

**SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN TENIENDO EN CUENTA LAS
VARIABLES ELÉCTRICAS PRESENTES EN UN POZO DE CAMPO ESCUELA
COLORADO.**

**Harbey Alexander Millán Cárdenas
Diego Fernando Gutiérrez Delgado
Julio Gabriel Lara Alvarez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2012

**SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN TENIENDO EN CUENTA LAS
VARIABLES ELÉCTRICAS PRESENTES EN UN POZO DE CAMPO ESCUELA
COLORADO**

**Harbey Alexander Millán Cárdenas
Diego Fernando Gutiérrez Delgado
Julio Gabriel Lara Alvarez**

**Proyecto de investigación para optar al título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director:
MSc. Alfredo Rafael Acevedo Picón**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2012



Universidad
Industrial de
Santander

CAMPO
ESCUELA
C O L O R A D O



Dios se presenta de diversas maneras en mi vida. Se presenta en mis padres con su apoyo incondicional, en mis hermanos con su ejemplo de vida, en mi novia con su gran amor y en los amigos que siempre están en los buenos y malos momentos. Por eso dedico a Dios este gran logro.

Harbey



A Dios, a mi mamá, mi papá, mis hermanos y amigos cercanos que me acompañaron en esta odisea durante siete largos años. Gracias.....totales.

Diego



Dedico este éxito a Dios y a la virgen por darme la oportunidad de estudiar por medio de mis padres Julio Aníbal Lara y María Celina Alvarez, tomando como principios la dedicación y responsabilidad ante los retos presentes en esta etapa de mi vida, no olvidando la condición humana que nos hace seres integrales.

A mis amigos y familia que directa e indirectamente me colaboraron en diferentes situaciones de mi vida estudiantil.

Gabriel



AGRADECIMIENTOS

A la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, en especial al profesor ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICÓN director del proyecto de investigación, por su colaboración, asesoría y apoyo durante esta etapa académica.

Al profesor JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ en su asistencia durante este proceso.

Al profesor JULIO AUGUSTO GELVEZ FIGUEREDO, por su amistad y calidad humana, constante interés y ayuda en los momentos más oportunos.

Al ingeniero HECTOR CANCELADO por haber facilitado los medios para llevar a cabo las actividades prácticas realizadas en Campo Escuela Colorado.

A Campo Escuela Colorado, y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos.

A todas las personas que, de diversas maneras, participaron en el desarrollo de este proyecto.

Contenido

Introducción	26
Identificación del problema	26
Objetivo	27
Justificación para solucionar el problema	27
Estado del arte	28
Descripción del contenido	29
1. Marco Teórico	30
1.1 Potencia en circuitos de corriente alterna	30
1.1.1 Potencia instantánea	30
1.1.2 Potencia promedio o activa	31
1.1.3 Valores eficaces de corriente y tensión	31
1.1.4 Potencia aparente	32
1.1.5 Factor de potencia	32
1.1.6 Potencia compleja	32
1.2 Medición de potencia	33
1.3 Características principales de la máquina de inducción	33
1.3.1 Conexión del motor de inducción	34
1.3.2 Velocidad síncrona	36
1.3.3 Deslizamiento	36
1.3.4 Comportamiento como motor o como generador	36
1.4 Sistema de bombeo mecánico	37
1.4.1 Equipo de superficie	38
1.4.2 Equipo de subsuelo	39

1.4.3 Geometría de la unidad de bombeo	39
1.4.3.1 Determinación de la posición de la barra pulida teniendo en cuenta el modelo geométrico 1	39
1.4.3.2 Determinación del factor de torque teniendo en cuenta el modelo geométrico 2	41
1.4.4 Análisis de torque	43
1.4.4.1 Torque TP causado por la fuerza aplicada a la barra pulida	44
1.4.4.2 Factor de torque	45
1.4.4.3 Desbalance estructural de la unidad de bombeo mecánico convencional.....	46
1.4.4.4 Ángulo de fase de la manivela	47
1.4.4.5 Torque de las contrapesas y la manivela	48
1.4.4.6 Máximo momento de contrabalance	48
1.5 Dinagrama de superficie generado por la posición y la fuerza de la barra pulida	49
1.6 Relación entre la potencia eléctrica y el torque neto en la caja de engranajes.....	50
2. Descripción del proceso propuesto para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción.	54
2.1 Potencia eléctrica consumida por el motor trifásico de inducción	55
2.2 Torque neto en la caja de engranajes	56
2.3 Fuerza en la barra pulida	57
2.4 Posición de la barra pulida.....	61
2.5 Dinagrama de superficie generado por la fuerza y la posición de la barra pulida	63
3. Adquisición de datos	65

