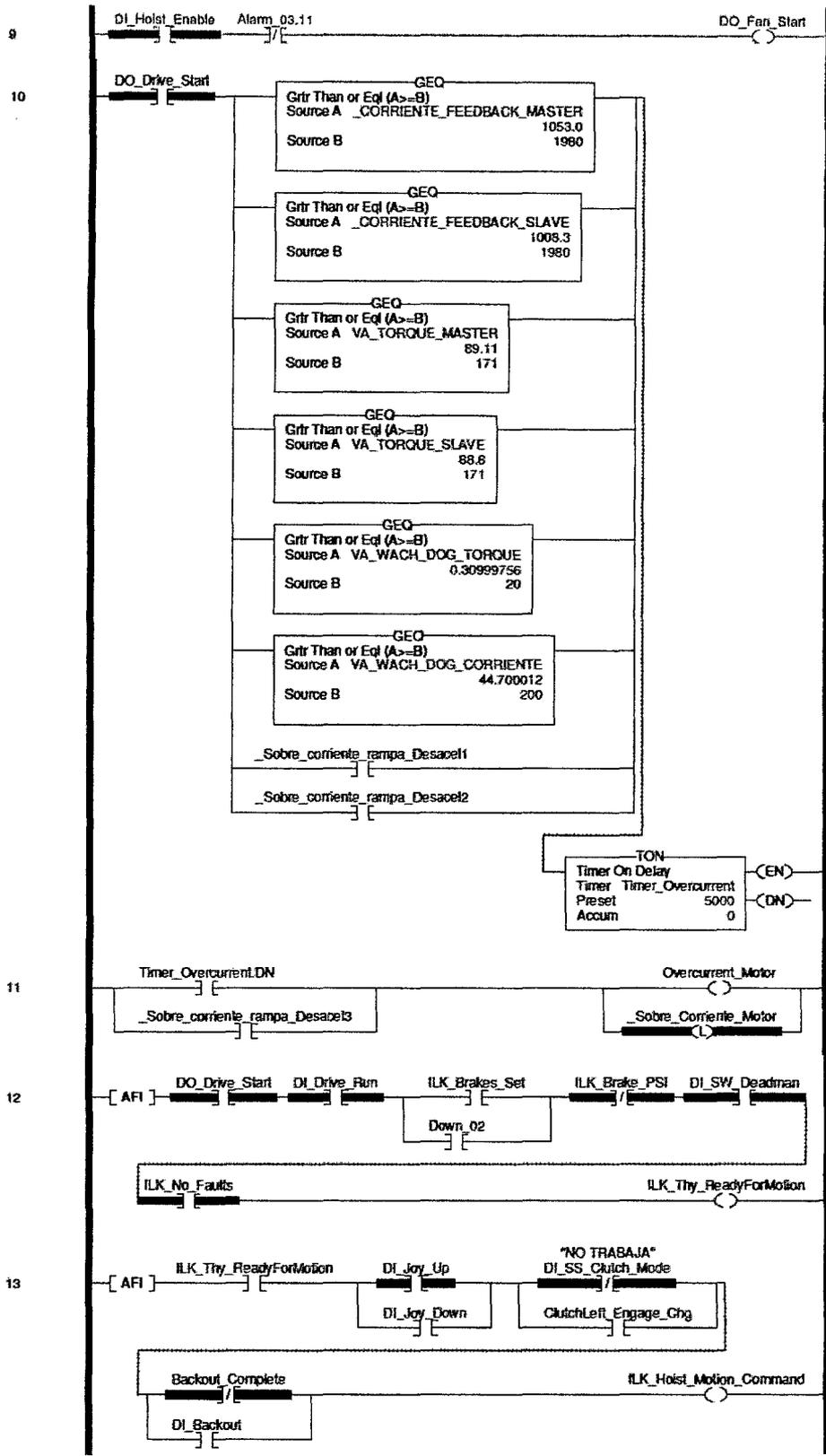
### B.3 Sub rutina Control de Proceso

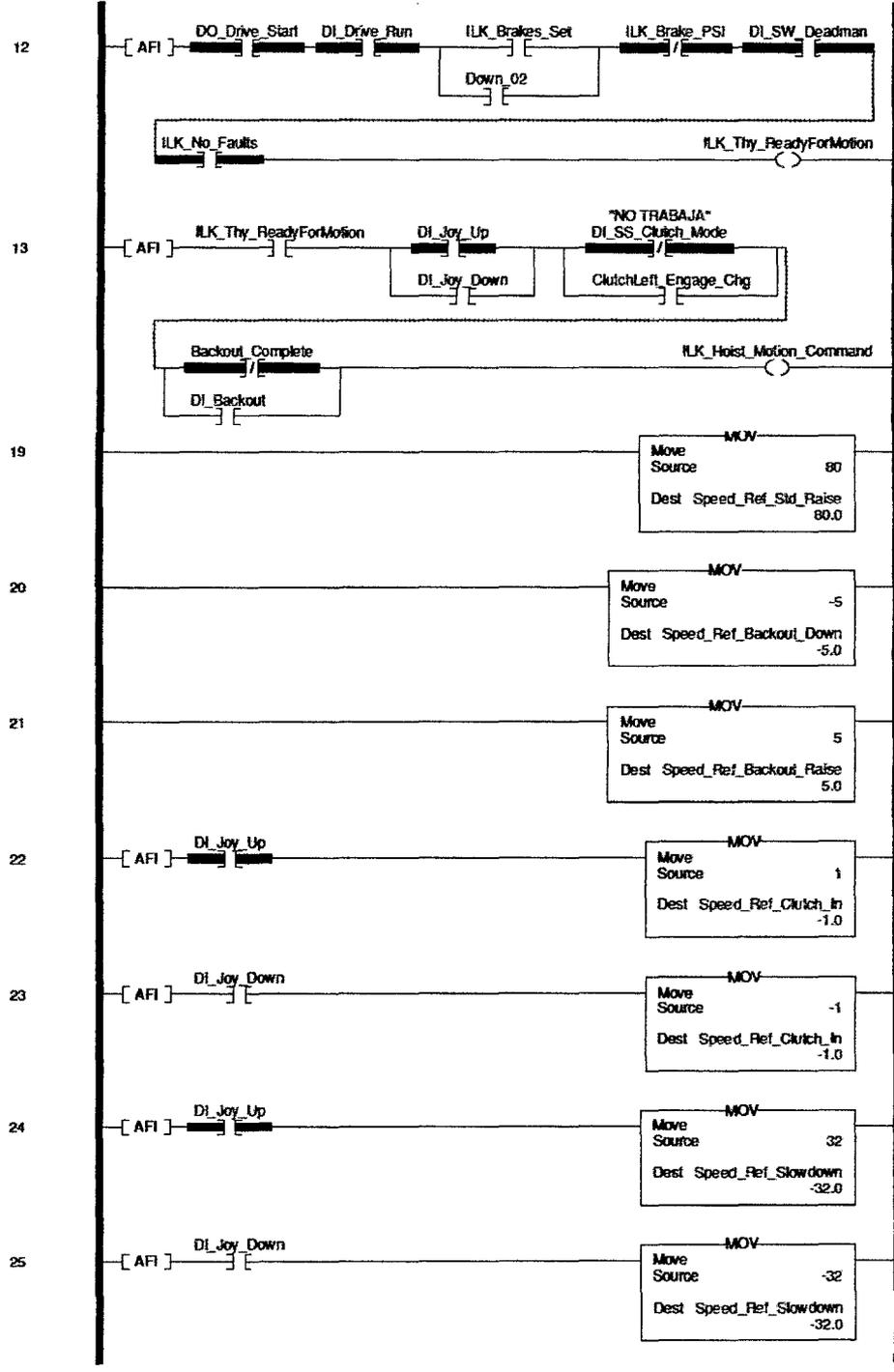


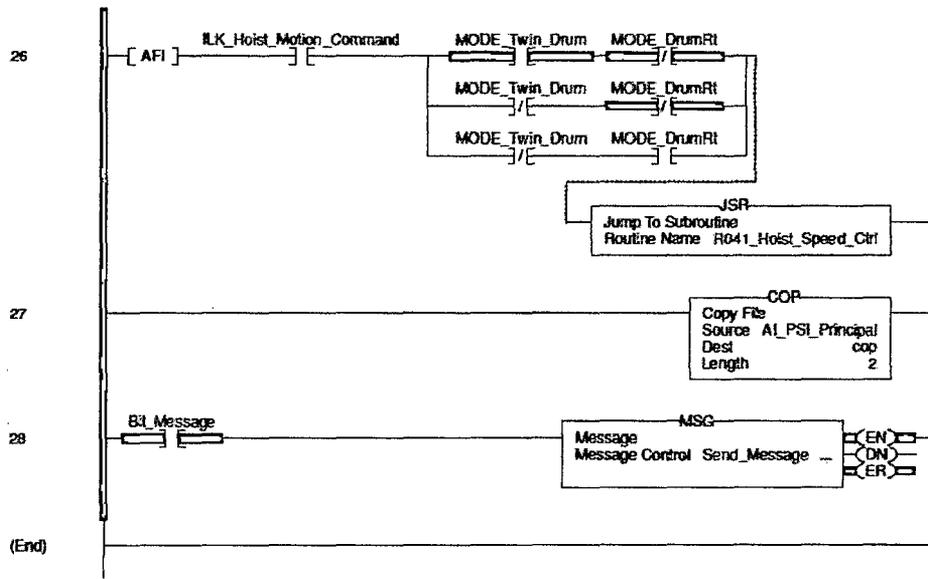
8



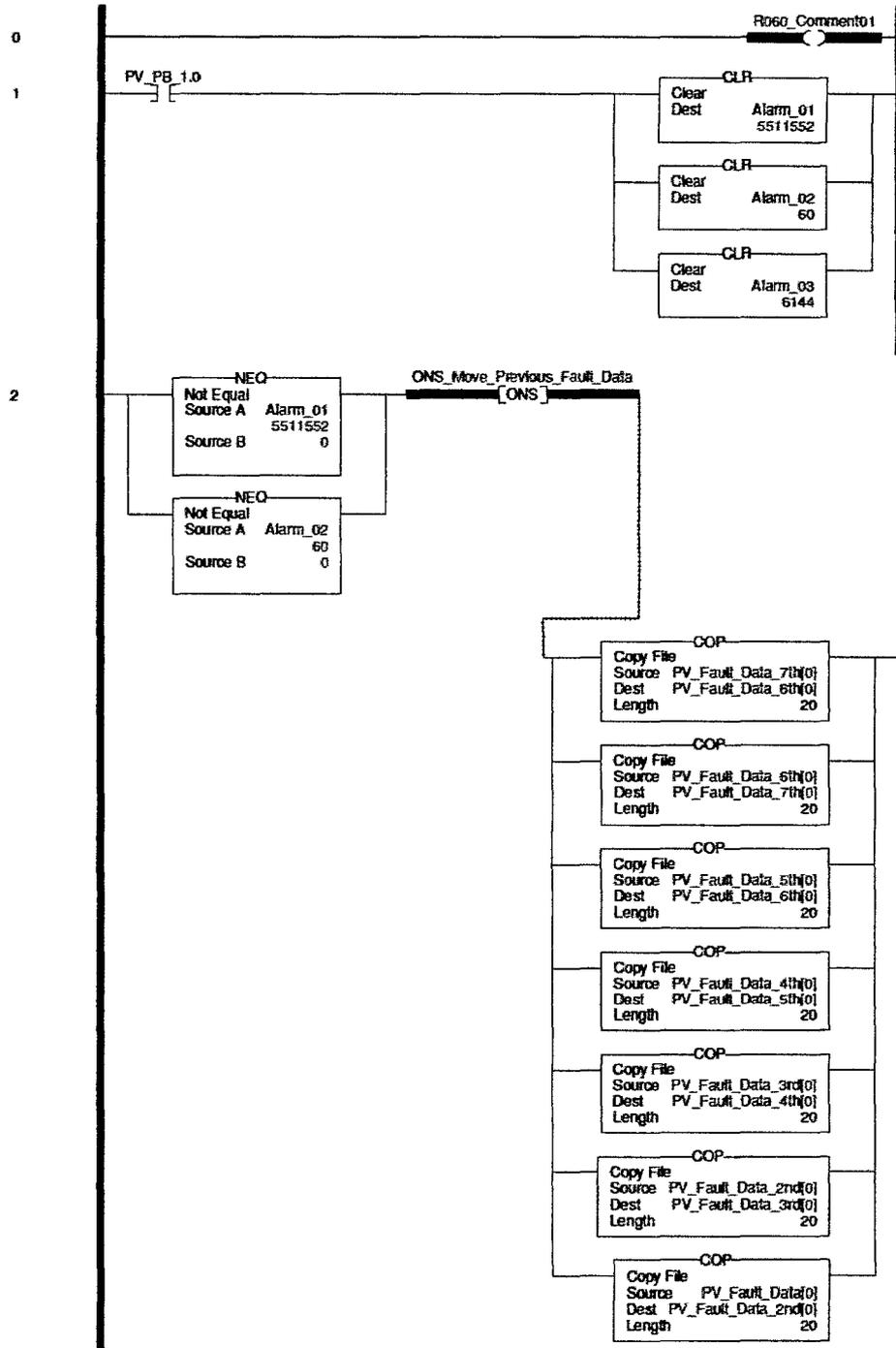
96

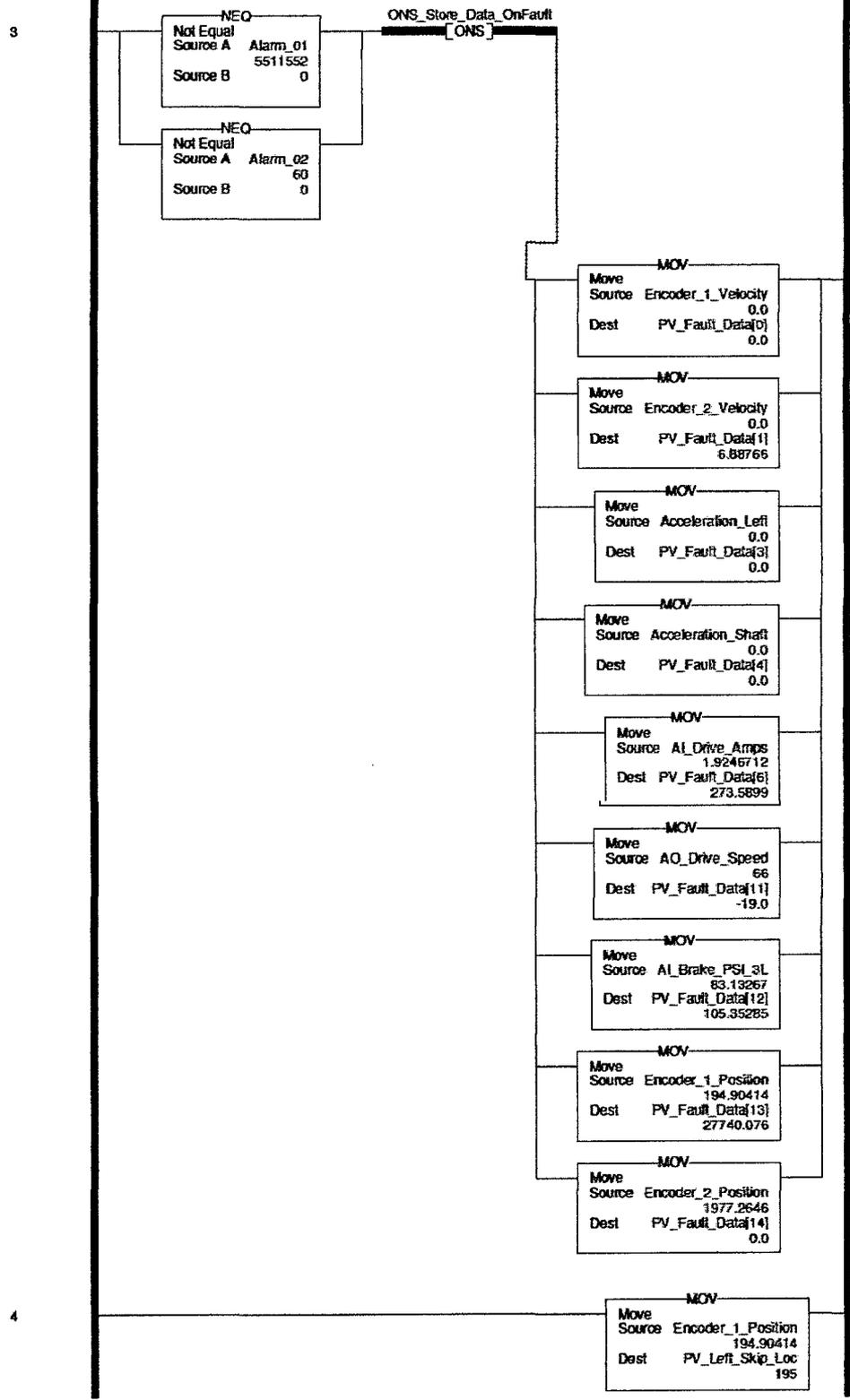


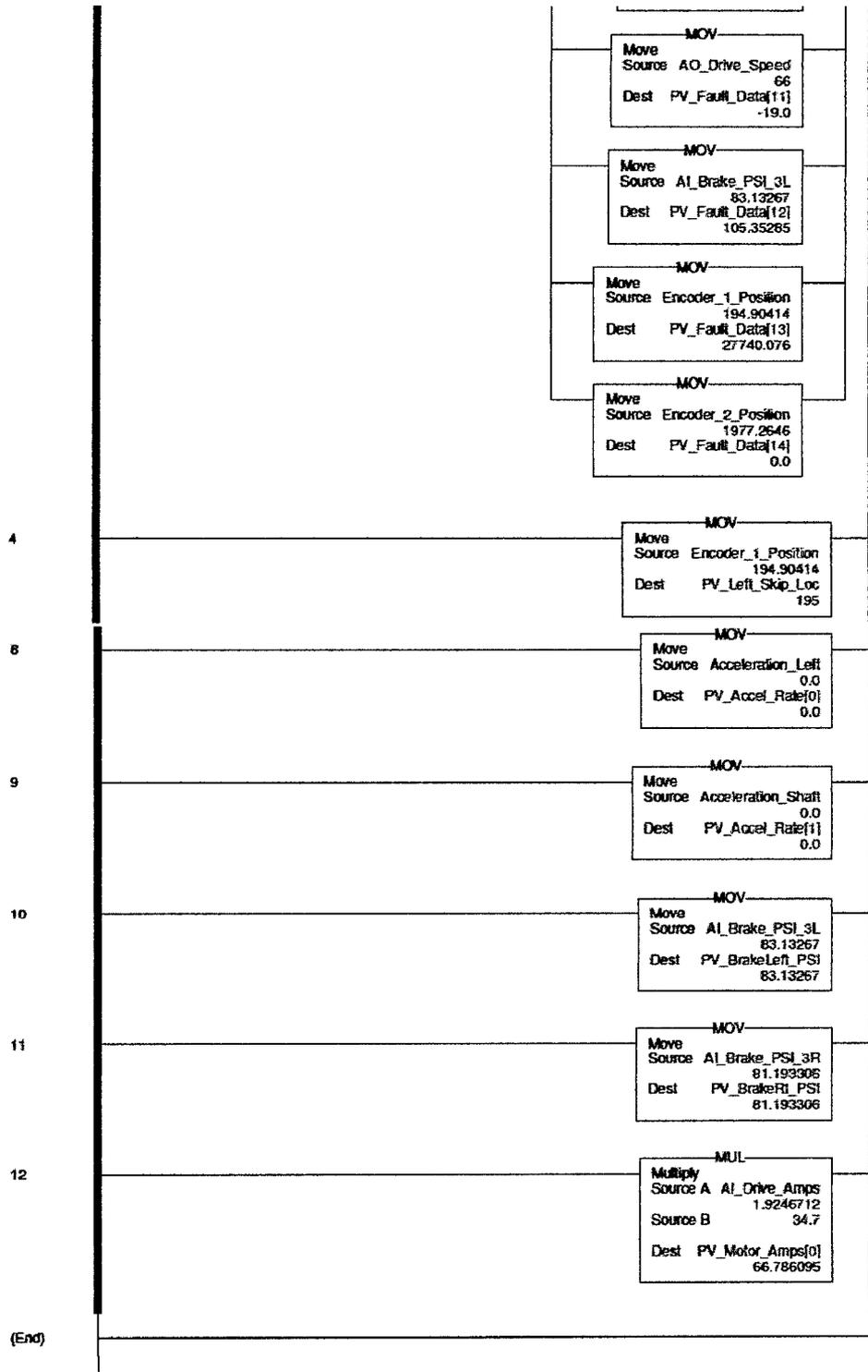




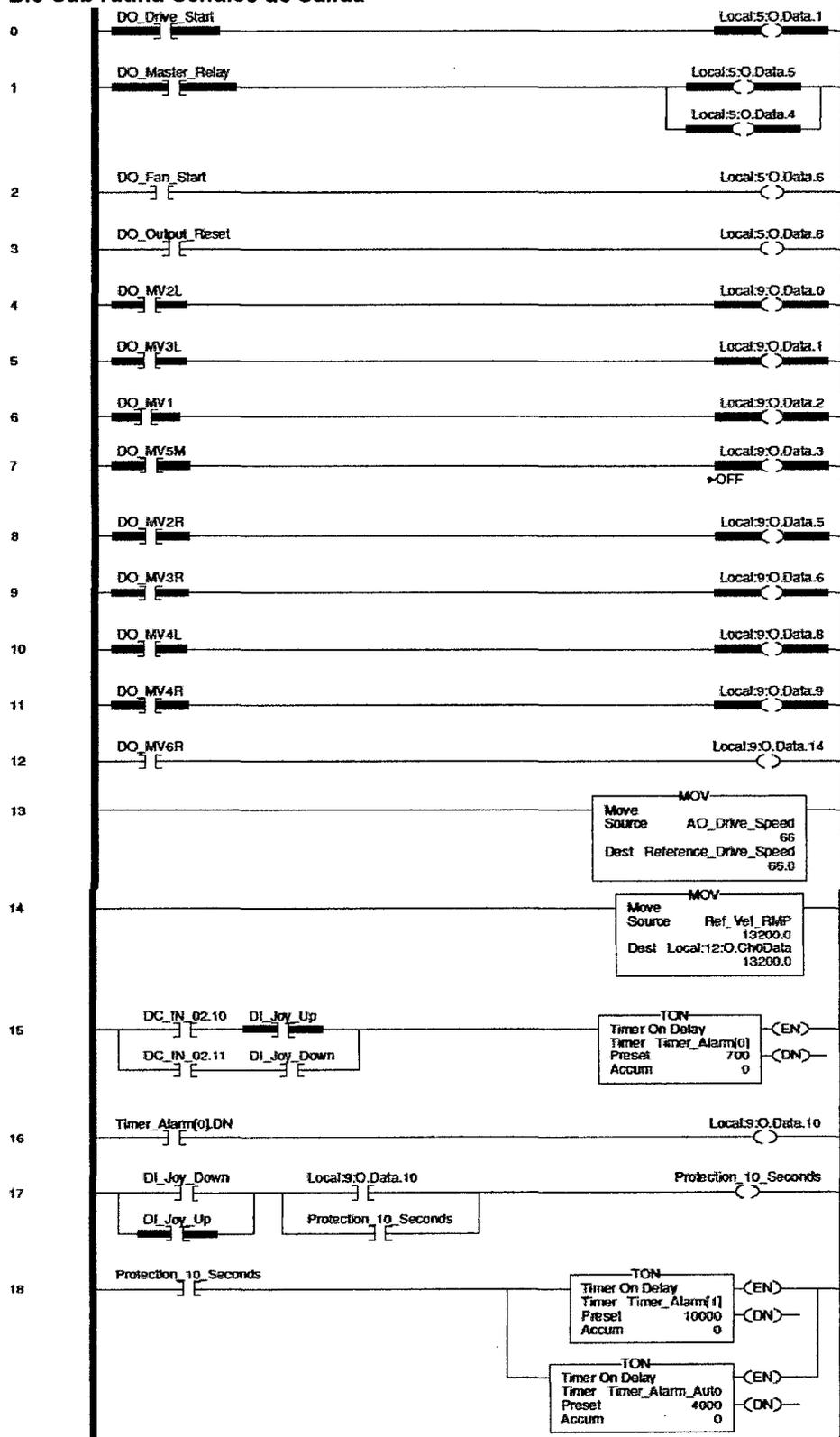
### B.4 Sub rutina HMI\_Data



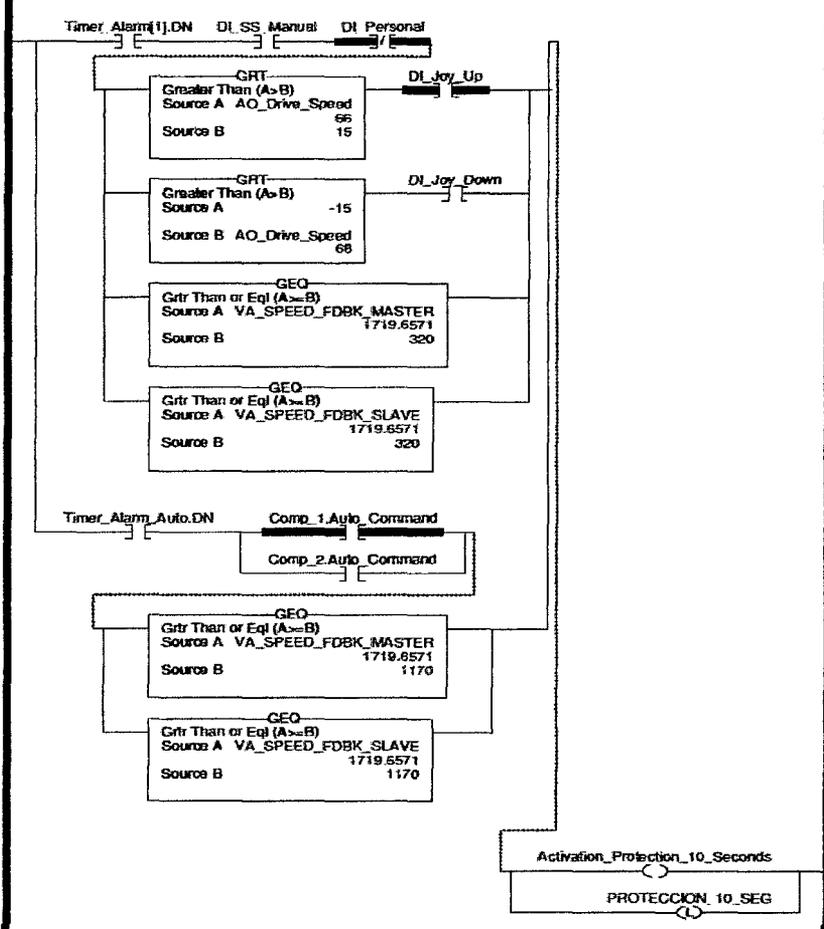




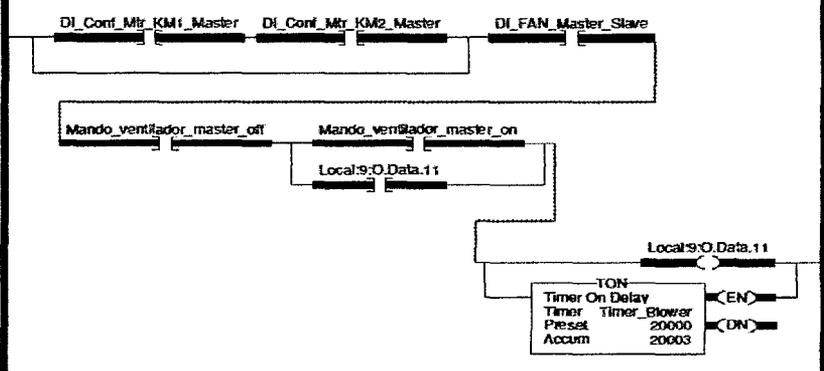
### B.5 Sub rutina Señales de Salida



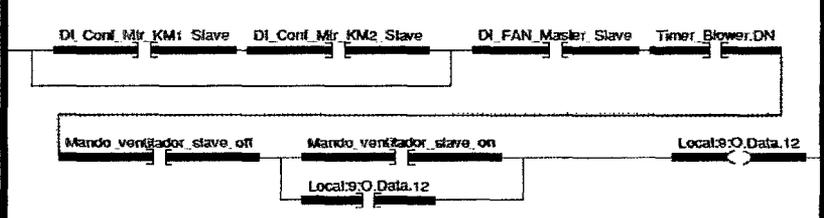
19



20

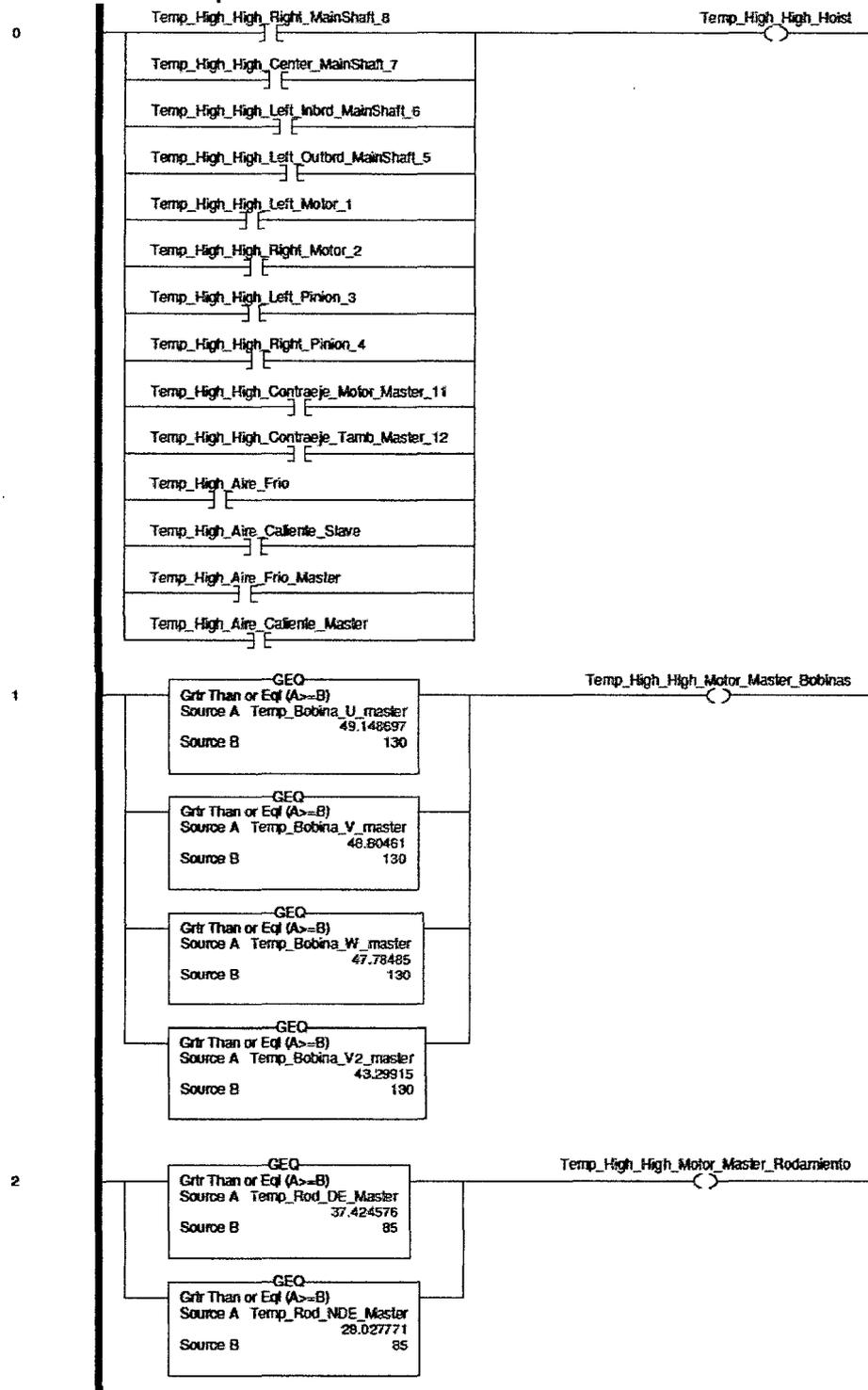


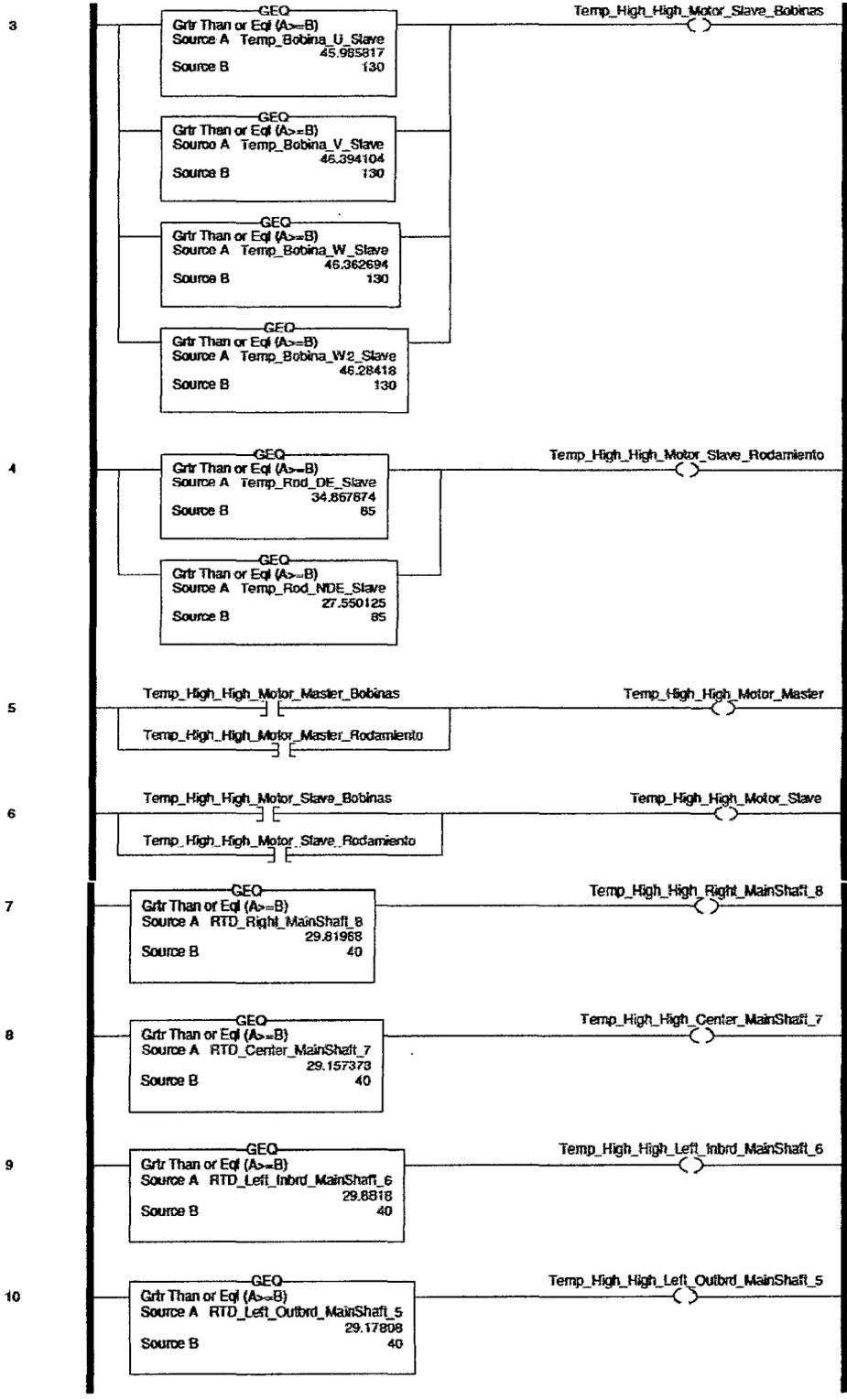
21

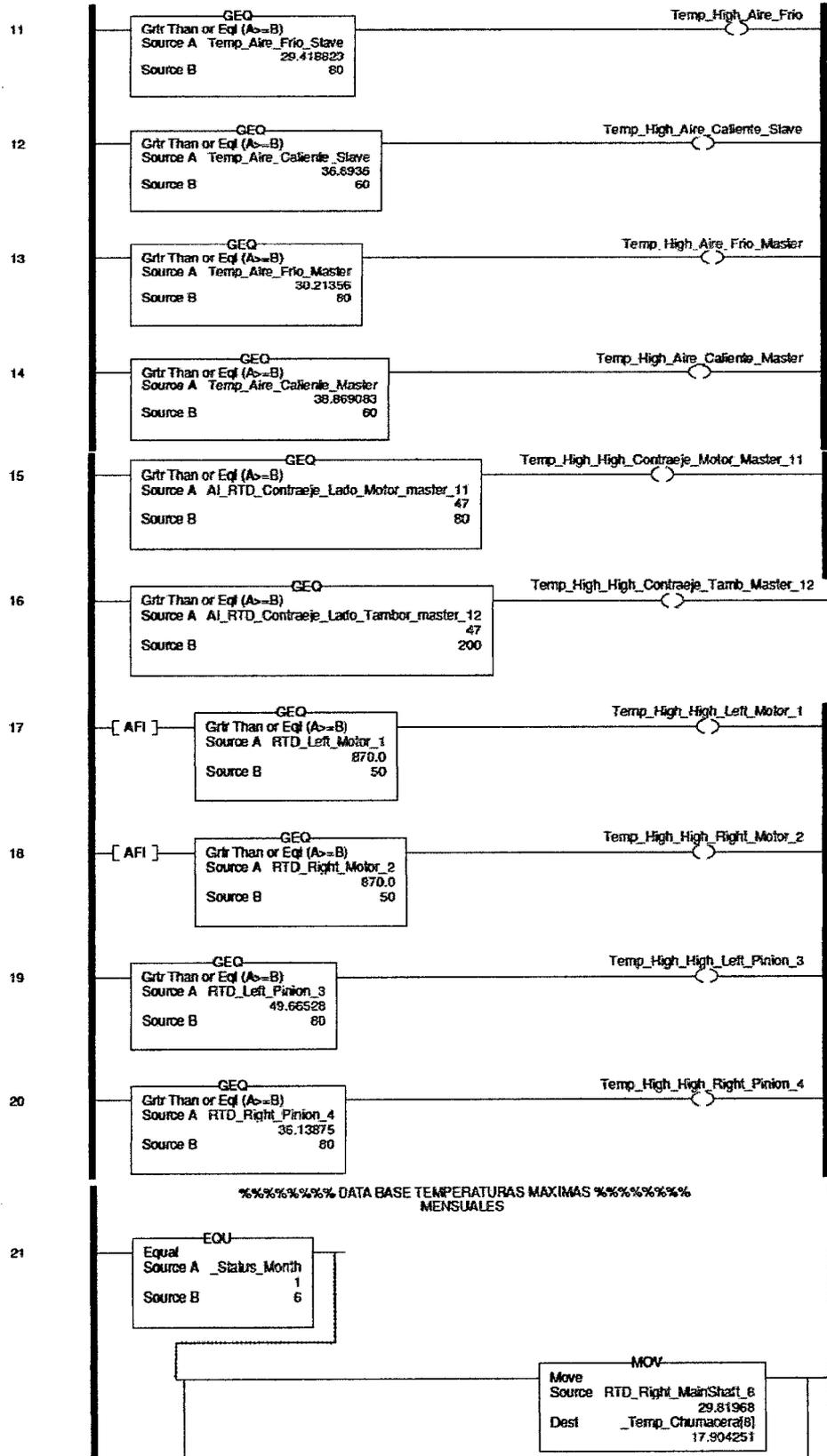


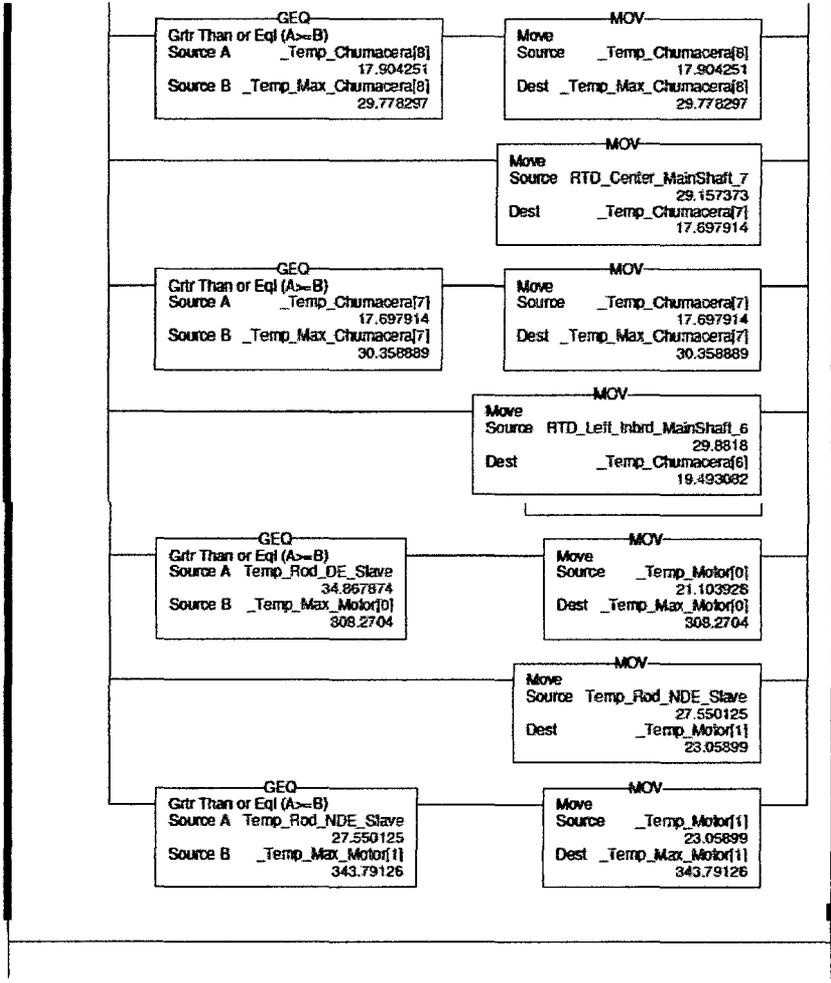
(End)

### B.6 Sub rutina temperatura



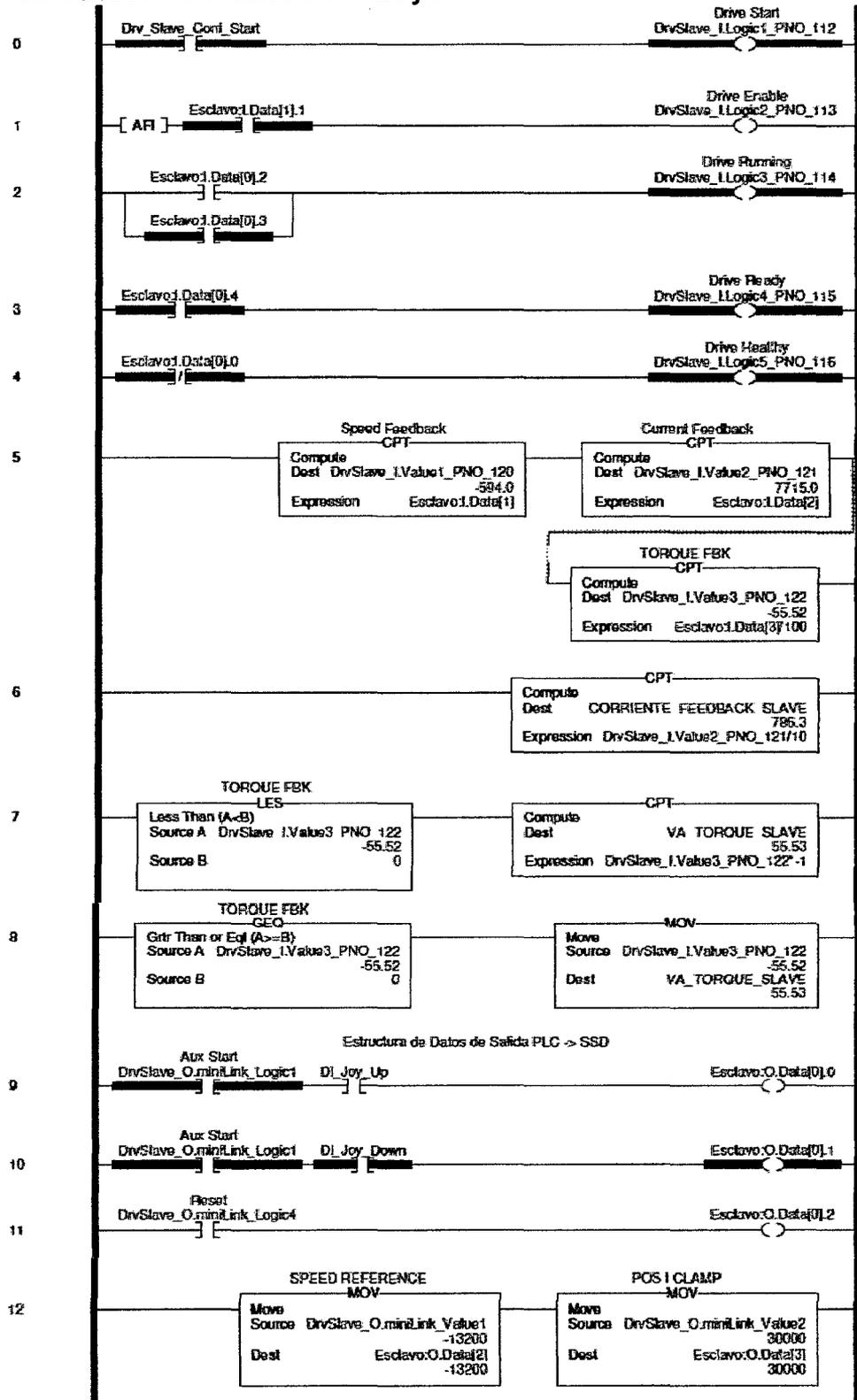


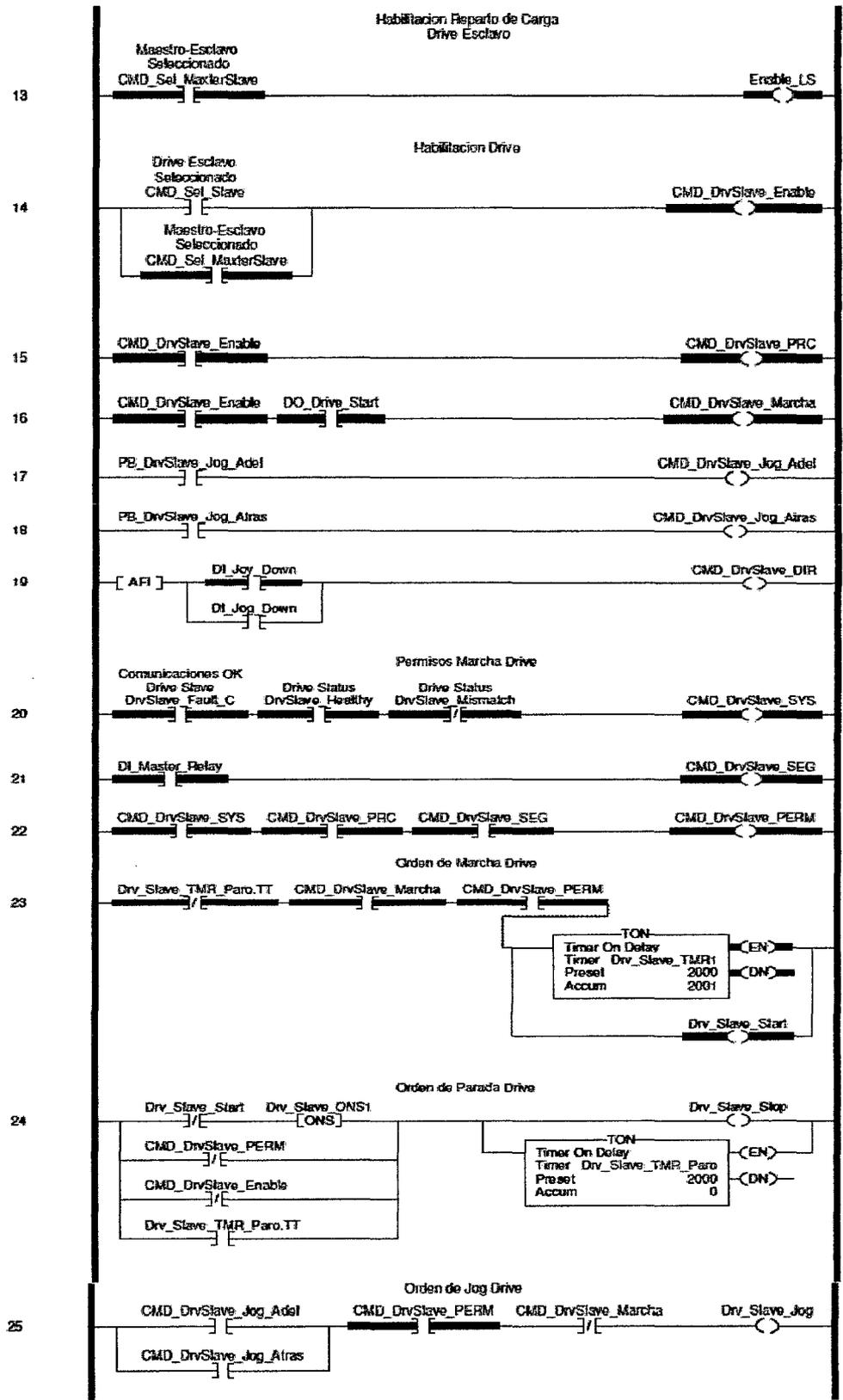


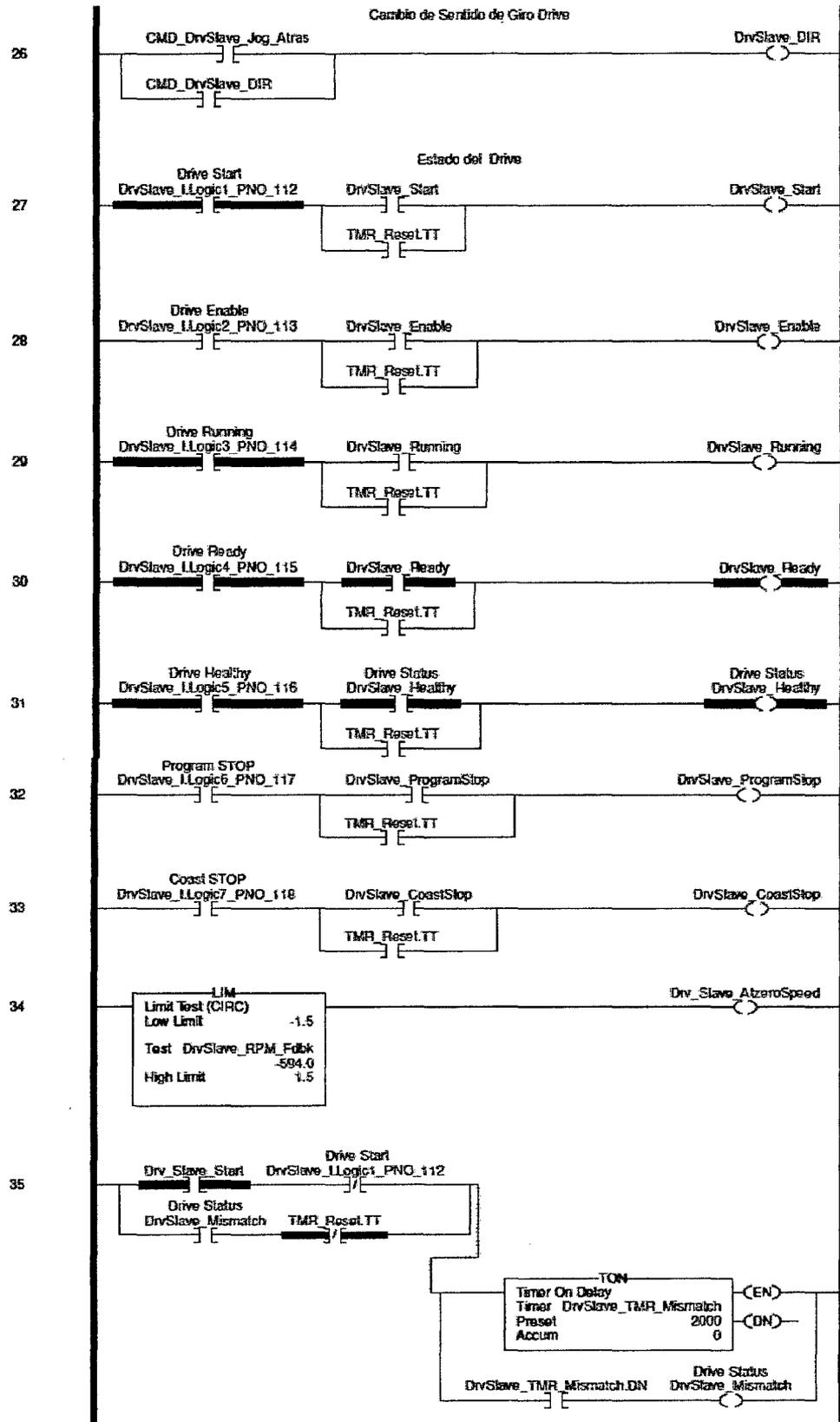


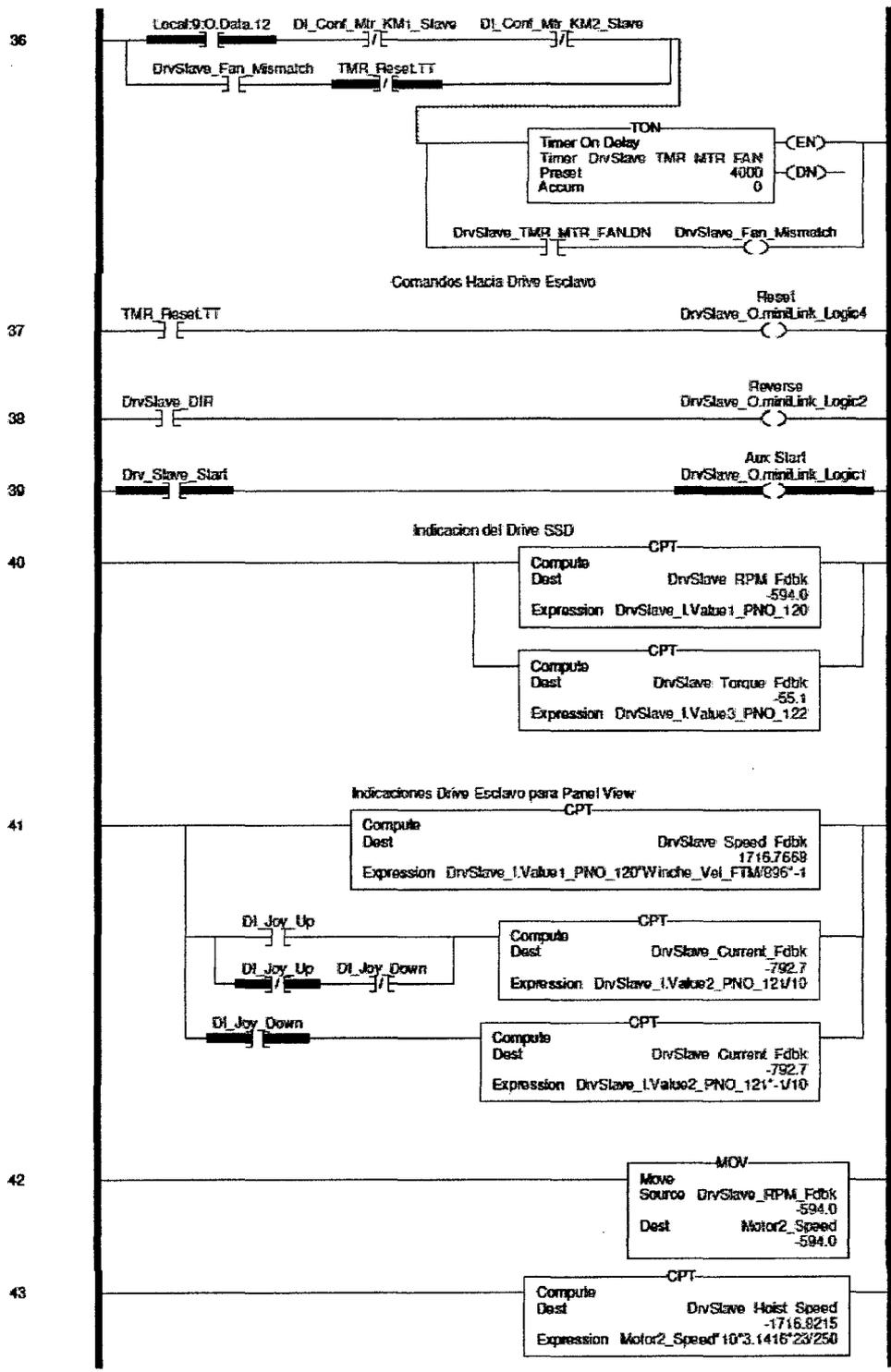
(End)

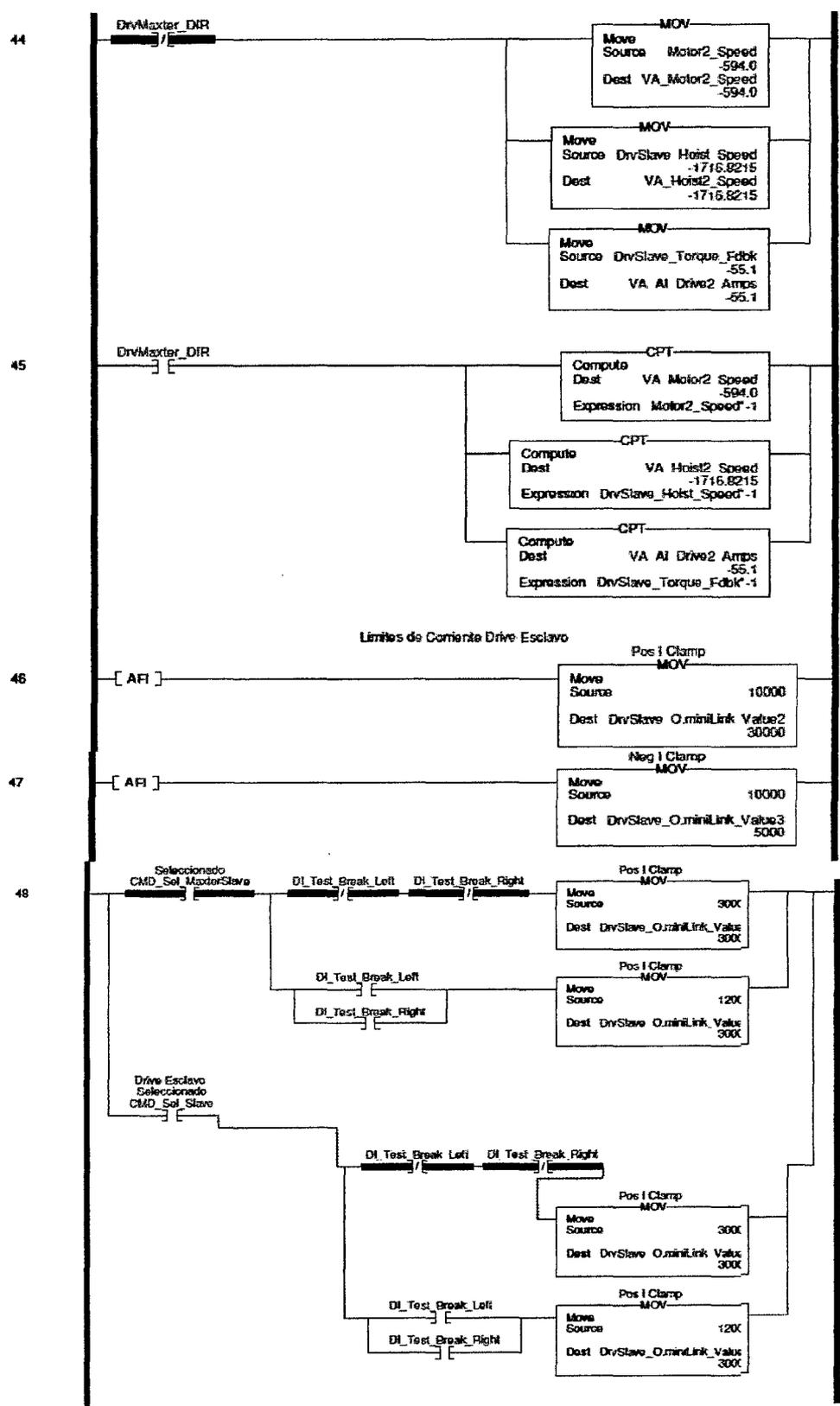
B.7 Sub rutina Estructura de datos entre PLC y Drive

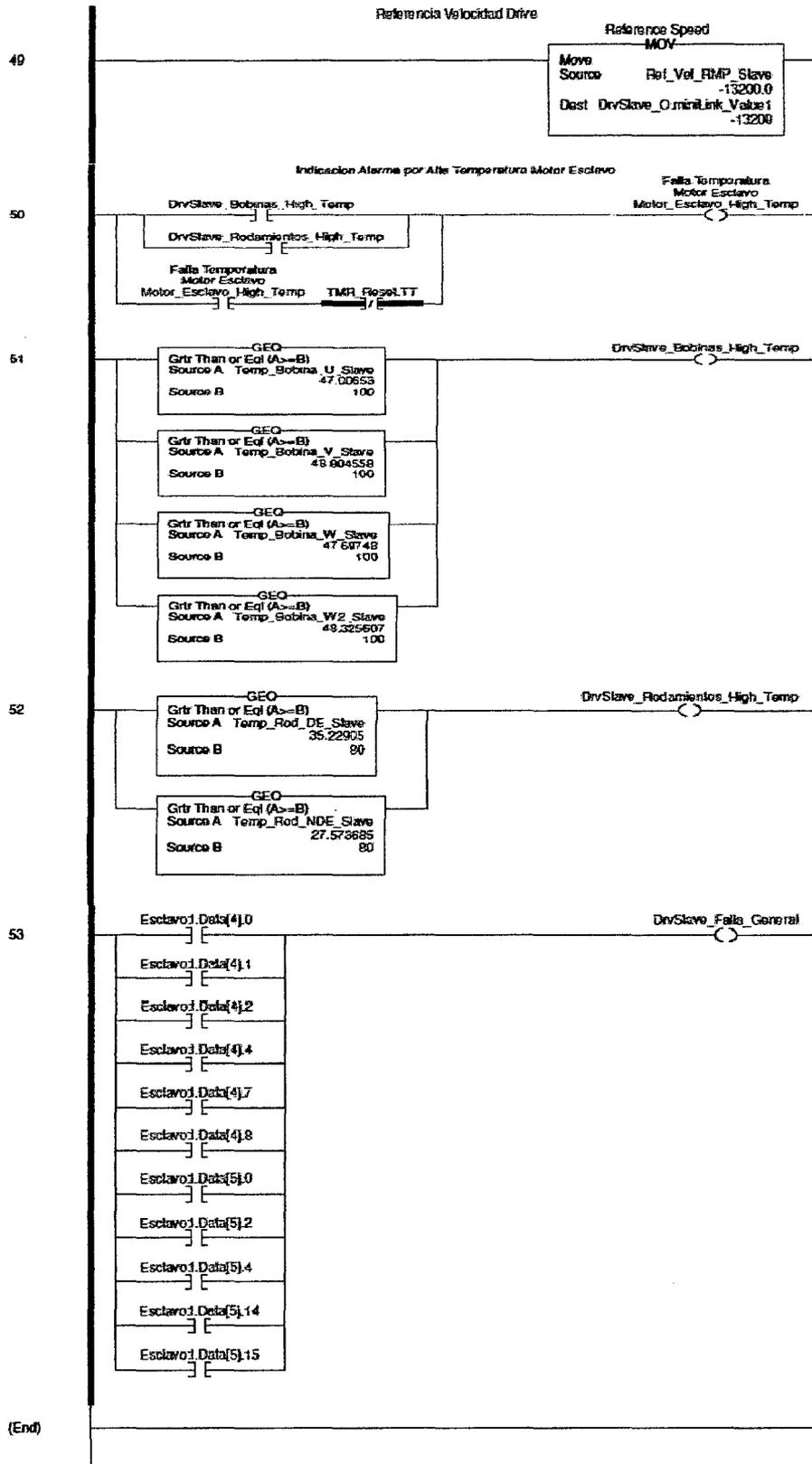




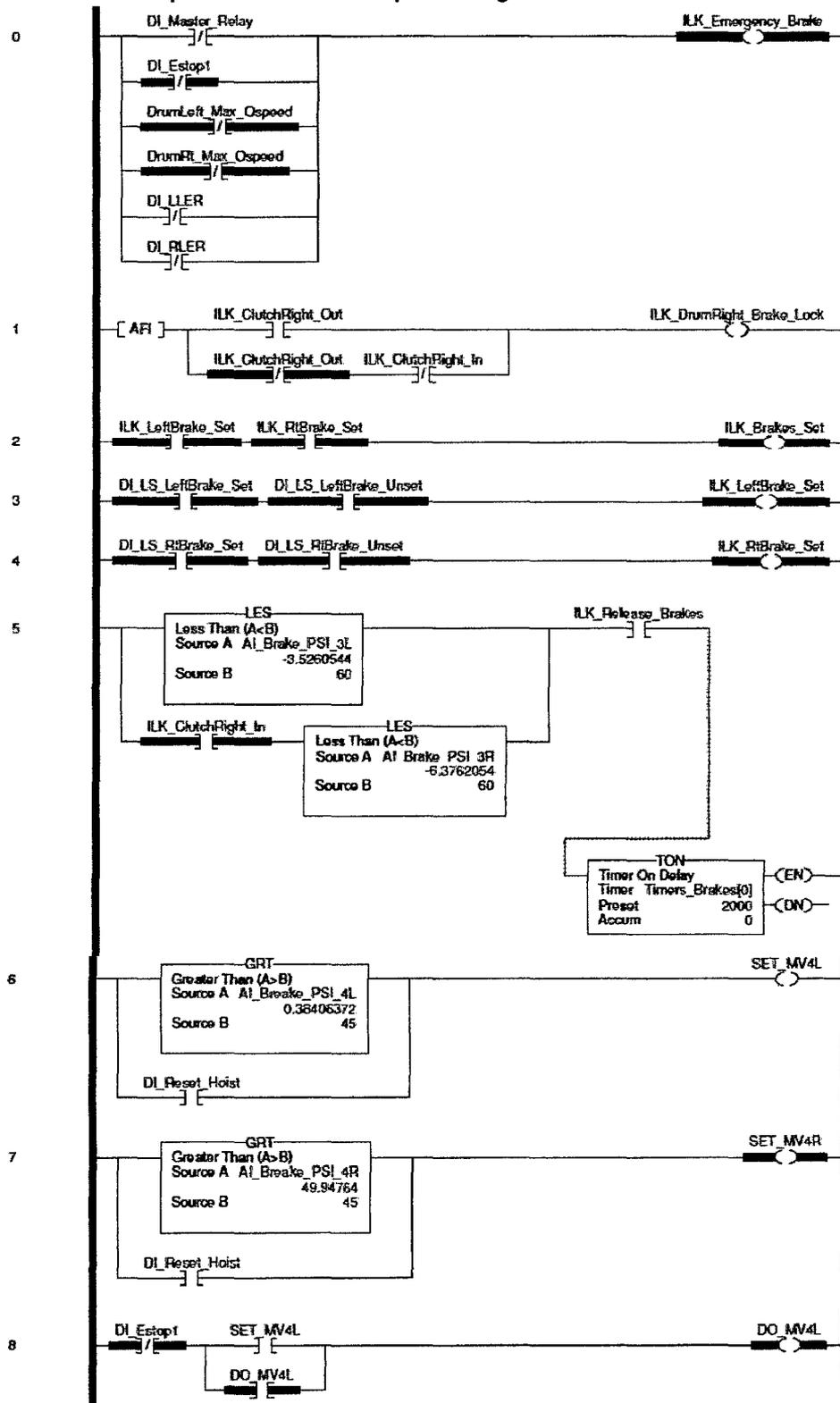


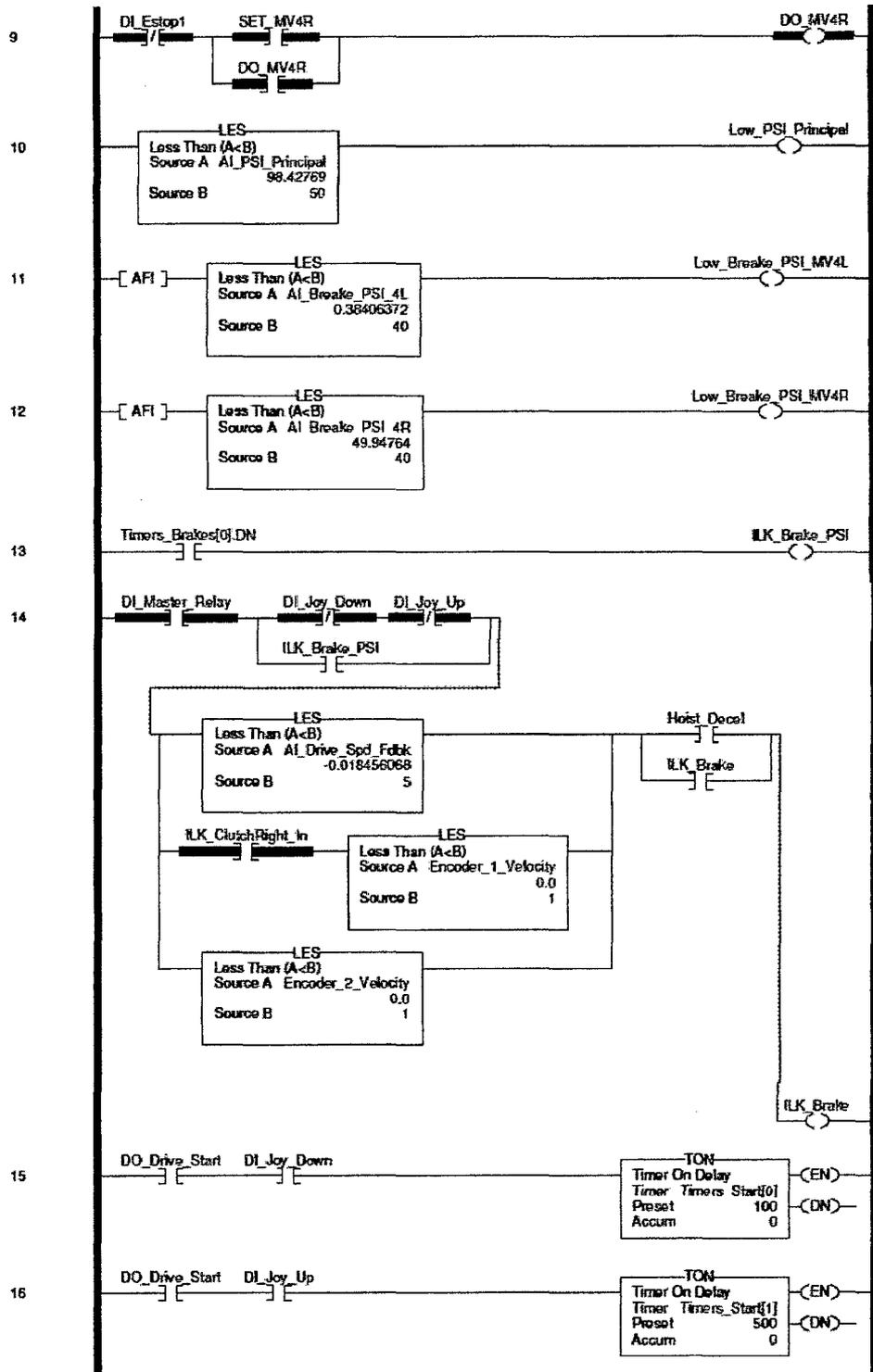




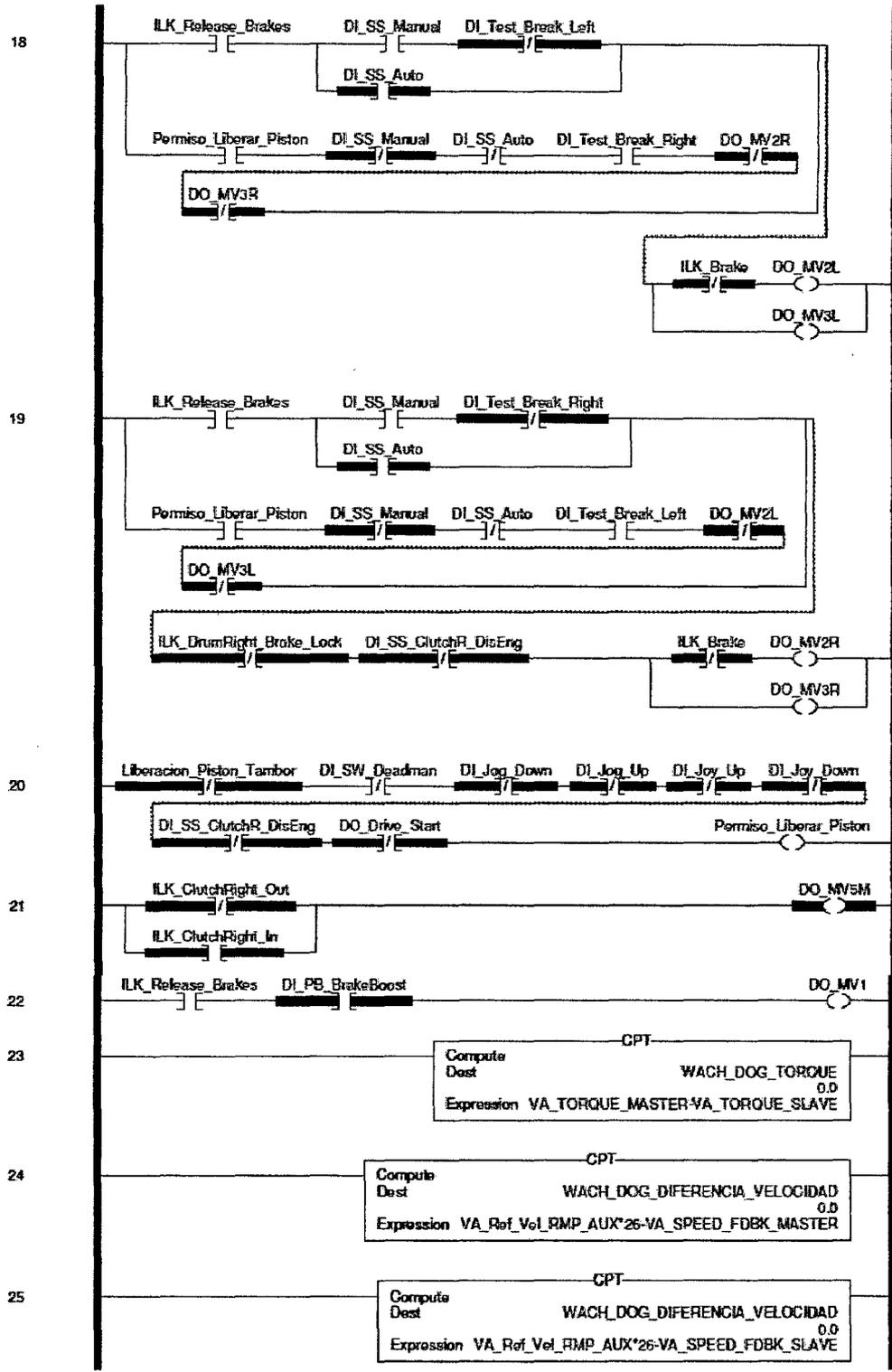


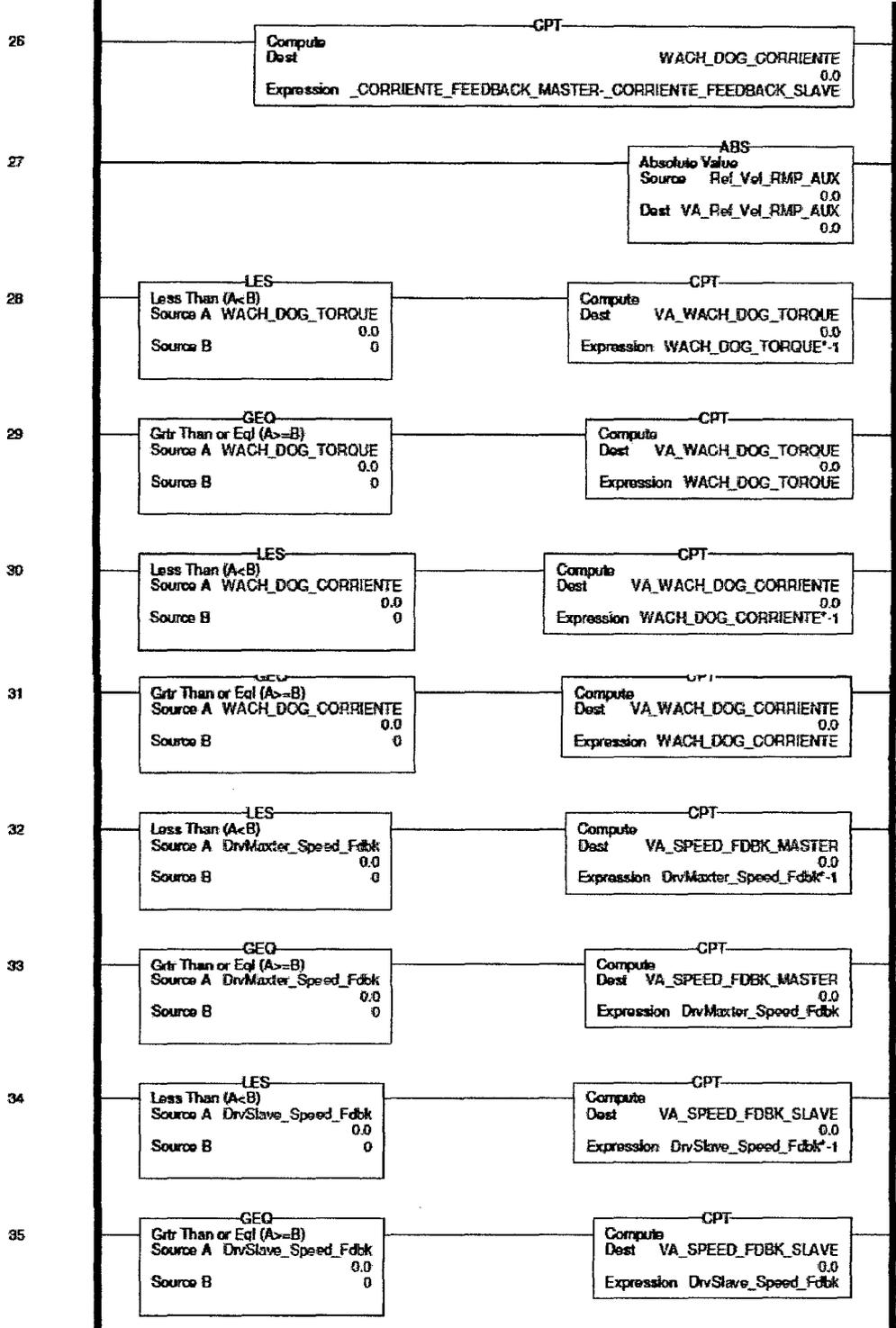
### B.8 Sub rutina para control del tiempo de magnetización

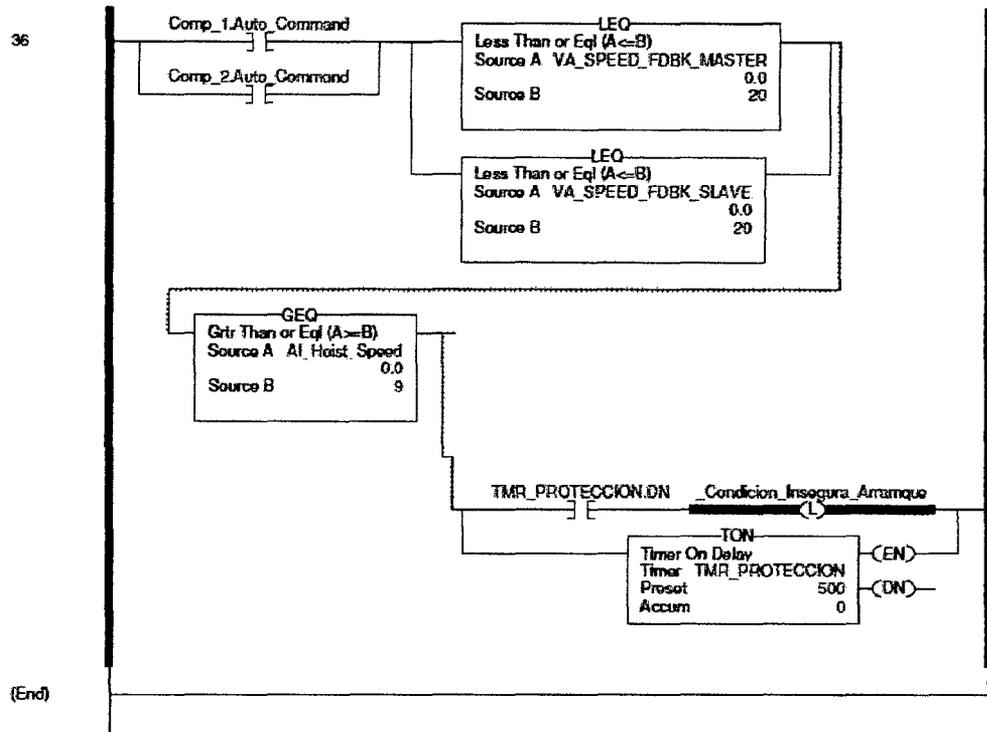












### C. DATOS TOMADOS DEL 17 AL 26 DE MAYO DEL 2014

Tabla C1. Datos muestreados de arranque de motor AC sin el sistema electrónico compensador de torque el día 17-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (°C)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	2550	-15	-1770	70.1	Arrastra	08:00:00 a.m.	17/05/2014
02	2851	-14	-1652	71.4	Arrastra	08:04:10 a.m.	17/05/2014
03	2894	-12	-1416	86.3	Arrastra	08:09:25 a.m.	17/05/2014
04	3000	-15	-1770	90.4	Arrastra	08:12:33 a.m.	17/05/2014
05	3000	-14	-1652	89.1	Arrastra	08:17:37 a.m.	17/05/2014
06	2765	-15	-1770	78.2	Arrastra	08:20:55 a.m.	17/05/2014
07	2843	-14	-1652	84.5	Arrastra	08:26:43 a.m.	17/05/2014
08	2764	-12	-1416	74.5	Arrastra	08:30:42 a.m.	17/05/2014
09	3000	-13	-1534	88.6	Arrastra	08:33:10 a.m.	17/05/2014
10	2874	-16	-1888	81.4	Arrastra	08:35:47 a.m.	17/05/2014
11	2900	-16	-1888	89.3	Arrastra	08:40:26 a.m.	17/05/2014
12	2800	-15	-1770	75.7	Arrastra	08:51:57 a.m.	17/05/2014
13	2300	-10	-1180	70.4	Arrastra	08:53:14 a.m.	17/05/2014
14	2700	-13	-1534	81.1	Arrastra	09:00:05 a.m.	17/05/2014
15	2546	-9	-1062	79.9	Arrastra	09:08:40 a.m.	17/05/2014
16	2863	-8	-944	85.4	Arrastra	09:11:18 a.m.	17/05/2014
17	2786	-10	-1180	76.6	Arrastra	09:16:23 a.m.	17/05/2014
18	2851	-15	-1770	75.4	Arrastra	09:22:07 a.m.	17/05/2014
19	2940	-14	-1652	84.1	Arrastra	09:30:49 a.m.	17/05/2014
20	2680	-12	-1416	74.1	Arrastra	09:34:32 a.m.	17/05/2014
21	2699	-13	-1534	76.3	Arrastra	09:39:46 a.m.	17/05/2014
22	2984	-14	-1652	81.5	Arrastra	09:45:59 a.m.	17/05/2014
23	2860	-15	-1770	80.6	Arrastra	09:51:27 a.m.	17/05/2014
24	2746	-18	-2124	76.9	Arrastra	09:56:38 a.m.	17/05/2014
25	2790	-12	-1416	74.1	Arrastra	10:01:35 a.m.	17/05/2014
26	2850	-15	-1770	81.5	Arrastra	10:09:40 a.m.	17/05/2014
27	2673	-16	-1888	68.3	Arrastra	10:18:05 a.m.	17/05/2014
28	2984	-14	-1652	82.4	Arrastra	10:21:11 a.m.	17/05/2014
29	2754	-15	-1770	76.6	Arrastra	10:24:41 a.m.	17/05/2014
30	2836	-16	-1888	84.2	Arrastra	10:32:38 a.m.	17/05/2014
31	2706	-13	-1534	74.6	Arrastra	10:37:16 a.m.	17/05/2014
32	2698	-14	-1652	76.9	Arrastra	10:42:18 a.m.	17/05/2014
33	2546	-12	-1416	71.4	Arrastra	10:48:23 a.m.	17/05/2014
34	2870	-8	-944	84.6	Arrastra	11:04:02 a.m.	17/05/2014
35	2657	-12	-1416	72.1	Arrastra	11:09:17 a.m.	17/05/2014
36	2861	-9	-1062	89.6	Arrastra	11:13:56 a.m.	17/05/2014
37	2894	-10	-1180	85.5	Arrastra	11:18:45 a.m.	17/05/2014
38	2976	-11	-1298	90.1	Arrastra	11:21:22 a.m.	17/05/2014
39	2863	-13	-1534	84	Arrastra	11:29:35 a.m.	17/05/2014
40	2976	-15	-1770	89.6	Arrastra	11:33:20 a.m.	17/05/2014
41	2675	-12	-1416	75.4	Arrastra	11:37:12 a.m.	17/05/2014
42	2943	-14	-1652	87.1	Arrastra	11:41:43 a.m.	17/05/2014
43	2643	-13	-1534	74.6	Arrastra	11:46:34 a.m.	17/05/2014
44	2976	-9	-1062	90.2	Arrastra	11:54:10 a.m.	17/05/2014
45	2846	-10	-1180	86.9	Arrastra	11:59:07 a.m.	17/05/2014
46	2796	-11	-1298	74.7	Arrastra	01:00:11 p.m.	17/05/2014
47	2843	-12	-1416	84.3	Arrastra	01:06:06 p.m.	17/05/2014
48	2597	-10	-1180	62.6	Arrastra	01:09:10 p.m.	17/05/2014

49	2679	-13	-1534	67.3	Arrastra	01:12:35 p.m.	17/05/2014
50	2548	-10	-1180	67.8	Arrastra	01:19:31 p.m.	17/05/2014
51	2643	-10	-1180	64.1	Arrastra	01:23:04 p.m.	17/05/2014
52	2963	-12	-1416	87.9	Arrastra	01:28:45 p.m.	17/05/2014
53	2647	-10	-1180	67.9	Arrastra	01:31:043 p.m.	17/05/2014
54	2783	-11	-1298	74.5	Arrastra	01:35:39 p.m.	17/05/2014
55	2840	-15	-1770	85.4	Arrastra	01:40:26 p.m.	17/05/2014
56	2860	-9	-1062	86.1	Arrastra	01:44:15 p.m.	17/05/2014
57	2831	-8	-944	80	Arrastra	01:51:57 p.m.	17/05/2014
58	2796	-7	-826	80.2	Arrastra	01:55:33 p.m.	17/05/2014
59	2946	-12	-1416	86.3	Arrastra	02:01:36 p.m.	17/05/2014
60	2978	-13	-1534	89.4	Arrastra	02:07:48 p.m.	17/05/2014
61	3000	-11	-1298	87.1	Arrastra	02:12:42 p.m.	17/05/2014
62	3000	-15	-1770	90.2	Arrastra	02:19:29 p.m.	17/05/2014
63	3000	-13	-1534	89.7	Arrastra	02:22:02 a.m.	17/05/2014
64	3000	-14	-1652	88.5	Arrastra	02:26:39 p.m.	17/05/2014
65	3000	-14	-1652	90.4	Arrastra	02:31:48 p.m.	17/05/2014
66	3000	-11	-1298	91.9	Arrastra	02:37:27 p.m.	17/05/2014
67	3000	-10	-1180	90.4	Arrastra	02:40:25 p.m.	17/05/2014
68	3000	-15	-1770	92.4	Arrastra	02:43:11 p.m.	17/05/2014
69	3000	-13	-1534	87.5	Arrastra	02:47:09 p.m.	17/05/2014
70	3000	-14	-1652	91.3	Arrastra	02:53:47 p.m.	17/05/2014
71	2946	-15	-1770	89.1	Arrastra	02:58:08 p.m.	17/05/2014
72	2987	-14	-1652	87	Arrastra	03:02:14 p.m.	17/05/2014
73	2990	-12	-1416	90.3	Arrastra	03:08:01 p.m.	17/05/2014
74	2761	-15	-1770	79.4	Arrastra	03:12:16 p.m.	17/05/2014
75	2830	-19	-2242	84.2	Arrastra	03:16:37 p.m.	17/05/2014
76	2786	-18	-2124	75.6	Arrastra	03:21:16 p.m.	17/05/2014
77	2789	-13	-1534	86.1	Arrastra	03:26:00 p.m.	17/05/2014
78	2647	-12	-1416	67.3	Arrastra	03:32:50 p.m.	17/05/2014
79	2946	-11	-1298	84.5	Arrastra	03:39:28 p.m.	17/05/2014
80	2957	-9	-1062	87.1	Arrastra	03:45:40 p.m.	17/05/2014
81	2983	-8	-944	89.6	Arrastra	03:49:09 p.m.	17/05/2014
82	2843	-13	-1534	84.4	Arrastra	03:52:30 p.m.	17/05/2014
83	2961	-9	-1062	86.3	Arrastra	03:56:14 p.m.	17/05/2014
84	2806	-11	-1298	79.1	Arrastra	04:02:19 p.m.	17/05/2014
85	2956	-12	-1416	90.8	Arrastra	04:08:38 p.m.	17/05/2014
86	2846	-13	-1534	84.5	Arrastra	04:14:05 a.m.	17/05/2014
87	2976	-14	-1652	84.1	Arrastra	04:19:20 p.m.	17/05/2014
88	2576	-15	-1770	76.8	Arrastra	04:22:033 p.m.	17/05/2014
89	2673	-16	-1888	70.1	Arrastra	04:27:32 p.m.	17/05/2014
90	3000	-12	-1416	90.6	Arrastra	04:33:45 p.m.	17/05/2014
91	3000	-11	-1298	88.8	Arrastra	04:38:50 p.m.	17/05/2014
92	3000	-10	-1180	86.4	Arrastra	04:41:29 p.m.	17/05/2014
93	2987	-12	-1416	90.1	Arrastra	04:47:20 p.m.	17/05/2014
94	2941	-11	-1298	85.4	Arrastra	04:51:04 p.m.	17/05/2014
95	2953	-13	-1534	86.3	Arrastra	04:55:00 p.m.	17/05/2014
96	3000	-11	-1298	88.1	Arrastra	04:59:58 a.m.	17/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

**Tabla C2.** Datos muestreados de arranque de motor AC sin el sistema electrónico compensador de torque el día 18-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (°C)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	2998	-15	-1770	90.4	Arrastra	08:00:01 a.m.	18/05/2014
02	3000	-11	-1298	90.6	Arrastra	08:05:00 a.m.	18/05/2014
03	3000	-12	-1416	89.1	Arrastra	08:09:19 a.m.	18/05/2014
04	2687	-15	-1770	76.2	Arrastra	08:13:58 a.m.	18/05/2014
05	2574	-13	-1534	64.3	Arrastra	08:20:45 a.m.	18/05/2014
06	2863	-19	-2242	81.1	Arrastra	08:25:06 a.m.	18/05/2014
07	2746	-11	-1298	74.9	Arrastra	08:28:05 a.m.	18/05/2014
08	2950	-12	-1416	86.5	Arrastra	08:34:54 a.m.	18/05/2014
09	2986	-13	-1534	89.7	Arrastra	08:39:53 a.m.	18/05/2014
10	2975	-15	-1770	90.4	Arrastra	08:44:40 a.m.	18/05/2014
11	2896	-14	-1652	84.7	Arrastra	08:49:31 a.m.	18/05/2014
12	2843	-15	-1770	85.6	Arrastra	08:52:39 a.m.	18/05/2014
13	2851	-15	-1770	87.8	Arrastra	08:59:49 a.m.	18/05/2014
14	2763	-15	-1770	76.9	Arrastra	09:02:18 a.m.	18/05/2014
15	2946	-15	-1770	90.1	Arrastra	09:09:47 a.m.	18/05/2014
16	2756	-14	-1652	80.4	Arrastra	09:14:11 a.m.	18/05/2014
17	3000	-15	-1770	90.5	Arrastra	09:20:04 a.m.	18/05/2014
18	3000	-15	-1770	90.6	Arrastra	09:24:00 a.m.	18/05/2014
19	2987	-19	-2242	86.2	Arrastra	09:27:33 a.m.	18/05/2014
20	2946	-15	-1770	89.4	Arrastra	09:32:21 a.m.	18/05/2014
21	2976	-14	-1652	84.6	Arrastra	09:41:15 a.m.	18/05/2014
22	3000	-13	-1534	89.1	Arrastra	09:46:10 a.m.	18/05/2014
23	2786	-12	-1416	76.5	Arrastra	09:51:08 a.m.	18/05/2014
24	2845	-11	-1298	84.2	Arrastra	09:55:00 a.m.	18/05/2014
25	2961	-11	-1298	88.9	Arrastra	10:00:37 a.m.	18/05/2014
26	2992	-12	-1416	89.4	Arrastra	10:04:36 a.m.	18/05/2014
27	2840	-12	-1416	87.1	Arrastra	10:06:02 a.m.	18/05/2014
28	2964	-15	-1770	89.4	Arrastra	10:12:26 a.m.	18/05/2014
29	2687	-11	-1298	69.8	Arrastra	10:15:09 a.m.	18/05/2014
30	2943	-13	-1534	87.8	Arrastra	10:19:35 a.m.	18/05/2014
31	2951	-14	-1652	89.9	Arrastra	10:25:07 a.m.	18/05/2014
32	2978	-15	-1770	87.4	Arrastra	10:32:00 a.m.	18/05/2014
33	2946	-13	-1534	86.6	Arrastra	10:38:45 a.m.	18/05/2014
34	2830	-15	-1770	80.1	Arrastra	10:45:12 a.m.	18/05/2014
35	2670	-14	-1652	79.4	Arrastra	10:50:56 a.m.	18/05/2014
36	2743	-12	-1416	71.4	Arrastra	10:55:22 a.m.	18/05/2014
37	2768	-15	-1770	76.2	Arrastra	10:59:06 a.m.	18/05/2014
38	2890	-15	-1770	84.1	Arrastra	11:05:58 a.m.	18/05/2014
39	2950	-14	-1652	89.4	Arrastra	11:11:29 a.m.	18/05/2014
40	2910	-13	-1534	88.2	Arrastra	11:14:00 a.m.	18/05/2014
41	2876	-11	-1298	79.4	Arrastra	11:17:11 a.m.	18/05/2014
42	2890	-12	-1416	84.6	Arrastra	11:22:09 a.m.	18/05/2014
43	3000	-13	-1534	91.5	Arrastra	11:29:47 a.m.	18/05/2014
44	2768	-11	-1298	76.3	Arrastra	11:32:05 a.m.	18/05/2014
45	2803	-15	-1770	80.1	Arrastra	11:38:21 a.m.	18/05/2014
46	2964	-15	-1770	87.7	Arrastra	11:44:19 a.m.	18/05/2014
47	3000	-14	-1652	89.4	Arrastra	11:50:37 a.m.	18/05/2014
48	2684	-12	-1416	67.3	Arrastra	11:54:38 a.m.	18/05/2014

49	2790	-14	-1652	79.4	Arrastra	11:59:13 a.m.	18/05/2014
50	2850	-15	-1770	80.2	Arrastra	01:01:15 p.m.	18/05/2014
51	2941	-14	-1652	85.3	Arrastra	01:05:40 p.m.	18/05/2014
52	2967	-15	-1770	85.4	Arrastra	01:12:16 p.m.	18/05/2014
53	2894	-15	-1770	81.3	Arrastra	01:18:09 p.m.	18/05/2014
54	2753	-16	-1888	79.1	Arrastra	01:22:46 p.m.	18/05/2014
55	2846	-14	-1652	81.6	Arrastra	01:28:45 p.m.	18/05/2014
56	2975	-13	-1534	88.4	Arrastra	01:32:19 p.m.	18/05/2014
57	2908	-15	-1770	87.3	Arrastra	01:37:56 p.m.	18/05/2014
58	2753	-16	-1888	79.2	Arrastra	01:43:51 p.m.	18/05/2014
59	2846	-13	-1534	85.6	Arrastra	01:46:01 p.m.	18/05/2014
60	2854	-11	-1298	87.4	Arrastra	01:51:16 p.m.	18/05/2014
61	2976	-9	-1062	89.1	Arrastra	01:56:58 p.m.	18/05/2014
62	2985	-10	-1180	88.8	Arrastra	02:01:12 a.m.	18/05/2014
63	2931	-11	-1298	87.6	Arrastra	02:07:34 p.m.	18/05/2014
64	2816	-9	-1062	80.1	Arrastra	02:11:26 p.m.	18/05/2014
65	2853	-12	-1416	86.2	Arrastra	02:16:51 p.m.	18/05/2014
66	2957	-9	-1062	88.4	Arrastra	02:20:49 p.m.	18/05/2014
67	2978	-10	-1180	89.6	Arrastra	02:26:55 p.m.	18/05/2014
68	3000	-15	-1770	88.2	Arrastra	02:32:59 p.m.	18/05/2014
69	2768	-15	-1770	74.4	Arrastra	02:38:01 p.m.	18/05/2014
70	3000	-15	-1770	90.6	Arrastra	02:44:00 p.m.	18/05/2014
71	3000	-14	-1652	91.4	Arrastra	02:49:11 p.m.	18/05/2014
72	2943	-9	-1062	87.6	Arrastra	02:55:25 p.m.	18/05/2014
73	2957	-9	-1062	88.3	Arrastra	02:58:16 p.m.	18/05/2014
74	2915	-13	-1534	87.6	Arrastra	03:03:36 p.m.	18/05/2014
75	2994	-10	-1180	90.9	Arrastra	03:07:35 p.m.	18/05/2014
76	2976	-11	-1298	88.4	Arrastra	03:10:10 p.m.	18/05/2014
77	2980	-12	-1416	89.4	Arrastra	03:16:34 p.m.	18/05/2014
78	2941	-13	-1534	87.6	Arrastra	03:22:50 p.m.	18/05/2014
79	2981	-15	-1770	90.1	Arrastra	03:28:10 p.m.	18/05/2014
80	3000	-11	-1298	91.2	Arrastra	03:32:15 p.m.	18/05/2014
81	2976	-11	-1298	88.4	Arrastra	03:38:09 p.m.	18/05/2014
82	3000	-13	-1534	89.6	Arrastra	03:42:26 p.m.	18/05/2014
83	2976	-12	-1416	87.4	Arrastra	03:48:00 p.m.	18/05/2014
84	2994	-10	-1180	90.6	Arrastra	03:51:00 p.m.	18/05/2014
85	2865	-9	-1062	87.4	Arrastra	03:55:57 p.m.	18/05/2014
86	2801	-11	-1298	80.4	Arrastra	04:01:48 p.m.	18/05/2014
87	2942	-15	-1770	89.1	Arrastra	04:07:13 p.m.	18/05/2014
88	2960	-14	-1652	89.7	Arrastra	04:14:35 p.m.	18/05/2014
89	2976	-12	-1416	88.9	Arrastra	04:21:34 p.m.	18/05/2014
90	2840	-11	-1298	80.4	Arrastra	04:24:45 p.m.	18/05/2014
91	2865	-13	-1534	87.7	Arrastra	04:29:26 p.m.	18/05/2014
92	2973	-15	-1770	89.6	Arrastra	04:32:46 p.m.	18/05/2014
93	2856	-14	-1652	85.2	Arrastra	04:38:10 p.m.	18/05/2014
94	2976	-15	-1770	88.4	Arrastra	04:44:24 p.m.	18/05/2014
95	2893	-11	-1298	87.3	Arrastra	04:51:47 p.m.	18/05/2014
96	2994	-9	-1062	90.4	Arrastra	04:57:08 p.m.	18/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

**Tabla C3.** Datos muestreados de arranque de motor AC sin el sistema electrónico compensador de torque el día 19-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (°C)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	2673	-10	-1180	74.4	Arrastra	08:00:20 a.m.	19/05/2014
02	2786	-12	-1416	74.5	Arrastra	08:06:15 a.m.	19/05/2014
03	2946	-11	-1298	88.2	Arrastra	08:11:33 a.m.	19/05/2014
04	2976	-13	-1534	88.3	Arrastra	08:15:23 a.m.	19/05/2014
05	2846	-15	-1770	81.4	Arrastra	08:19:10 a.m.	19/05/2014
06	2910	-11	-1298	86.2	Arrastra	08:22:56 a.m.	19/05/2014
07	2673	-10	-1180	70.9	Arrastra	08:27:11 a.m.	19/05/2014
08	2790	-9	-1062	80.1	Arrastra	08:33:00 a.m.	19/05/2014
09	2793	-15	-1770	80.3	Arrastra	08:39:25 a.m.	19/05/2014
10	2786	-13	-1534	80.6	Arrastra	08:44:43 a.m.	19/05/2014
11	2851	-14	-1652	82.4	Arrastra	08:50:06 a.m.	19/05/2014
12	2943	-15	-1770	86.4	Arrastra	09:02:33 a.m.	19/05/2014
13	2900	-16	-1888	88.1	Arrastra	09:08:10 a.m.	19/05/2014
14	2976	-18	-2124	88.3	Arrastra	09:11:07 a.m.	19/05/2014
15	2916	-14	-1652	87.6	Arrastra	09:17:44 a.m.	19/05/2014
16	2834	-15	-1770	80.9	Arrastra	09:22:34 a.m.	19/05/2014
17	2960	-16	-1888	88.4	Arrastra	09:28:06 a.m.	19/05/2014
18	2756	-18	-2124	76.1	Arrastra	09:34:50 a.m.	19/05/2014
19	2780	-14	-1652	80.1	Arrastra	09:40:01 a.m.	19/05/2014
20	2934	-13	-1534	84.3	Arrastra	09:44:22 a.m.	19/05/2014
21	3000	-16	-1888	91.2	Arrastra	09:49:38 a.m.	19/05/2014
22	2764	-9	-1062	83.6	Arrastra	09:51:11 a.m.	19/05/2014
23	2843	-13	-1534	85.4	Arrastra	09:59:06 a.m.	19/05/2014
24	2995	-15	-1770	88.7	Arrastra	10:05:49 a.m.	19/05/2014
25	2976	-14	-1652	87.4	Arrastra	10:11:38 a.m.	19/05/2014
26	3000	-14	-1652	90.9	Arrastra	10:16:36 a.m.	19/05/2014
27	3000	-13	-1534	89.6	Arrastra	10:21:18 a.m.	19/05/2014
28	2864	-11	-1298	87.6	Arrastra	10:25:56 a.m.	19/05/2014
29	2764	-15	-1770	79.1	Arrastra	10:31:10 a.m.	19/05/2014
30	2876	-13	-1534	81.5	Arrastra	10:36:07 a.m.	19/05/2014
31	2997	-12	-1416	89.4	Arrastra	10:41:31 a.m.	19/05/2014
32	2943	-11	-1298	88	Arrastra	10:45:02 a.m.	19/05/2014
33	2897	-12	-1416	81.3	Arrastra	10:51:49 a.m.	19/05/2014
34	2961	-13	-1534	87.6	Arrastra	10:57:32 a.m.	19/05/2014
35	2874	-14	-1652	82.4	Arrastra	11:02:05 a.m.	19/05/2014
36	2794	-15	-1770	80.4	Arrastra	11:09:32 a.m.	19/05/2014
37	2890	-11	-1298	84.3	Arrastra	11:12:43 a.m.	19/05/2014
38	3000	-10	-1180	89.1	Arrastra	11:16:10 a.m.	19/05/2014
39	2760	-12	-1416	81.4	Arrastra	11:20:53 a.m.	19/05/2014
40	3000	-9	-1062	89.4	Arrastra	11:23:01 a.m.	19/05/2014
41	3000	-12	-1416	91.2	Arrastra	11:28:00 a.m.	19/05/2014
42	2986	-11	-1298	90.6	Arrastra	11:32:06 a.m.	19/05/2014
43	2940	-10	-1180	88.3	Arrastra	11:38:19 a.m.	19/05/2014
44	2830	-14	-1652	80.4	Arrastra	11:42:11 a.m.	19/05/2014
45	2764	-13	-1534	79.8	Arrastra	11:47:19 a.m.	19/05/2014

46	2694	-11	-1298	75.3	Arrastra	11:52:07 a.m.	19/05/2014
47	2870	-12	-1416	81.4	Arrastra	12:00:00 p.m.	19/05/2014
48	2945	-13	-1534	88.7	Arrastra	01:01:05 p.m.	19/05/2014
49	2953	-11	-1298	87.6	Arrastra	01:04:54 p.m.	19/05/2014
50	2764	-10	-1180	76.9	Arrastra	01:08:42 p.m.	19/05/2014
51	2998	-12	-1416	90.1	Arrastra	01:13:23 p.m.	19/05/2014
52	2876	-13	-1534	84.3	Arrastra	01:21:00 a.m.	19/05/2014
53	2734	-14	-1652	79.4	Arrastra	01:24:53 p.m.	19/05/2014
54	3000	-15	-1770	89.5	Arrastra	01:32:40 p.m.	19/05/2014
55	3000	-12	-1416	90.1	Arrastra	01:37:10 p.m.	19/05/2014
56	2946	-11	-1298	88.3	Arrastra	01:46:49 p.m.	19/05/2014
57	2764	-10	-1180	80.1	Arrastra	01:51:11 p.m.	19/05/2014
58	2895	-11	-1298	87.4	Arrastra	01:55:24 p.m.	19/05/2014
59	2810	-15	-1770	84.6	Arrastra	02:02:35 p.m.	19/05/2014
60	2976	-9	-1062	89.3	Arrastra	02:07:00 p.m.	19/05/2014
61	3000	-12	-1416	90.4	Arrastra	02:12:36 p.m.	19/05/2014
62	2761	-15	-1770	84.6	Arrastra	02:18:20 p.m.	19/05/2014
63	2954	-14	-1652	87.2	Arrastra	02:24:30 p.m.	19/05/2014
64	2876	-11	-1298	81.4	Arrastra	02:29:40 p.m.	19/05/2014
65	2941	-12	-1416	88.6	Arrastra	02:36:01 p.m.	19/05/2014
66	2985	-13	-1534	89.4	Arrastra	02:42:18 p.m.	19/05/2014
67	2798	-15	-1770	80.4	Arrastra	02:48:24 p.m.	19/05/2014
68	2890	-9	-1062	84.6	Arrastra	02:51:09 p.m.	19/05/2014
69	3000	-10	-1180	89.3	Arrastra	02:56:07 p.m.	19/05/2014
70	3000	-11	-1298	91.1	Arrastra	03:00:52 p.m.	19/05/2014
71	2879	-19	-2242	88.1	Arrastra	03:06:18 p.m.	19/05/2014
72	2843	-11	-1298	84.5	Arrastra	03:11:07 p.m.	19/05/2014
73	2973	-13	-1534	89.1	Arrastra	03:16:47 p.m.	19/05/2014
74	2981	-19	-2242	86.3	Arrastra	03:20:04 p.m.	19/05/2014
75	2945	-15	-1770	88.1	Arrastra	03:26:18 p.m.	19/05/2014
76	2976	-9	-1062	88.2	Arrastra	03:31:00 p.m.	19/05/2014
77	2830	-10	-1180	81.4	Arrastra	03:35:07 p.m.	19/05/2014
78	2764	-11	-1298	79.4	Arrastra	03:41:29 p.m.	19/05/2014
79	2953	-13	-1534	87.3	Arrastra	03:45:38 p.m.	19/05/2014
80	2994	-15	-1770	89.4	Arrastra	03:49:01 p.m.	19/05/2014
81	2776	-15	-1770	81.2	Arrastra	03:52:18 p.m.	19/05/2014
82	3000	-15	-1770	90.1	Arrastra	03:56:35 p.m.	19/05/2014
83	2768	-14	-1652	79.3	Arrastra	03:59:50 p.m.	19/05/2014
84	2913	-14	-1652	85.4	Arrastra	04:03:15 a.m.	19/05/2014
85	2937	-13	-1534	87.1	Arrastra	04:07:53 p.m.	19/05/2014
86	2842	-12	-1416	84.3	Arrastra	04:11:30 p.m.	19/05/2014
87	3000	-11	-1298	91.4	Arrastra	04:14:00 p.m.	19/05/2014
88	2674	-10	-1180	77.7	Arrastra	04:22:45 a.m.	19/05/2014
89	2981	-11	-1298	89.3	Arrastra	04:26:05 p.m.	19/05/2014
90	2997	-12	-1416	89.4	Arrastra	04:31:40 p.m.	19/05/2014
91	2768	-11	-1298	80.1	Arrastra	04:34:50 p.m.	19/05/2014
92	2945	-10	-1180	84.5	Arrastra	04:37:10 p.m.	19/05/2014
93	2941	-9	-1062	84.3	Arrastra	04:45:01 p.m.	19/05/2014
94	3000	-16	-1888	90.5	Arrastra	04:52:26 p.m.	19/05/2014
95	2974	-15	-1770	89.6	Arrastra	04:55:18 p.m.	19/05/2014
96	2981	-15	-1770	89.5	Arrastra	05:00:54 p.m.	19/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

**Tabla C4.** Datos muestreados de arranque de motor AC sin el sistema electrónico compensador de torque el día 20-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque máximo (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (°C)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	2994	-16	-1888	89.4	Arrastra	08:00:22 a.m.	20/05/2014
02	3000	-13	-1534	90.3	Arrastra	08:06:10 a.m.	20/05/2014
03	2891	-12	-1416	84.3	Arrastra	08:11:07 a.m.	20/05/2014
04	2794	-10	-1180	80.6	Arrastra	08:15:18 a.m.	20/05/2014
05	2894	-11	-1298	85.2	Arrastra	08:20:46 a.m.	20/05/2014
06	2973	-9	-1062	88.3	Arrastra	08:24:03 a.m.	20/05/2014
07	3000	-11	-1298	90.1	Arrastra	08:29:17 a.m.	20/05/2014
08	2973	-15	-1770	89.4	Arrastra	08:32:54 a.m.	20/05/2014
09	2850	-9	-1062	84.2	Arrastra	08:37:20 a.m.	20/05/2014
10	2975	-15	-1770	88.6	Arrastra	08:41:50 a.m.	20/05/2014
11	2941	-9	-1062	88.2	Arrastra	08:46:23 a.m.	20/05/2014
12	2876	-13	-1534	84.3	Arrastra	08:51:04 a.m.	20/05/2014
13	3000	-14	-1652	90.4	Arrastra	08:55:16 a.m.	20/05/2014
14	2764	-12	-1416	76.4	Arrastra	08:59:02 a.m.	20/05/2014
15	2790	-11	-1298	79.6	Arrastra	09:04:33 a.m.	20/05/2014
16	2948	-13	-1534	85.3	Arrastra	09:09:09 a.m.	20/05/2014
17	2986	-11	-1298	88.4	Arrastra	09:12:55 a.m.	20/05/2014
18	2786	-12	-1416	78.8	Arrastra	09:18:04 a.m.	20/05/2014
19	2884	-11	-1298	80.4	Arrastra	09:22:07 a.m.	20/05/2014
20	2976	-13	-1534	88.4	Arrastra	09:27:00 a.m.	20/05/2014
21	2790	-11	-1298	80.6	Arrastra	09:31:20 a.m.	20/05/2014
22	3000	-10	-1180	89.4	Arrastra	09:35:43 a.m.	20/05/2014
23	2876	-9	-1062	85.1	Arrastra	09:39:08 a.m.	20/05/2014
24	2947	-10	-1180	88.1	Arrastra	09:43:12 a.m.	20/05/2014
25	3000	-9	-1062	91.4	Arrastra	09:48:38 a.m.	20/05/2014
26	2849	-10	-1180	85.3	Arrastra	09:52:47 a.m.	20/05/2014
27	2976	-11	-1298	89.7	Arrastra	09:57:40 a.m.	20/05/2014
28	2878	-13	-1534	82.4	Arrastra	10:02:55 a.m.	20/05/2014
29	2997	-12	-1416	89.9	Arrastra	10:07:40 a.m.	20/05/2014
30	3000	-13	-1534	90.3	Arrastra	10:12:07 a.m.	20/05/2014
31	2786	-15	-1770	78.4	Arrastra	10:19:24 a.m.	20/05/2014
32	3000	-14	-1652	89.6	Arrastra	10:23:58 a.m.	20/05/2014
33	2974	-15	-1770	89.4	Arrastra	10:28:45 a.m.	20/05/2014
34	2981	-15	-1770	89.4	Arrastra	10:33:00 a.m.	20/05/2014
35	2794	-14	-1652	80.1	Arrastra	10:38:14 a.m.	20/05/2014
36	3000	-11	-1298	89.2	Arrastra	10:42:16 a.m.	20/05/2014
37	3000	-9	-1062	91.7	Arrastra	10:47:08 a.m.	20/05/2014
38	2786	-15	-1770	81.3	Arrastra	10:51:36 a.m.	20/05/2014
39	2994	-13	-1534	89.4	Arrastra	10:55:28 a.m.	20/05/2014
40	2971	-9	-1062	89.4	Arrastra	10:59:59 a.m.	20/05/2014
41	2851	-15	-1770	85.2	Arrastra	11:04:18 a.m.	20/05/2014
42	2853	-14	-1652	85.3	Arrastra	11:10:02 a.m.	20/05/2014
43	3000	-13	-1534	89.4	Arrastra	11:15:49 a.m.	20/05/2014
44	2749	-11	-1298	75.9	Arrastra	11:21:40 a.m.	20/05/2014
45	2976	-10	-1180	88.4	Arrastra	11:26:01 a.m.	20/05/2014

46	2876	-9	-1062	85.4	Arrastra	11:31:08 a.m.	20/05/2014
47	2761	-13	-1534	76.3	Arrastra	11:35:50 a.m.	20/05/2014
48	2948	-12	-1416	88.3	Arrastra	11:40:12 a.m.	20/05/2014
49	2857	-11	-1298	85.4	Arrastra	11:46:18 a.m.	20/05/2014
50	2875	-15	-1770	85.6	Arrastra	11:52:32 a.m.	20/05/2014
51	2784	-14	-1652	78.7	Arrastra	11:58:59 a.m.	20/05/2014
52	2976	-12	-1416	88.1	Arrastra	01:00:01 p.m.	20/05/2014
53	2798	-13	-1534	79.8	Arrastra	01:04:08 p.m.	20/05/2014
54	3000	-11	-1298	89.9	Arrastra	01:07:59 p.m.	20/05/2014
55	2871	-15	-1770	85.4	Arrastra	01:11:46 p.m.	20/05/2014
56	3000	-15	-1770	90.4	Arrastra	01:14:04 p.m.	20/05/2014
57	2768	-12	-1416	78.6	Arrastra	01:19:50 p.m.	20/05/2014
58	2779	-15	-1770	79.4	Arrastra	01:23:41 p.m.	20/05/2014
59	2846	-13	-1534	82.1	Arrastra	01:28:05 p.m.	20/05/2014
60	2911	-13	-1534	86.3	Arrastra	01:31:48 p.m.	20/05/2014
61	2907	-11	-1298	86.4	Arrastra	01:36:00 p.m.	20/05/2014
62	3000	-10	-1180	90.4	Arrastra	01:43:40 p.m.	20/05/2014
63	2946	-15	-1770	89.3	Arrastra	01:47:05 p.m.	20/05/2014
64	2768	-12	-1416	76.6	Arrastra	02:01:56 p.m.	20/05/2014
65	2946	-19	-2242	88.4	Arrastra	02:06:51 p.m.	20/05/2014
66	2768	-13	-1534	76.3	Arrastra	02:12:23 p.m.	20/05/2014
67	3000	-15	-1770	89.4	Arrastra	02:19:01 p.m.	20/05/2014
68	2845	-19	-2242	85.5	Arrastra	02:24:30 p.m.	20/05/2014
69	2761	-10	-1180	79.4	Arrastra	02:29:42 p.m.	20/05/2014
70	2940	-9	-1062	89.6	Arrastra	02:35:17 p.m.	20/05/2014
71	3000	-15	-1770	90.4	Arrastra	02:39:08 p.m.	20/05/2014
72	2976	-13	-1534	90.5	Arrastra	02:43:42 p.m.	20/05/2014
73	2991	-12	-1416	90.6	Arrastra	02:49:00 p.m.	20/05/2014
74	2970	-13	-1534	89.7	Arrastra	02:52:07 p.m.	20/05/2014
75	3000	-15	-1770	91.2	Arrastra	02:58:14 p.m.	20/05/2014
76	2976	-11	-1298	90.9	Arrastra	03:01:15 p.m.	20/05/2014
77	2894	-14	-1652	85.4	Arrastra	03:05:07 p.m.	20/05/2014
78	2791	-13	-1534	79.6	Arrastra	03:11:57 p.m.	20/05/2014
79	2784	-15	-1770	79.4	Arrastra	03:15:19 p.m.	20/05/2014
80	2867	-13	-1534	82.1	Arrastra	03:19:33 p.m.	20/05/2014
81	2745	-12	-1416	78.4	Arrastra	03:23:01 p.m.	20/05/2014
82	3000	-9	-1062	90.6	Arrastra	03:28:15 p.m.	20/05/2014
83	2751	-13	-1534	76.4	Arrastra	03:35:00 p.m.	20/05/2014
84	2764	-14	-1652	76.8	Arrastra	03:43:52 p.m.	20/05/2014
85	2597	-15	-1770	71.5	Arrastra	03:50:02 p.m.	20/05/2014
86	2798	-15	-1770	80.4	Arrastra	03:57:15 p.m.	20/05/2014
87	2846	-15	-1770	84.6	Arrastra	04:04:26 p.m.	20/05/2014
88	3000	-13	-1534	89.7	Arrastra	04:10:43 p.m.	20/05/2014
89	2978	-15	-1770	88.8	Arrastra	04:18:05 p.m.	20/05/2014
90	2948	-9	-1062	88.9	Arrastra	04:26:28 p.m.	20/05/2014
91	2768	-12	-1416	76.4	Arrastra	04:33:14 p.m.	20/05/2014
92	3000	-11	-1298	90.1	Arrastra	04:40:05 p.m.	20/05/2014
93	2964	-13	-1534	89.6	Arrastra	04:44:35 p.m.	20/05/2014
94	3000	-15	-1770	91	Arrastra	04:49:11 p.m.	20/05/2014
95	2768	-14	-1652	78.6	Arrastra	04:54:58 p.m.	20/05/2014
96	2894	-16	-1888	84.1	Arrastra	04:59:45 p.m.	20/05/2014

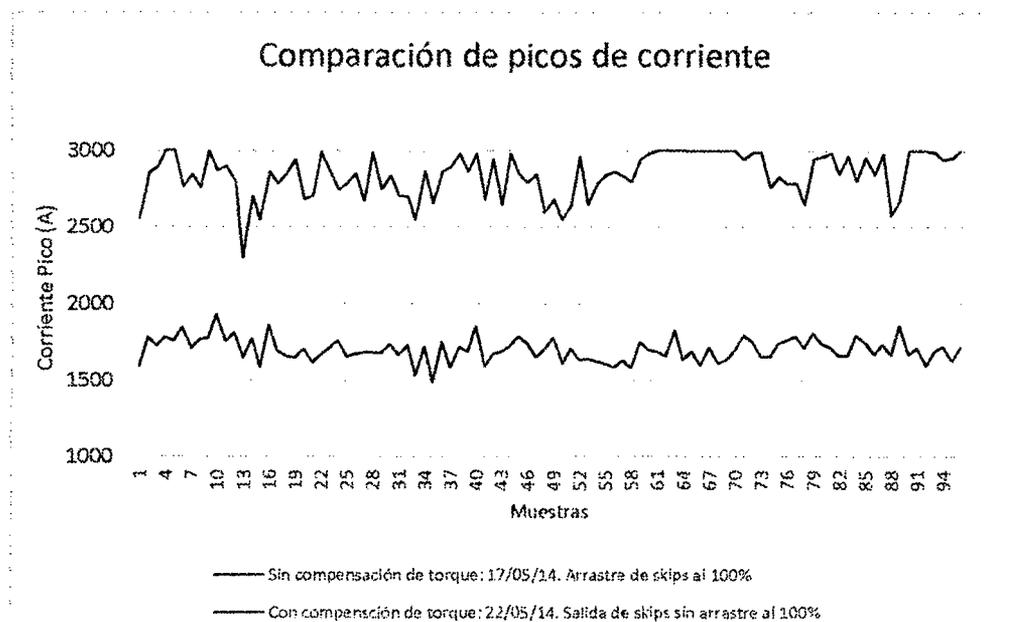
Fuente: Sistematizado por el autor.

**Tabla C5.** Datos muestreados de arranque de motor AC con el sistema electrónico compensador de torque el día 22-05-14

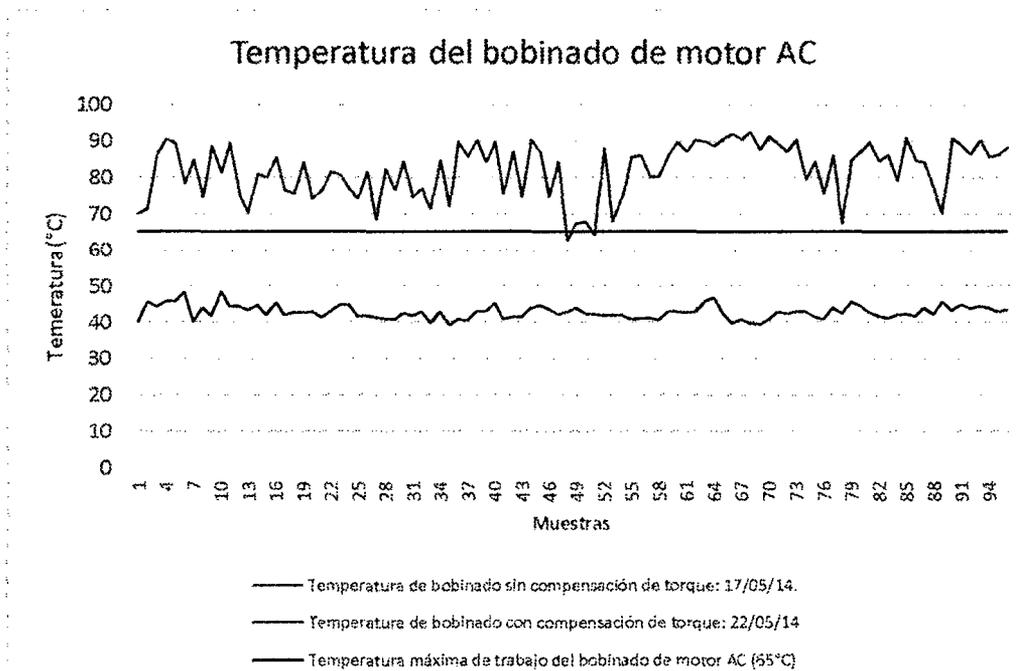
N° muestra	Corriente pico (A)	Torque (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (C°)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	1588	156	18408	40.1	No arrastra	08:00:00 a.m.	22/05/2014
02	1782	169	19942	45.6	No arrastra	08:02:35 a.m.	22/05/2014
03	1721	163	19234	44.2	No arrastra	08:05:10 a.m.	22/05/2014
04	1783	167	19706	45.8	No arrastra	08:07:45 a.m.	22/05/2014
05	1757	165	19470	45.7	No arrastra	08:10:20 a.m.	22/05/2014
06	1841	178	21004	48.1	No arrastra	08:12:55 a.m.	22/05/2014
07	1709	161	18998	40.1	No arrastra	08:15:30 a.m.	22/05/2014
08	1770	168	19824	43.9	No arrastra	08:18:05 a.m.	22/05/2014
09	1779	169	19942	41.7	No arrastra	08:20:40 a.m.	22/05/2014
10	1930	183	21594	48.5	No arrastra	08:23:15 a.m.	22/05/2014
11	1756	186	21948	44.2	No arrastra	08:25:50 a.m.	22/05/2014
12	1808	172	20296	44.3	No arrastra	08:28:25 a.m.	22/05/2014
13	1650	157	18526	43.3	No arrastra	08:31:00 a.m.	22/05/2014
14	1774	169	19942	44.7	No arrastra	09:06:44 a.m.	22/05/2014
15	1586	158	18644	42	No arrastra	09:11:52 a.m.	22/05/2014
16	1859	178	21004	45.4	No arrastra	09:14:23 a.m.	22/05/2014
17	1689	158	18644	41.9	No arrastra	09:16:54 a.m.	22/05/2014
18	1657	157	18526	42.6	No arrastra	09:19:25 a.m.	22/05/2014
19	1647	155	18290	42.5	No arrastra	09:21:56 a.m.	22/05/2014
20	1700	160	18880	42.7	No arrastra	09:24:27 a.m.	22/05/2014
21	1613	150	17700	41.2	No arrastra	09:26:58 a.m.	22/05/2014
22	1664	153	18054	42.7	No arrastra	09:29:29 a.m.	22/05/2014
23	1709	160	18880	44.9	No arrastra	09:32:00 a.m.	22/05/2014
24	1756	166	19588	44.7	No arrastra	09:34:31 a.m.	22/05/2014
25	1649	155	18290	41.5	No arrastra	09:37:02 a.m.	22/05/2014
26	1673	156	18408	41.7	No arrastra	09:39:33 a.m.	22/05/2014
27	1682	156	18408	41.3	No arrastra	09:42:04 a.m.	22/05/2014
28	1682	157	18526	40.9	No arrastra	09:44:35 a.m.	22/05/2014
29	1676	157	18526	40.7	No arrastra	09:47:06 a.m.	22/05/2014
30	1735	164	19352	42.5	No arrastra	09:49:37 a.m.	22/05/2014
31	1664	155	18290	41.8	No arrastra	09:52:08 a.m.	22/05/2014
32	1724	161	18998	42.7	No arrastra	09:54:39 a.m.	22/05/2014
33	1533	150	17700	39.8	No arrastra	09:57:10 a.m.	22/05/2014
34	1718	160	18880	42.7	No arrastra	09:59:41 a.m.	22/05/2014
35	1486	148	17464	39.1	No arrastra	10:02:12 a.m.	22/05/2014
36	1744	164	19352	40.7	No arrastra	10:04:43 a.m.	22/05/2014
37	1583	149	17582	40.5	No arrastra	10:07:14 a.m.	22/05/2014
38	1714	160	18880	42.9	No arrastra	10:09:45 a.m.	22/05/2014
39	1685	158	18644	42.7	No arrastra	10:12:16 a.m.	22/05/2014
40	1850	179	21122	45.3	No arrastra	10:14:47 a.m.	22/05/2014
41	1586	149	17582	40.7	No arrastra	10:17:18 a.m.	22/05/2014
42	1671	157	18526	41.3	No arrastra	10:19:49 a.m.	22/05/2014
43	1686	158	18644	41.3	No arrastra	10:22:20 a.m.	22/05/2014
44	1723	161	18998	43.7	No arrastra	10:24:51 a.m.	22/05/2014
45	1787	169	19942	44.7	No arrastra	10:27:22 a.m.	22/05/2014

46	1740	169	19942	43.5	No arrastra	10:29:53 a.m.	22/05/2014
47	1653	155	18290	42.1	No arrastra	10:32:24 a.m.	22/05/2014
48	1701	161	18998	42.7	No arrastra	10:34:55 a.m.	22/05/2014
49	1777	168	19824	43.8	No arrastra	01:00:10 p.m.	22/05/2014
50	1609	150	17700	42.3	No arrastra	01:02:35 p.m.	22/05/2014
51	1706	161	18998	42.1	No arrastra	01:05:00 p.m.	22/05/2014
52	1632	153	18054	41.7	No arrastra	01:07:25 p.m.	22/05/2014
53	1642	154	18172	41.7	No arrastra	01:09:50 p.m.	22/05/2014
54	1627	152	17936	41.8	No arrastra	01:12:15 p.m.	22/05/2014
55	1607	150	17700	40.7	No arrastra	01:14:40 p.m.	22/05/2014
56	1587	150	17700	40.9	No arrastra	01:17:05 p.m.	22/05/2014
57	1629	151	17818	41.1	No arrastra	01:19:30 p.m.	22/05/2014
58	1582	150	17700	40.6	No arrastra	01:21:55 p.m.	22/05/2014
59	1749	165	19470	42.7	No arrastra	01:24:20 p.m.	22/05/2014
60	1699	159	18762	42.7	No arrastra	01:26:45 p.m.	22/05/2014
61	1687	158	18644	42.5	No arrastra	01:29:10 p.m.	22/05/2014
62	1658	155	18290	42.8	No arrastra	01:31:35 p.m.	22/05/2014
63	1825	174	20532	45.9	No arrastra	01:34:00 p.m.	22/05/2014
64	1635	153	18054	46.7	No arrastra	02:17:10 p.m.	22/05/2014
65	1688	158	18644	42.5	No arrastra	02:19:45 p.m.	22/05/2014
66	1596	150	17700	39.8	No arrastra	02:22:20 p.m.	22/05/2014
67	1714	162	19116	40.7	No arrastra	02:24:55 p.m.	22/05/2014
68	1609	150	17700	39.8	No arrastra	02:27:30 p.m.	22/05/2014
69	1639	153	18054	39.5	No arrastra	02:30:05 p.m.	22/05/2014
70	1697	159	18762	40.7	No arrastra	02:32:40 p.m.	22/05/2014
71	1794	170	20060	42.8	No arrastra	02:35:15 p.m.	22/05/2014
72	1752	165	19470	42.3	No arrastra	02:37:50 p.m.	22/05/2014
73	1655	155	18290	42.7	No arrastra	02:40:25 p.m.	22/05/2014
74	1652	155	18290	42.8	No arrastra	02:43:00 p.m.	22/05/2014
75	1739	164	19352	41.5	No arrastra	02:45:35 p.m.	22/05/2014
76	1762	167	19706	40.7	No arrastra	02:48:10 p.m.	22/05/2014
77	1784	169	19942	43.8	No arrastra	02:50:45 p.m.	22/05/2014
78	1710	162	19116	42.2	No arrastra	02:53:20 p.m.	22/05/2014
79	1806	172	20296	45.6	No arrastra	02:55:55 p.m.	22/05/2014
80	1734	164	19352	44.3	No arrastra	02:58:30 p.m.	22/05/2014
81	1711	162	19116	42.7	No arrastra	03:01:05 p.m.	22/05/2014
82	1656	155	18290	41.6	No arrastra	03:03:40 p.m.	22/05/2014
83	1663	156	18408	41.1	No arrastra	03:06:15 p.m.	22/05/2014
84	1792	170	20060	42	No arrastra	03:08:50 p.m.	22/05/2014
85	1746	165	19470	42.3	No arrastra	03:11:25 p.m.	22/05/2014
86	1670	157	18526	41.6	No arrastra	03:14:00 p.m.	22/05/2014
87	1735	164	19352	43.7	No arrastra	04:15:14 p.m.	22/05/2014
88	1667	156	18408	42.1	No arrastra	04:17:48 p.m.	22/05/2014
89	1855	176	20768	45.8	No arrastra	04:20:22 p.m.	22/05/2014
90	1669	156	18408	43.1	No arrastra	04:22:56 p.m.	22/05/2014
91	1708	161	18998	44.9	No arrastra	04:25:30 p.m.	22/05/2014
92	1592	150	17700	43.6	No arrastra	04:28:04 p.m.	22/05/2014
93	1689	158	18644	44.5	No arrastra	04:30:38 p.m.	22/05/2014
94	1717	162	19116	43.7	No arrastra	04:51:10 p.m.	22/05/2014
95	1620	152	17936	42.7	No arrastra	04:56:18 p.m.	22/05/2014
96	1715	162	19116	43.2	No arrastra	05:01:26 p.m.	22/05/2014

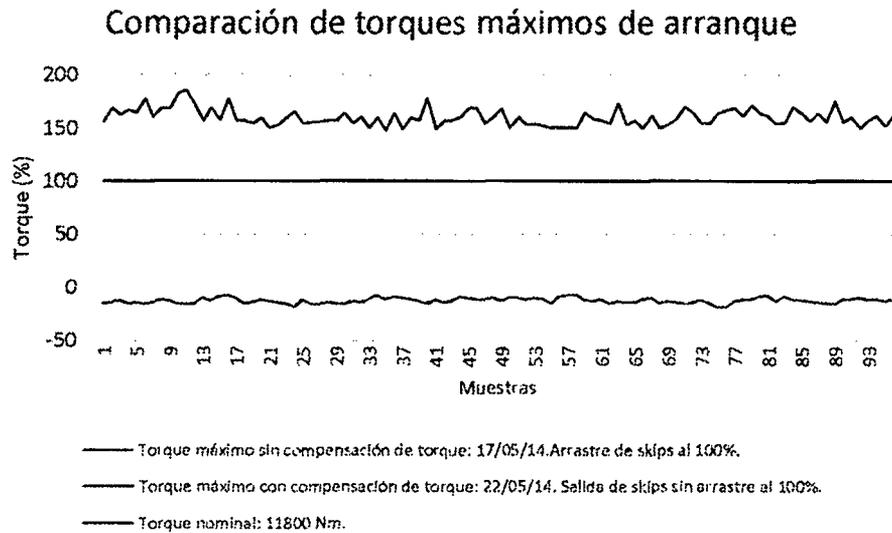
Fuente: Sistematizado por el autor.



**Figura C.1.** Representación gráfica de los datos muestreados del pico de arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.



**Figura C.2.** Representación gráfica de los datos muestreados de temperatura del bobinado alcanzada durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.



**Figura C.3.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque máximo durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.

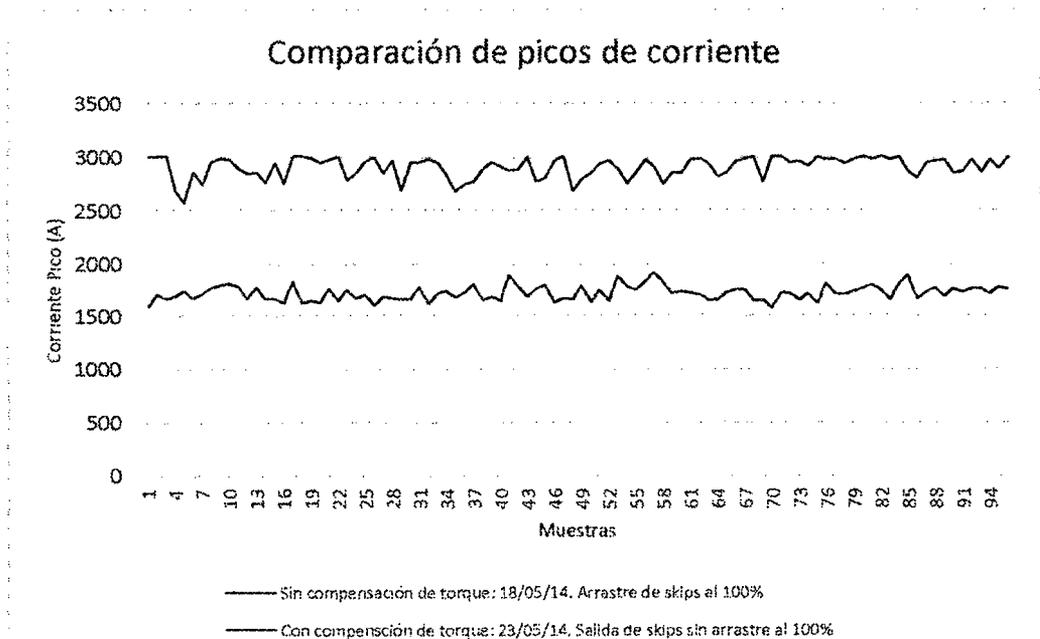
**Tabla C6.** Datos muestreados de arranque de motor AC con el sistema electrónico compensador de torque el día 23-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura a bobinado (C°)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	1586	149	17582	40.9	No arrastra	08:01:15 a.m.	23/05/2014
02	1701	161	18998	42.5	No arrastra	08:03:50 a.m.	23/05/2014
03	1661	156	18408	41.5	No arrastra	08:06:25 a.m.	23/05/2014
04	1688	158	18644	40.9	No arrastra	08:09:00 a.m.	23/05/2014
05	1738	164	19352	42.6	No arrastra	08:11:35 a.m.	23/05/2014
06	1669	157	18526	41.7	No arrastra	08:14:10 a.m.	23/05/2014
07	1706	161	18998	42	No arrastra	08:16:45 a.m.	23/05/2014
08	1762	167	19706	42.7	No arrastra	08:19:20 a.m.	23/05/2014
09	1790	170	20060	42.3	No arrastra	08:21:55 a.m.	23/05/2014
10	1805	171	20178	44.1	No arrastra	08:24:30 a.m.	23/05/2014
11	1776	168	19824	43.2	No arrastra	08:27:05 a.m.	23/05/2014
12	1664	156	18408	45.8	No arrastra	08:29:40 a.m.	23/05/2014
13	1772	167	19706	44.1	No arrastra	08:32:15 a.m.	23/05/2014
14	1665	156	18408	43.2	No arrastra	08:34:50 a.m.	23/05/2014
15	1664	156	18408	41.8	No arrastra	08:37:25 a.m.	23/05/2014
16	1630	153	18054	42	No arrastra	09:18:15 a.m.	23/05/2014
17	1824	173	20414	43.1	No arrastra	09:20:50 a.m.	23/05/2014
18	1621	152	17936	42.8	No arrastra	09:23:25 a.m.	23/05/2014
19	1644	154	18172	42.7	No arrastra	09:26:00 a.m.	23/05/2014
20	1629	152	17936	41.6	No arrastra	09:28:35 a.m.	23/05/2014
21	1756	166	19588	44.1	No arrastra	09:31:10 a.m.	23/05/2014
22	1645	154	18172	42.6	No arrastra	09:33:45 a.m.	23/05/2014

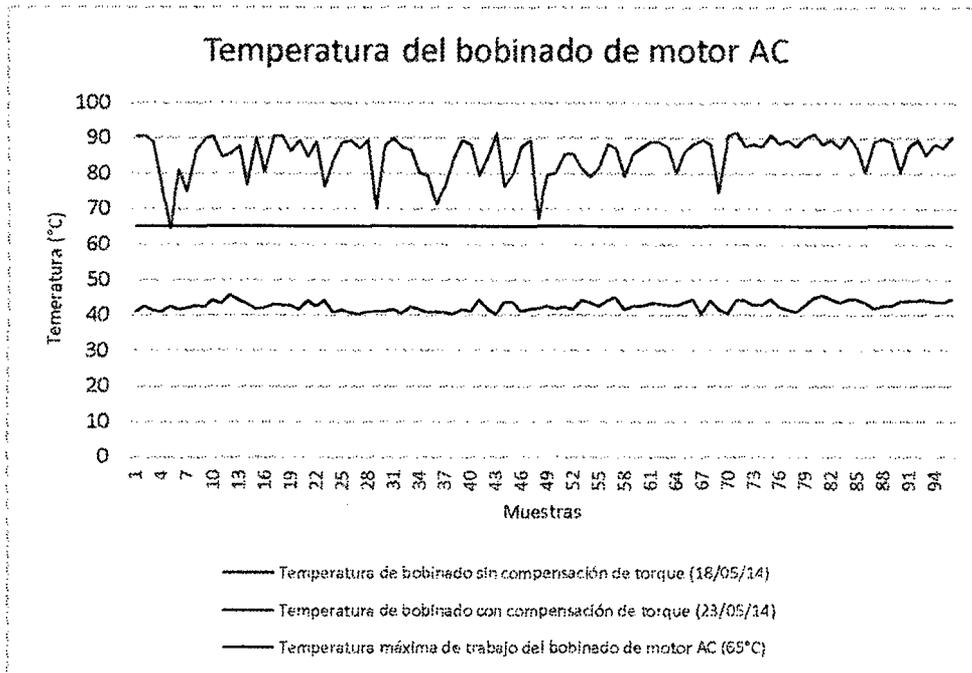
23	1746	165	19470	44.1	No arrastra	09:36:20 a.m.	23/05/2014
24	1668	156	18408	40.8	No arrastra	09:38:55 a.m.	23/05/2014
25	1705	161	18998	41.5	No arrastra	09:41:30 a.m.	23/05/2014
26	1592	150	17700	40.7	No arrastra	09:44:05 a.m.	23/05/2014
27	1682	158	18644	40.3	No arrastra	09:46:40 a.m.	23/05/2014
28	1670	157	18526	40.9	No arrastra	09:49:15 a.m.	23/05/2014
29	1659	155	18290	41.1	No arrastra	09:51:50 a.m.	23/05/2014
30	1655	155	18290	41	No arrastra	09:54:25 a.m.	23/05/2014
31	1770	168	19824	41.7	No arrastra	09:57:00 a.m.	23/05/2014
32	1616	151	17818	40.5	No arrastra	09:59:35 a.m.	23/05/2014
33	1712	161	18998	42.3	No arrastra	10:02:10 a.m.	23/05/2014
34	1738	164	19352	41.6	No arrastra	10:04:45 a.m.	23/05/2014
35	1677	157	18526	40.7	No arrastra	10:07:20 a.m.	23/05/2014
36	1717	162	19116	40.9	No arrastra	10:09:55 a.m.	23/05/2014
37	1799	170	20060	40.7	No arrastra	10:12:30 a.m.	23/05/2014
38	1653	155	18290	40.3	No arrastra	11:34:08 a.m.	23/05/2014
39	1678	157	18526	41.6	No arrastra	11:36:43 a.m.	23/05/2014
40	1648	154	18172	41.2	No arrastra	11:39:18 a.m.	23/05/2014
41	1880	179	21122	44.5	No arrastra	11:41:53 a.m.	23/05/2014
42	1783	167	19706	41.9	No arrastra	11:44:28 a.m.	23/05/2014
43	1688	158	18644	40.2	No arrastra	11:47:03 a.m.	23/05/2014
44	1748	165	19470	43.7	No arrastra	11:49:38 a.m.	23/05/2014
45	1791	170	20060	43.5	No arrastra	11:52:13 a.m.	23/05/2014
46	1627	152	17936	41.2	No arrastra	11:54:48 a.m.	23/05/2014
47	1670	157	18526	41.8	No arrastra	11:57:23 a.m.	23/05/2014
48	1657	155	18290	41.8	No arrastra	01:00:00 p.m.	23/05/2014
49	1785	169	19942	42.6	No arrastra	01:02:35 p.m.	23/05/2014
50	1635	153	18054	41.8	No arrastra	01:05:10 p.m.	23/05/2014
51	1744	165	19470	42.3	No arrastra	01:07:45 p.m.	23/05/2014
52	1645	154	18172	41.7	No arrastra	01:10:20 p.m.	23/05/2014
53	1875	177	20886	44.1	No arrastra	01:12:55 p.m.	23/05/2014
54	1773	169	19942	43.6	No arrastra	01:15:30 p.m.	23/05/2014
55	1742	164	19352	42.5	No arrastra	01:18:05 p.m.	23/05/2014
56	1823	173	20414	44.3	No arrastra	01:20:40 p.m.	23/05/2014
57	1910	181	21358	45.1	No arrastra	01:23:15 p.m.	23/05/2014
58	1819	171	20178	41.7	No arrastra	01:25:50 p.m.	23/05/2014
59	1717	162	19116	42.5	No arrastra	01:28:25 p.m.	23/05/2014
60	1731	164	19352	42.5	No arrastra	01:31:00 p.m.	23/05/2014
61	1722	162	19116	43.2	No arrastra	01:33:35 p.m.	23/05/2014
62	1704	160	18880	43.3	No arrastra	01:36:10 p.m.	23/05/2014
63	1646	154	18172	42.9	No arrastra	01:38:45 p.m.	23/05/2014
64	1659	155	18290	42.7	No arrastra	01:41:20 p.m.	23/05/2014
65	1722	163	19234	43.5	No arrastra	01:43:55 p.m.	23/05/2014
66	1745	164	19352	44.6	No arrastra	01:46:30 p.m.	23/05/2014
67	1750	166	19588	40.4	No arrastra	01:49:05 p.m.	23/05/2014
68	1643	155	18290	44.2	No arrastra	01:51:40 p.m.	23/05/2014
69	1651	155	18290	41.6	No arrastra	01:54:15 p.m.	23/05/2014
70	1575	149	17582	40.5	No arrastra	01:56:50 p.m.	23/05/2014

71	1720	163	19234	44.3	No arrastra	01:59:25 p.m.	23/05/2014
72	1706	161	18998	44.1	No arrastra	02:02:00 p.m.	23/05/2014
73	1652	155	18290	42.8	No arrastra	02:04:35 p.m.	23/05/2014
74	1706	161	18998	42.8	No arrastra	02:07:10 p.m.	23/05/2014
75	1610	150	17700	44.7	No arrastra	02:09:45 p.m.	23/05/2014
76	1811	171	20178	42.3	No arrastra	02:12:20 p.m.	23/05/2014
77	1709	160	18880	41.6	No arrastra	02:14:55 p.m.	23/05/2014
78	1703	160	18880	40.9	No arrastra	02:17:30 p.m.	23/05/2014
79	1733	163	19234	42.8	No arrastra	02:20:05 p.m.	23/05/2014
80	1760	167	19706	44.9	No arrastra	02:22:40 p.m.	23/05/2014
81	1789	169	19942	45.6	No arrastra	02:25:15 p.m.	23/05/2014
82	1745	164	19352	44.8	No arrastra	02:27:50 p.m.	23/05/2014
83	1649	154	18172	43.5	No arrastra	02:30:25 p.m.	23/05/2014
84	1800	170	20060	44.6	No arrastra	02:33:00 p.m.	23/05/2014
85	1879	178	21004	44.7	No arrastra	04:31:55 a.m.	23/05/2014
86	1661	156	18408	43.5	No arrastra	04:34:30 a.m.	23/05/2014
87	1723	162	19116	41.8	No arrastra	04:37:05 a.m.	23/05/2014
88	1763	167	19706	42.5	No arrastra	04:39:40 a.m.	23/05/2014
89	1685	159	18762	42.5	No arrastra	04:42:15 a.m.	23/05/2014
90	1751	165	19470	43.7	No arrastra	04:44:50 a.m.	23/05/2014
91	1723	162	19116	43.9	No arrastra	04:47:25 a.m.	23/05/2014
92	1748	165	19470	44.1	No arrastra	04:50:00 a.m.	23/05/2014
93	1748	164	19352	44.2	No arrastra	04:52:35 a.m.	23/05/2014
94	1706	161	18998	43.7	No arrastra	04:55:10 a.m.	23/05/2014
95	1766	167	19706	43.6	No arrastra	04:57:45 a.m.	23/05/2014
96	1747	164	19352	44.7	No arrastra	05:00:20 a.m.	23/05/2014

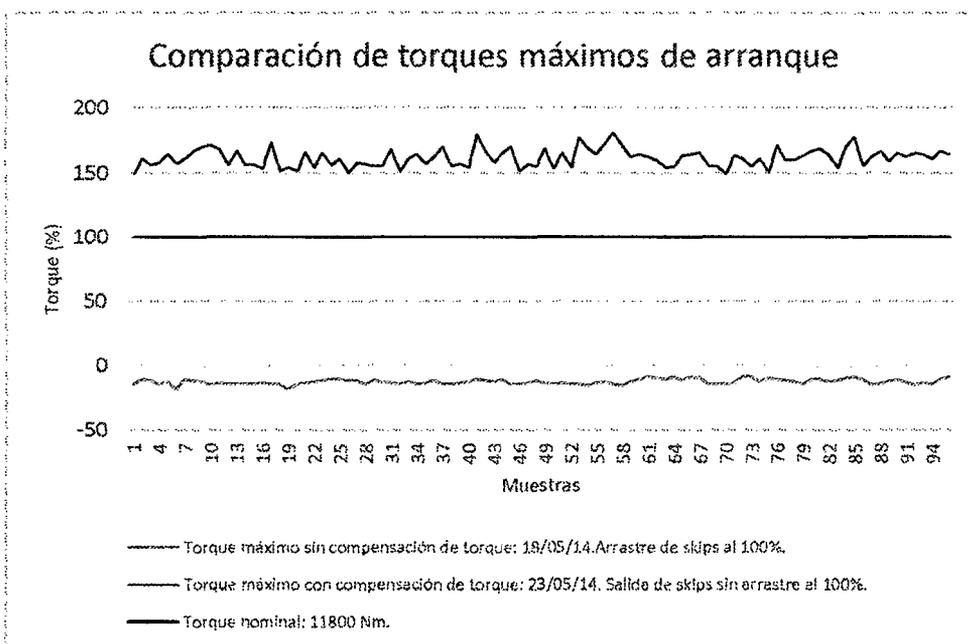
Fuente: Sistematizado por el autor.



**Figura C.4.** Representación gráfica de los datos muestreados del pico de arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 18 y 23 de mayo del 2014 respectivamente.



**Figura C.5.** Representación gráfica de los datos muestreados de temperatura del bobinado alcanzada durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 18 y 23 de mayo del 2014 respectivamente.



**Figura C.6.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque máximo durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 18 y 23 de mayo del 2014 respectivamente.

**Tabla C7.** Datos muestreados de arranque de motor AC con el sistema electrónico compensador de torque el día 24-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (C°)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	1733	163	19234	44.5	No arrastra	08:01:01 a.m.	24/05/2014
02	1748	164	19352	44.6	No arrastra	08:03:36 a.m.	24/05/2014
03	1748	165	19470	44.5	No arrastra	08:06:11 a.m.	24/05/2014
04	1839	174	20532	44.8	No arrastra	08:08:46 a.m.	24/05/2014
05	1744	164	19352	44.3	No arrastra	08:11:21 a.m.	24/05/2014
06	1696	160	18880	43.9	No arrastra	08:13:56 a.m.	24/05/2014
07	1770	167	19706	43.8	No arrastra	08:16:31 a.m.	24/05/2014
08	1699	160	18880	42.9	No arrastra	08:19:06 a.m.	24/05/2014
09	1683	167	19706	41.7	No arrastra	08:21:41 a.m.	24/05/2014
10	1727	162	19116	44.6	No arrastra	08:24:16 a.m.	24/05/2014
11	1683	158	18644	42.8	No arrastra	08:26:51 a.m.	24/05/2014
12	1911	182	21476	46.3	No arrastra	08:29:26 a.m.	24/05/2014
13	1851	175	20650	44.7	No arrastra	08:32:01 a.m.	24/05/2014
14	1812	171	20178	44.1	No arrastra	08:34:36 a.m.	24/05/2014
15	1764	165	19470	44.5	No arrastra	08:37:11 a.m.	24/05/2014
16	1699	160	18880	33.8	No arrastra	08:39:46 a.m.	24/05/2014
17	1713	161	18998	44.3	No arrastra	08:42:21 a.m.	24/05/2014
18	1792	169	19942	44.1	No arrastra	08:44:56 a.m.	24/05/2014
19	1737	164	19352	44.5	No arrastra	08:47:31 a.m.	24/05/2014
20	1935	184	21712	45.6	No arrastra	08:50:06 a.m.	24/05/2014
21	1740	164	19352	44.7	No arrastra	08:52:41 a.m.	24/05/2014
22	1743	164	19352	43.5	No arrastra	08:55:16 a.m.	24/05/2014
23	1728	162	19116	43.2	No arrastra	08:57:51 a.m.	24/05/2014
24	1771	168	19824	44.6	No arrastra	09:00:26 a.m.	24/05/2014
25	1682	158	18644	40.5	No arrastra	09:03:01 a.m.	24/05/2014
26	1723	163	19234	41.7	No arrastra	09:05:36 a.m.	24/05/2014
27	1679	157	18526	40.8	No arrastra	09:08:11 a.m.	24/05/2014
28	1779	168	19824	41.2	No arrastra	09:10:46 a.m.	24/05/2014
29	1633	153	18054	40.6	No arrastra	09:13:21 a.m.	24/05/2014
30	1661	156	18408	40.8	No arrastra	09:15:56 a.m.	24/05/2014
31	1766	166	19588	42.5	No arrastra	09:18:31 a.m.	24/05/2014
32	1605	150	17700	40.3	No arrastra	09:21:06 a.m.	24/05/2014
33	1765	166	19588	41.7	No arrastra	09:23:41 a.m.	24/05/2014
34	1666	156	18408	40.8	No arrastra	09:26:16 a.m.	24/05/2014
35	1736	164	19352	42.5	No arrastra	09:28:51 a.m.	24/05/2014
36	1893	180	21240	43.6	No arrastra	09:31:26 a.m.	24/05/2014
37	1848	175	20650	44.7	No arrastra	09:34:01 a.m.	24/05/2014
38	1803	171	20178	44.1	No arrastra	09:36:36 a.m.	24/05/2014
39	1822	173	20414	44.7	No arrastra	09:39:11 a.m.	24/05/2014
40	1777	168	19824	43.5	No arrastra	09:41:46 a.m.	24/05/2014
41	1835	174	20532	44.7	No arrastra	09:44:21 a.m.	24/05/2014
42	1636	153	18054	40.1	No arrastra	09:46:56 a.m.	24/05/2014
43	1702	160	18880	40.6	No arrastra	09:49:31 a.m.	24/05/2014
44	1699	160	18880	40.7	No arrastra	09:52:06 a.m.	24/05/2014
45	1834	174	20532	45.1	No arrastra	09:54:41 a.m.	24/05/2014

46	1716	161	18998	43.6	No arrastra	09:57:16 a.m.	24/05/2014
47	1786	168	19824	44.8	No arrastra	09:59:51 a.m.	24/05/2014
48	1671	158	18644	43.5	No arrastra	10:02:26 a.m.	24/05/2014
49	1709	160	18880	44.2	No arrastra	10:05:01 a.m.	24/05/2014
50	1645	154	18172	40.1	No arrastra	10:07:36 a.m.	24/05/2014
51	1757	165	19470	42.6	No arrastra	10:10:11 a.m.	24/05/2014
52	1742	165	19470	42.8	No arrastra	10:12:46 a.m.	24/05/2014
53	1608	151	17818	40.7	No arrastra	03:09:37 p.m.	24/05/2014
54	1624	153	18054	40.1	No arrastra	03:12:12 p.m.	24/05/2014
55	1689	159	18762	40.9	No arrastra	03:14:47 p.m.	24/05/2014
56	1726	162	19116	42.5	No arrastra	03:17:22 p.m.	24/05/2014
57	1644	154	18172	40.6	No arrastra	03:19:57 p.m.	24/05/2014
58	1739	164	19352	43.8	No arrastra	03:22:32 p.m.	24/05/2014
59	1718	162	19116	44	No arrastra	03:25:07 p.m.	24/05/2014
60	1763	166	19588	44.6	No arrastra	03:27:42 p.m.	24/05/2014
61	1836	174	20532	44.8	No arrastra	03:30:17 p.m.	24/05/2014
62	1928	183	21594	45.9	No arrastra	03:32:52 p.m.	24/05/2014
63	1825	172	20296	44.3	No arrastra	03:35:27 p.m.	24/05/2014
64	1895	180	21240	44.5	No arrastra	03:38:02 p.m.	24/05/2014
65	1837	184	21712	44.8	No arrastra	03:40:37 p.m.	24/05/2014
66	1812	182	21476	44.1	No arrastra	03:43:12 p.m.	24/05/2014
67	1656	155	18290	40.7	No arrastra	03:45:47 p.m.	24/05/2014
68	1776	167	19706	43.9	No arrastra	03:48:22 p.m.	24/05/2014
69	1825	173	20414	42.9	No arrastra	03:50:57 p.m.	24/05/2014
70	1735	163	19234	43.5	No arrastra	03:53:32 p.m.	24/05/2014
71	1761	166	19588	44.1	No arrastra	03:56:07 p.m.	24/05/2014
72	1632	153	18054	40.6	No arrastra	03:58:42 p.m.	24/05/2014
73	1708	161	18998	44.5	No arrastra	04:01:17 p.m.	24/05/2014
74	1715	162	19116	44.7	No arrastra	04:03:52 p.m.	24/05/2014
75	1660	156	18408	40.3	No arrastra	04:06:27 p.m.	24/05/2014
76	1669	156	18408	40.6	No arrastra	04:09:02 p.m.	24/05/2014
77	1695	159	18762	40.5	No arrastra	04:11:37 p.m.	24/05/2014
78	1765	167	19706	42.9	No arrastra	04:14:12 p.m.	24/05/2014
79	1724	163	19234	42.7	No arrastra	04:16:47 p.m.	24/05/2014
80	1707	161	18998	42.5	No arrastra	04:19:22 p.m.	24/05/2014
81	1846	175	20650	44.1	No arrastra	04:21:57 p.m.	24/05/2014
82	1722	163	19234	42.6	No arrastra	04:24:32 p.m.	24/05/2014
83	1677	157	18526	40.3	No arrastra	04:27:07 p.m.	24/05/2014
84	1806	171	20178	44.8	No arrastra	04:29:42 p.m.	24/05/2014
85	1688	158	18644	40.8	No arrastra	04:32:17 p.m.	24/05/2014
86	1698	159	18762	40.8	No arrastra	04:34:52 p.m.	24/05/2014
87	1642	154	18172	40.6	No arrastra	04:37:27 p.m.	24/05/2014
88	1823	173	20414	42.7	No arrastra	04:40:02 p.m.	24/05/2014
89	1745	165	19470	43.5	No arrastra	04:42:37 p.m.	24/05/2014
90	1773	168	19824	43.2	No arrastra	04:45:12 p.m.	24/05/2014
91	1668	156	18408	43.6	No arrastra	04:47:47 p.m.	24/05/2014
92	1651	155	18290	40.1	No arrastra	04:50:22 p.m.	24/05/2014
93	1735	164	19352	41.9	No arrastra	04:52:57 p.m.	24/05/2014
94	1925	184	21712	45.2	No arrastra	04:55:32 p.m.	24/05/2014
95	1623	152	17936	43.6	No arrastra	04:58:07 p.m.	24/05/2014
96	1724	163	19234	42.5	No arrastra	05:00:42 p.m.	24/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

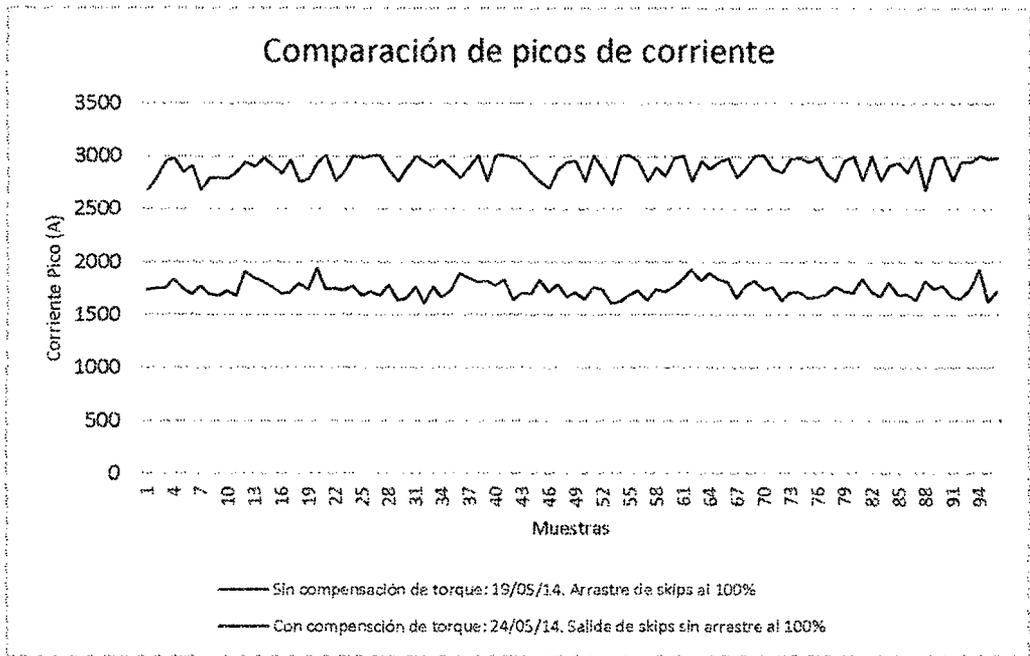


Figura C.7. Representación gráfica de los datos muestreados del pico de arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 19 y 24 de mayo del 2014 respectivamente.

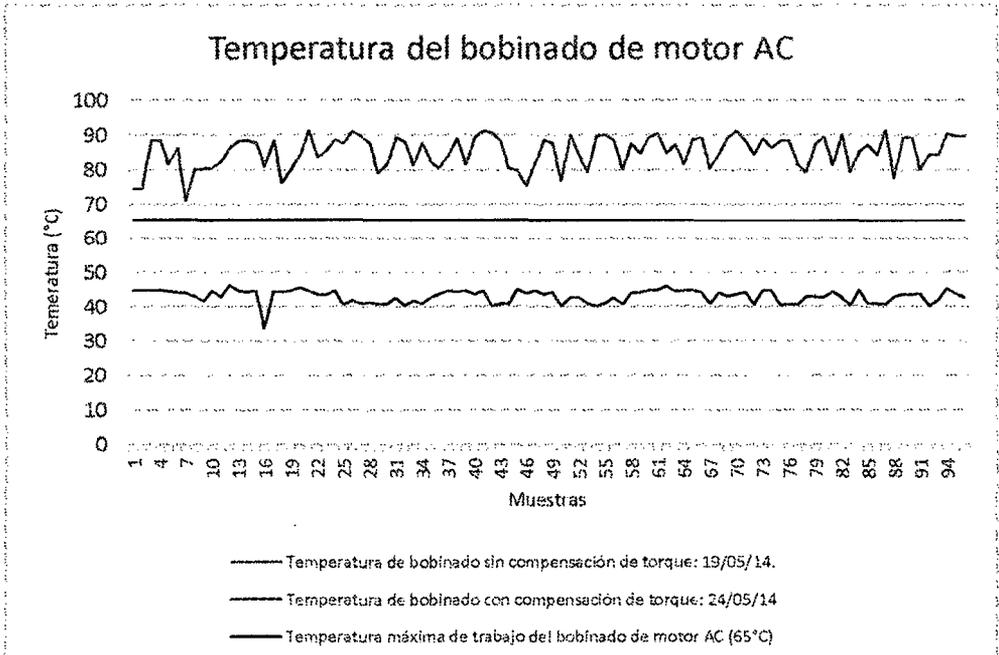
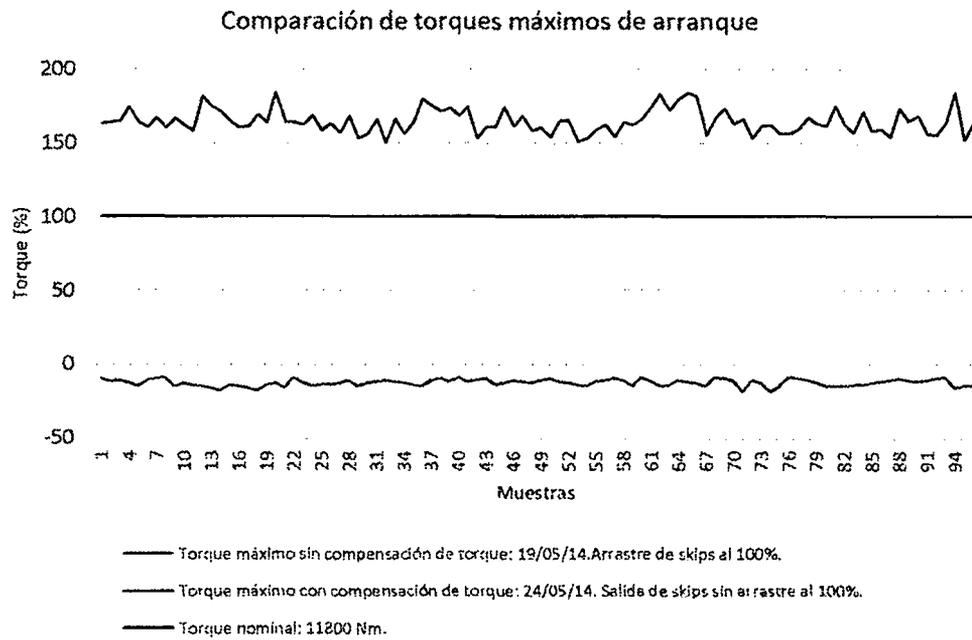


Figura C.8. Representación gráfica de los datos muestreados de temperatura del bobinado alcanzada durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 19 y 24 de mayo del 2014 respectivamente.



**Figura C.9.** Representación gráfica de los datos muestreados de torque máximo durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 19 y 24 de mayo del 2014 respectivamente.

**Tabla C8.** Datos muestreados de arranque de motor AC con el sistema electrónico compensador de torque el día 25-05-14

N° muestra	Corriente pico (A)	Torque (%)	Torque máximo (Nm)	Temperatura bobinado (C°)	Arrastre de skip	Hora de toma de muestra	Fecha
01	1732	164	19352	43.6	No arrastra	08:04:52 a.m.	25/05/2014
02	1885	178	21004	44.9	No arrastra	08:07:27 a.m.	25/05/2014
03	1773	168	19824	44.5	No arrastra	08:10:02 a.m.	25/05/2014
04	1816	173	20414	44.6	No arrastra	08:12:37 a.m.	25/05/2014
05	1826	182	21476	44.5	No arrastra	08:15:12 a.m.	25/05/2014
06	1746	165	19470	43.9	No arrastra	08:17:47 a.m.	25/05/2014
07	1884	179	21122	45.6	No arrastra	08:20:22 a.m.	25/05/2014
08	1824	173	20414	44.7	No arrastra	08:22:57 a.m.	25/05/2014
09	1983	188	22184	45.7	No arrastra	08:25:32 a.m.	25/05/2014
10	1881	178	21004	44.9	No arrastra	08:28:07 a.m.	25/05/2014
11	1903	180	21240	44.6	No arrastra	08:30:42 a.m.	25/05/2014
12	1867	176	20768	44.9	No arrastra	08:33:17 a.m.	25/05/2014
13	1852	176	20768	44.8	No arrastra	08:35:52 a.m.	25/05/2014
14	1938	183	21594	45.3	No arrastra	08:38:27 a.m.	25/05/2014
15	1854	175	20650	44.9	No arrastra	08:41:02 a.m.	25/05/2014
16	1832	174	20532	44.7	No arrastra	08:43:37 a.m.	25/05/2014
17	1860	176	20768	44.6	No arrastra	08:46:12 a.m.	25/05/2014
18	1821	173	20414	44.5	No arrastra	08:48:47 a.m.	25/05/2014
19	1922	183	21594	45.2	No arrastra	08:51:22 a.m.	25/05/2014
20	1950	186	21948	45	No arrastra	08:53:57 a.m.	25/05/2014

21	1860	177	20886	44.6	No arrastra	08:56:32 a.m.	25/05/2014
22	1721	163	19234	42.3	No arrastra	08:59:07 a.m.	25/05/2014
23	1859	176	20768	44.7	No arrastra	09:01:42 a.m.	25/05/2014
24	1866	177	20886	44.9	No arrastra	09:04:17 a.m.	25/05/2014
25	1883	179	21122	44.5	No arrastra	09:06:52 a.m.	25/05/2014
26	1917	182	21476	45.3	No arrastra	09:09:27 a.m.	25/05/2014
27	1901	181	21358	45	No arrastra	09:12:02 a.m.	25/05/2014
28	1976	188	22184	45.7	No arrastra	01:19:36 p.m.	25/05/2014
29	1960	187	22066	45.8	No arrastra	01:22:11 p.m.	25/05/2014
30	1760	166	19588	44.5	No arrastra	01:24:46 p.m.	25/05/2014
31	1950	186	21948	46.1	No arrastra	01:27:21 p.m.	25/05/2014
32	1728	163	19234	44.8	No arrastra	01:29:56 p.m.	25/05/2014
33	1618	151	17818	43.5	No arrastra	01:32:31 p.m.	25/05/2014
34	1650	155	18290	43.2	No arrastra	01:35:06 p.m.	25/05/2014
35	1742	165	19470	44.6	No arrastra	01:37:41 p.m.	25/05/2014
36	1610	151	17818	43.7	No arrastra	01:40:16 p.m.	25/05/2014
37	1863	177	20886	44.6	No arrastra	01:42:51 p.m.	25/05/2014
38	1822	173	20414	44.7	No arrastra	01:45:26 p.m.	25/05/2014
39	1776	168	19824	44.1	No arrastra	01:48:01 p.m.	25/05/2014
40	1916	183	21594	45.2	No arrastra	01:50:36 p.m.	25/05/2014
41	1846	175	20650	45.7	No arrastra	01:53:11 p.m.	25/05/2014
42	1710	162	19116	44	No arrastra	01:55:46 p.m.	25/05/2014
43	1714	162	19116	44.1	No arrastra	01:58:21 p.m.	25/05/2014
44	1686	158	18644	40.5	No arrastra	02:00:56 p.m.	25/05/2014
45	1768	165	19470	43.7	No arrastra	02:03:31 p.m.	25/05/2014
46	1903	182	21476	45.1	No arrastra	02:06:06 p.m.	25/05/2014
47	1690	160	18880	43.8	No arrastra	02:08:41 p.m.	25/05/2014
48	1631	153	18054	42.7	No arrastra	02:11:16 p.m.	25/05/2014
49	1640	154	18172	41.2	No arrastra	02:13:51 p.m.	25/05/2014
50	1697	159	18762	40.8	No arrastra	02:16:26 p.m.	25/05/2014
51	1853	176	20768	44.3	No arrastra	02:19:01 p.m.	25/05/2014
52	1807	170	20060	44.2	No arrastra	02:21:36 p.m.	25/05/2014
53	1990	188	22184	45.1	No arrastra	02:24:11 p.m.	25/05/2014
54	1680	158	18644	44.1	No arrastra	02:26:46 p.m.	25/05/2014
55	1980	188	22184	45.6	No arrastra	02:29:21 p.m.	25/05/2014
56	1750	165	19470	44.6	No arrastra	02:31:56 p.m.	25/05/2014
57	1810	172	20296	44.5	No arrastra	02:34:31 p.m.	25/05/2014
58	1716	161	18998	44.1	No arrastra	02:37:06 p.m.	25/05/2014
59	1788	169	19942	44.6	No arrastra	02:39:41 p.m.	25/05/2014
60	1699	160	18880	43.5	No arrastra	02:42:16 p.m.	25/05/2014
61	1687	159	18762	41.8	No arrastra	02:44:51 p.m.	25/05/2014
62	1670	157	18526	40.9	No arrastra	02:47:26 p.m.	25/05/2014
63	1693	159	18762	40.7	No arrastra	02:50:01 p.m.	25/05/2014
64	1658	155	18290	40.8	No arrastra	02:52:36 p.m.	25/05/2014
65	1774	167	19706	42.3	No arrastra	02:55:11 p.m.	25/05/2014
66	1741	164	19352	41.5	No arrastra	02:57:46 p.m.	25/05/2014
67	1654	155	18290	40.2	No arrastra	03:00:21 p.m.	25/05/2014
68	1654	155	18290	40.7	No arrastra	03:02:56 p.m.	25/05/2014
69	1693	159	18762	40.8	No arrastra	03:05:31 p.m.	25/05/2014
70	1708	160	18880	43.5	No arrastra	03:08:06 p.m.	25/05/2014

71	1709	160	18880	43.5	No arrastra	03:10:41 p.m.	25/05/2014
72	1763	167	19706	43.7	No arrastra	03:13:16 p.m.	25/05/2014
73	1700	160	18880	44.1	No arrastra	03:15:51 p.m.	25/05/2014
74	1708	160	18880	44.1	No arrastra	03:18:26 p.m.	25/05/2014
75	1778	168	19824	44.3	No arrastra	03:21:01 p.m.	25/05/2014
76	1640	154	18172	40.1	No arrastra	03:23:36 p.m.	25/05/2014
77	1706	160	18880	43.5	No arrastra	03:26:11 p.m.	25/05/2014
78	1783	169	19942	44.1	No arrastra	03:28:46 p.m.	25/05/2014
79	1635	153	18054	40.6	No arrastra	03:31:21 p.m.	25/05/2014
80	1710	162	19116	44.7	No arrastra	03:33:56 p.m.	25/05/2014
81	1725	163	19234	43.5	No arrastra	04:36:20 p.m.	25/05/2014
82	1732	164	19352	44.7	No arrastra	04:37:55 p.m.	25/05/2014
83	1633	153	18054	43.6	No arrastra	04:39:30 p.m.	25/05/2014
84	1635	153	18054	42.1	No arrastra	04:41:05 p.m.	25/05/2014
85	1730	164	19352	44.7	No arrastra	04:42:40 p.m.	25/05/2014
86	1700	161	18998	44.2	No arrastra	04:44:15 p.m.	25/05/2014
87	1752	166	19588	44.7	No arrastra	04:45:50 p.m.	25/05/2014
88	1645	154	18172	43.7	No arrastra	04:47:25 p.m.	25/05/2014
89	1705	161	18998	44.3	No arrastra	04:49:00 p.m.	25/05/2014
90	1718	162	19116	44.8	No arrastra	04:50:35 p.m.	25/05/2014
91	1722	163	19234	44.9	No arrastra	04:52:10 p.m.	25/05/2014
92	1770	168	19824	44.2	No arrastra	04:53:45 p.m.	25/05/2014
93	1726	163	19234	44.1	No arrastra	04:55:20 p.m.	25/05/2014
94	1619	151	17818	43.5	No arrastra	04:56:55 p.m.	25/05/2014
95	1679	157	18526	42.3	No arrastra	04:58:30 p.m.	25/05/2014
96	1696	159	18762	44.1	No arrastra	05:00:05 p.m.	25/05/2014

Fuente: Sistematizado por el autor.

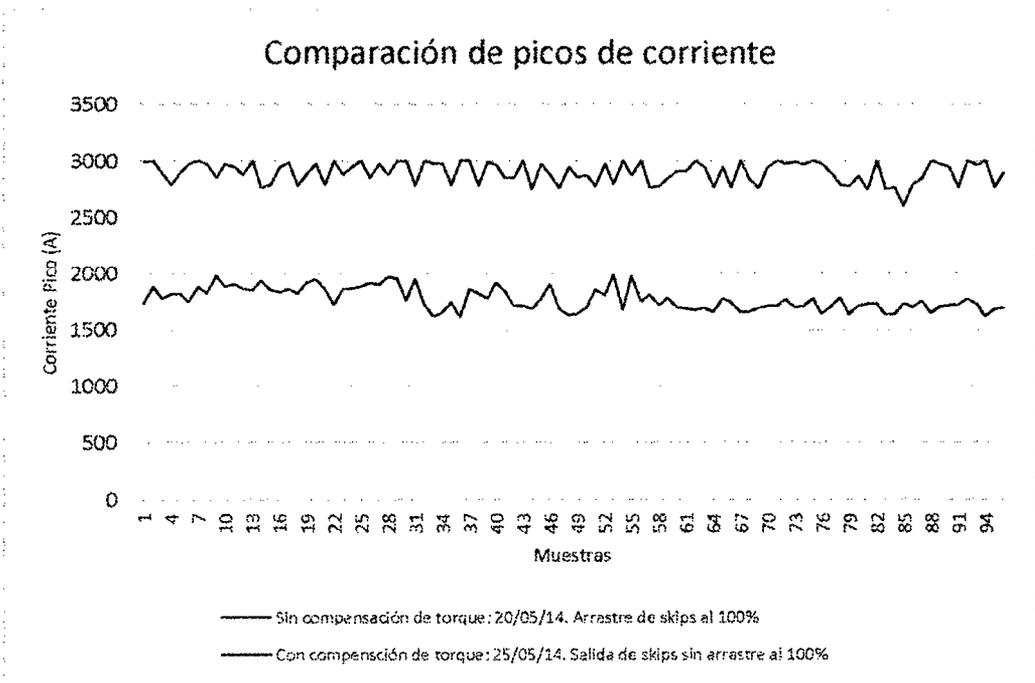


Figura C.10. Representación gráfica de los datos muestreados del pico de arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.

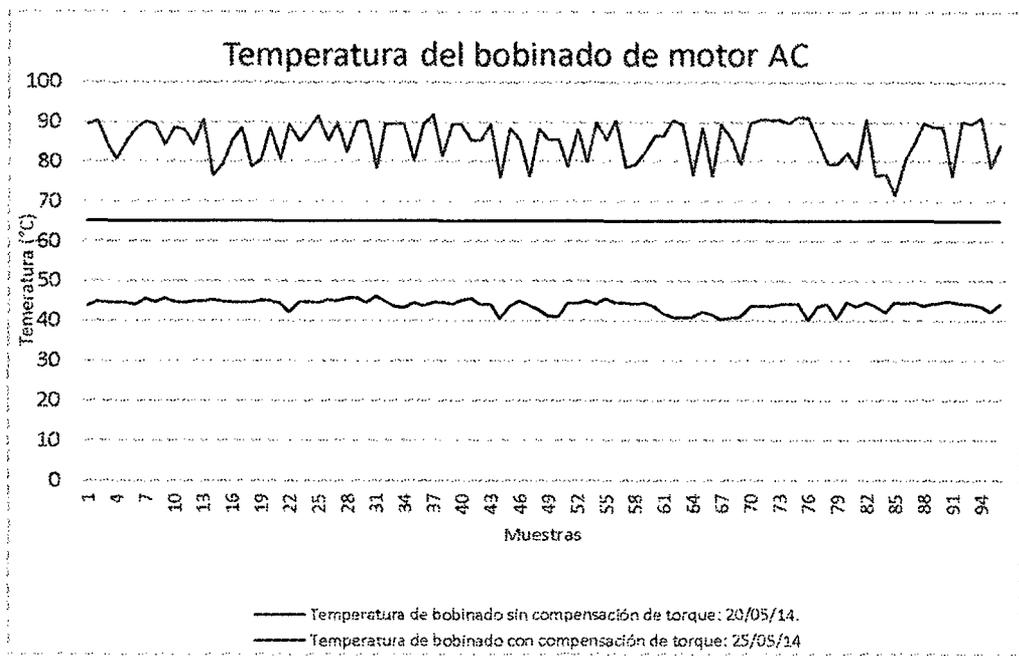


Figura C.11. Representación gráfica de los datos muestreados de temperatura del bobinado alcanzada durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.

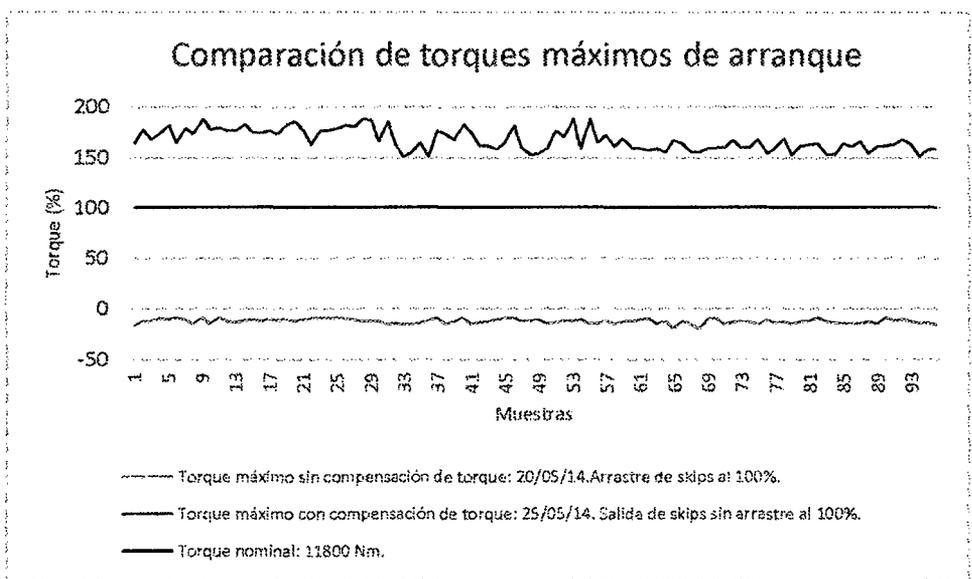
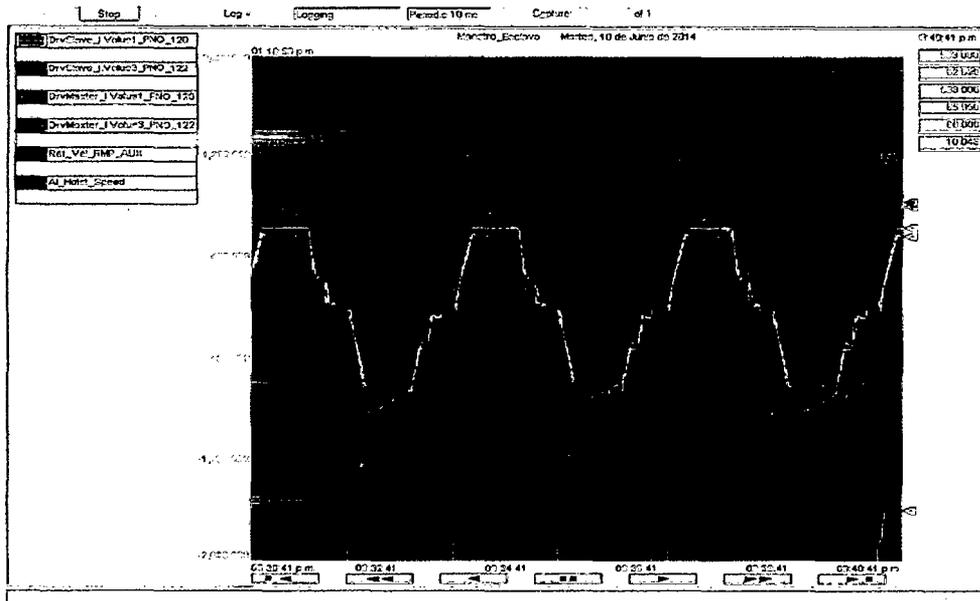
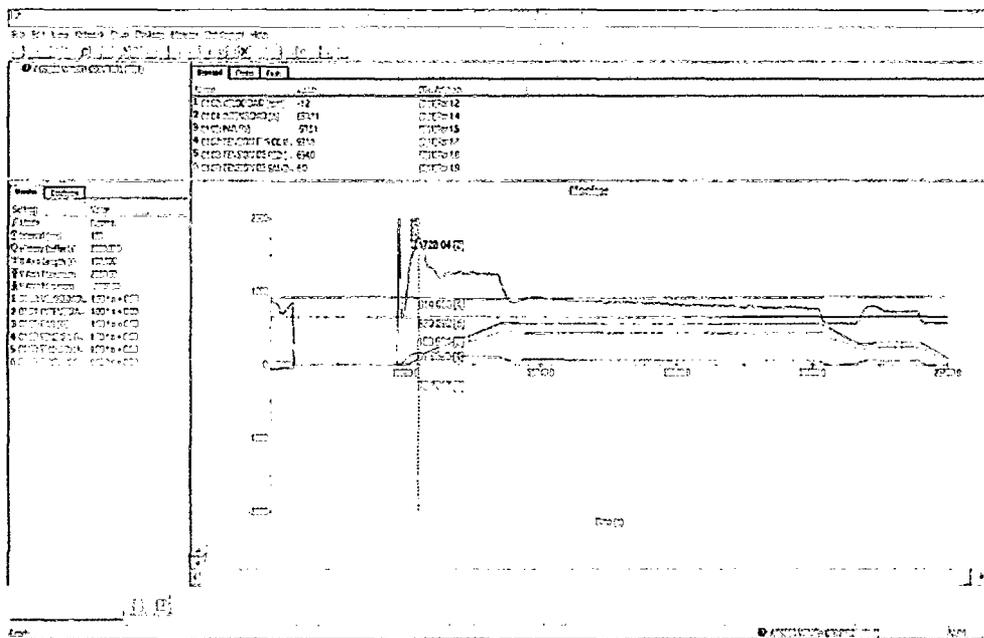


Figura C.12. Representación gráfica de los datos muestreados de torque máximo durante el arranque del motor AC con sistema electrónico compensador de torque y sin compensación de torque, días 17 y 22 de mayo del 2014 respectivamente.

**D. MONITOREO DE PROCESO DE IZAJE DE MINERAL CON SISTEMA ELECTRÓNICO COMPENSADOR DE TORQUE.**



**Figura D.1.** Monitoreo del proceso de izaje con RSLogix5000.



**Figura D.2.** Monitoreo del comportamiento del motor maestro con DriveWindow.

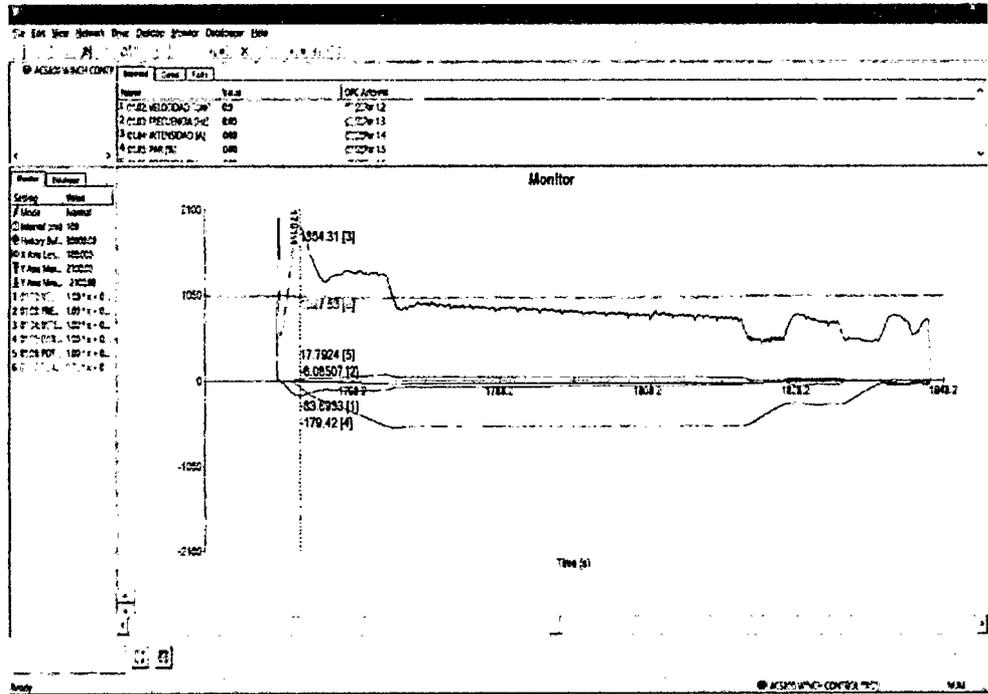


Figura D.3. Monitoreo del comportamiento del motor esclavo con DriveWindow.

## E. GLOSARIO DE TÉRMINOS

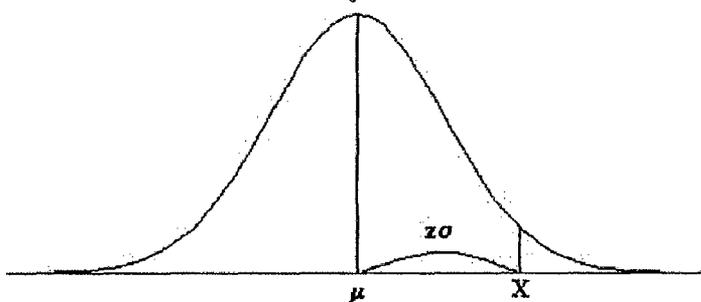
- PIQUE:** Estructura anclada en las rocas por donde se desplazan los Skips.
- SKIP:** Estructura metálica que contiene mineral.
- TAMBORA:** Es la estructura metálica cilíndrica donde se sujeta el cable de acero para lograr el traslado de los skips.
- WINCHE:** Sistema de izaje compuesto por varios elementos para el traslado de material.
- MOTOR AC:** Motor alimentado por corriente alterna.
- PAR:** Fuerza necesaria otorgada por el motor para romper la inercia.
- TORQUE:** Momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. También conocido como **PAR DE TORSIÓN**.
- MAGNETIZACIÓN:** Proceso por el cual se imanta un material.
- EMC:** Electromagnetic Compatibility (Compatibilidad electromagnética), es la rama de la electrónica que estudia los mecanismos para eliminar, disminuir o prevenir los efectos de acoplamiento entre un equipo eléctrico o electrónico y su entorno.
- FILTRO EMC:** Son dispositivos eléctricos que suprimen las interferencias electromagnéticas en las líneas de alimentación, control, señal y comunicación mientras permiten pasar las señales deseadas.
- FIELD BUS:** Es un conjunto de redes de comunicaciones industriales que debe su origen a la fundación Fieldbus, la cual desarrolló un protocolo de comunicación para la medición y el control de procesos donde todos los instrumentos puedan comunicarse en una sola plataforma.
- RETA-01:** Módulo de comunicación que usa el protocolo CIP, perteneciente a Fieldbus, para la comunicación entre drive y PLC.
- IP:** Es el protocolo usado para la comunicación de datos a través de una red.

- PARÁMETRO:** Un parámetro es una instrucción a ser programada en el variador de velocidad desde su panel de control o a través de un módulo de comunicaciones.
- BRAKER:** Llave de protección eléctrica para altos niveles de voltaje y corriente instalados a la entrada de todo sistema eléctrico de fuerza y/o control. **HMI:** Son las iniciales de Human Machine Interfaz (interfaz hombre máquina).
- ABB:** Son las iniciales de Asea Brown Boveri, es una corporación multinacional, cuya sede central queda en Zürich, Suiza y cuyos mayores negocios son los de tecnologías en generación de energía eléctrica y en automatización industrial.
- CONTROL:** Es la acción de ejercer algún tipo de poder para obligar el comportamiento de cierto elemento con el fin de lograr un objetivo específico.
- IGBT:** Insulated Gate Bipolar Transistor, el transistor bipolar de puerta aislada en un semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.
- SUPERVISIÓN:** Es la observación regular y el registro de las actividades que se
- CONVERTIDOR DE FRECUENCIA:** En un sistema eléctrico-electrónico para el control de velocidad rotacional de un motor. Es también llamado **VARIADOR DE VELOCIDAD** o Drive.
- ZONA DE CARGUÍO:** Estructura mecánica por medio de la cual se carga mineral a los skips.
- ZONA DE VOLTEO:** Estructura mecánica por medio de la cual se descarga mineral de los skips.

## F. DISTRIBUCIÓN Z ESTADÍSTICO

TABLA 1: DISTRIBUCIÓN NORMAL

Áreas bajo la curva normal



Ejemplo:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$P[Z > 1] = 0.1587$$

$$P[Z > 1.96] = 0.0250$$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

## G. DATOS TÉCNICOS

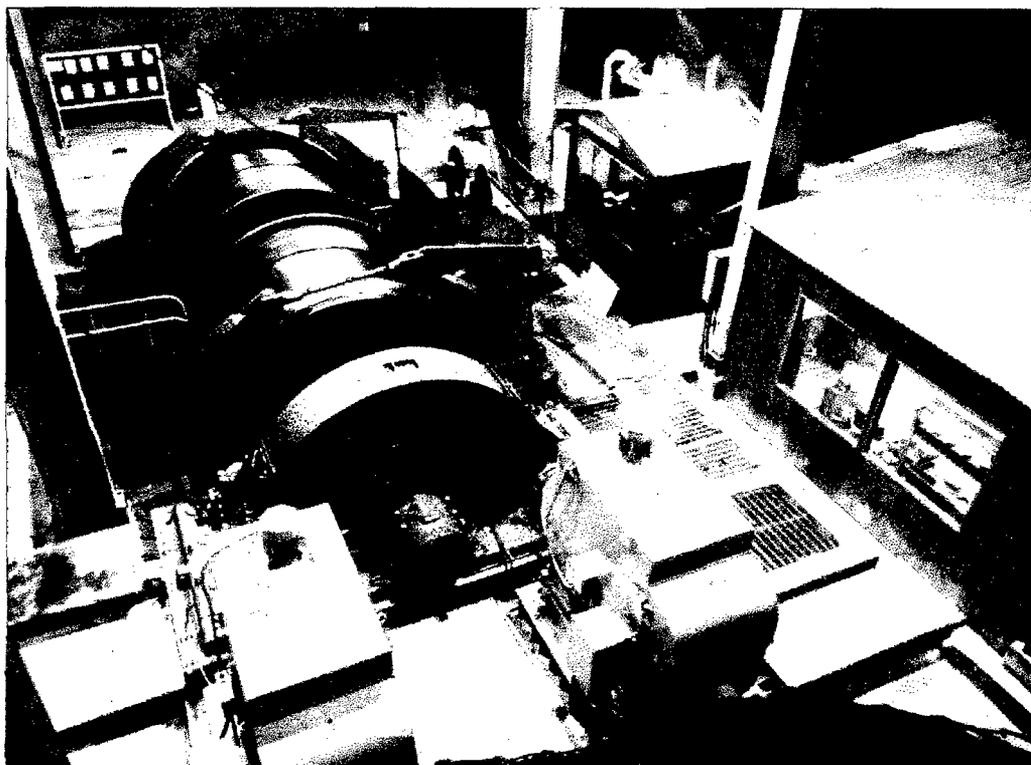
**Tabla G.1.** Datos técnicos de Winche de Izaje instalado en la Compañía Minera Casapalca S.A.

Componentes	Características
Tamboras	Medidas: 120" X 78" Material: Fierro fundido Con bandas laterales para frenado.
Frenos de bandas activados neumáticamente	Presión de activación: 90 PSI. Pesa de frenado de 500Kg. Frenos con zapatas laterales.
Motores AC, tipo sincrónico.	Marca: ABB Modelo: AMI 500L8A Potencia: 1050Kw Voltaje: 690V Corriente: 1181 Cosφ:0.80 Frecuencia: 60 Hz Velocidad: 850 rpm Número de polos: 8
Variadores de velocidad AC	Marca: ABB Modelo: ACS800-17 Potencia: 55-2500 Kw Tipo de estructura: 6XR8i Frecuencia: 60 Hz Tensión: 690VAC Protección: IP55 Arrancador del ventilador del motor: 690VAC Conexiones modulares: Ethernet, DeviceNet, RS-845, F.O.
PLC ControlLogix	Marca: Allend Bradley Memoria: 1756-L62 Módulos: 14 módulos: 4 DC Input, 2 DC Output, 3 analog Input, 02 AC Output, 01 Ethernet, 01 AMCI, 01 relay output. Programación: Ladder. Software: RSLogix5000
Reductor de velocidad (piñones de ambos motores y catalina)	Catalina Chevron. Engranajes Chevron. Engrasado neumático. Relación de transmisión: 15/125
Sistema de seguridad: Lilly control, límites de recorrido, etc.;	Limitador de altura. Limitador de profundidad. Limitador de sobrevelocidad. Parada de emergencia. Parada por sobrevelocidad. Parada por sobrecorriente.

	Hombre seguro.
Reloj indicador	Indica nivel de posición de skip con flechas en un reloj indicador de 1m de diámetro. Conectado al sistema de tamboras.
Mandos de control	Tablero de control en cabina de operador. Uso del PLC ControlLogix para control del proceso Uso Joystick. Activación y monitoreo desde PC. Monitoreo del proceso y del comportamiento de cada motor en tiempo real usando el RSLogix5000 y DriveWindow como software.
Cables de acero	Tipo: Cobra 6X19 Alma de nylon. Longitud: 800 m Peso: 5.8Kg/m
Skips Metálicos	Material: T21. Medidas: 2X2X4,5m Carga aprox. Según densidad de mineral: 9,7 Ton Volumen: 5.72m <sup>3</sup>
Poleas	Material: Fierro Fundido. Canaleta rectificada con asiento de bronce. Diámetro: 2,5m
Estructura de desplazamiento o castillo (Piques)	Material: Madera de Pino. Altura de cuadro: 2m Profundidad Total: 530m. Compartimientos: 03 Estaciones: Zona de carguío y Zona de Volteo.

Fuente: Registros de Maquinarias - CMCSA

## H. FOTOGRAFÍAS



FOTOGRAFÍA 01. Vista superior del winche de la Compañía Minera Casapalca



FOTOGRAFÍA 02. Tableros de drive de los motores maestro y esclavo.



FOTOGRAFÍA 03. Motores maestro y esclavo AC del winche de izaje de la Compañía Minera Casapalca.



FOTOGRAFÍA 04. Lectura de planos y modificación del Programa Ladder del proceso de izaje con winche.