3.1	<i>Fuente de Alimentación</i>	66
3.1.1	<i>Componentes del circuito</i>	66
3.1.2	<i>Diagrama esquemático del circuito</i>	67
3.1.3	<i>Resultados de simulación</i>	68
3.2	<i>Sensado de voltajes</i>	69
3.2.1	<i>Componentes del circuito</i>	69
3.2.2	<i>Diagrama esquemático del circuito</i>	71
3.2.3	<i>Resultados de simulación</i>	72
3.2.4	<i>Resultados experimentales</i>	73
3.3	<i>Sensado de corriente</i>	76
3.3.1	<i>Componentes del circuito</i>	77
3.3.2	<i>Diagrama esquemático del circuito</i>	78
3.3.3	<i>Resultados de simulación</i>	80
3.3.4	<i>Resultados experimentales</i>	81
3.4	<i>Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.</i>	84
3.4.1	<i>Características de la tarjeta NI USB 6009.</i>	85
3.4.2	<i>Puertos analógicos de entrada.</i>	85
3.5	<i>Dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente.</i>	87
3.5.1	<i>Secciones del dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente.</i>	87
3.5.1.1	<i>Primera sección.</i>	87
3.5.1.2	<i>Segunda sección.</i>	89
3.5.1.3	<i>Tercera sección</i>	90
3.5.2	<i>Acoplamiento entre secciones</i>	92
3.6	<i>Adquisición de valores instantáneos de voltajes y corrientes.</i>	94

3.7	Resultados experimentales	95
4.	Programación del proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia consumida por el motor de inducción en el entorno gráfico de LabVIEW.	98
4.1	Voltajes y corrientes de línea aplicados al motor de inducción.....	98
4.2	Potencia eléctrica consumida por el motor de inducción.....	100
4.3	Torque neto en la caja de engranajes	101
4.4	Posición de la barra pulida.....	101
4.4.1	Posición de la barra pulida teniendo en cuenta las dimensiones y geometría de la unidad de bombeo convencional	101
4.4.2	Detección de la posición de la barra pulida mediante video.....	103
4.5	Fuerza en la barra pulida	104
4.6	Dinagrama de superficie generado por la fuerza y la posición en la barra pulida	105
5.	Visualización y registro de las variables presentes en el proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción	106
5.1	Visualización de variables de interés.....	106
5.2	Registro de voltajes y corrientes de línea	109
5.3	Registro de las potencias promedio de línea consumidas por el motor de inducción	111
5.4	Registro de la potencia promedio trifásica consumida por el motor de inducción.....	111
5.5	Registro del torque neto en la caja de engranajes.....	112
5.6	Registro de la posición de la barra pulida.....	112
5.7	Registro de fuerza en la barra pulida	114
5.8	Registro del dinagrama de superficie	114



6. Conclusiones	116
7. Observaciones	120
8. Recomendaciones	122
Bibliografía	124
Anexos	126

Índice de figuras

Figura 1: Conexión del motor de inducción del pozo 33.	34
Figura 2: Placa del motor de inducción.	35
Figura 3: Característica Par inducido vs Velocidad mecánica [5].	37
Figura 4: Equipo de superficie de la unidad convencional [6].	38
Figura 5: Modelo 1, de la Geometría de la unidad convencional [6].	40
Figura 6: Modelo 2, de la geometría de la unidad convencional [7].	41
Figura 7: Análisis del torque en la unidad convencional [6].	44
Figura 8: Forma práctica para entender la definición del factor de torque [6].	45
Figura 9: Parámetros y geometría para determinar el factor de torque [6].	46
Figura 10: Forma práctica para determinar el desbalance estructural [6].	47
Figura 11: Ángulo de fase de la Manivela [6].	47
Figura 12: Dinagrama ideal de superficie [8].	50
Figura 13: Diagrama de bloques del proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica suministrada al motor de inducción. 54	
Figura 14: Potencia del motor de inducción instalado en el pozo 33 [11].	55
Figura 15: Torque neto en la caja de engranajes de la unidad TC-322-C [11].	56
Figura 16: Fuerza en la barra pulida de la unidad TC-322-C [11].	57
Figura 17: Dimensiones Unidad de bombeo mecánico convencional [10].	58
Figura 18: Simulación del Factor de torque para la unidad TC-322-C.	61
Figura 19: Posición de la barra pulida de la unidad TC-322-C [11].	62
Figura 20: Dinagrama de superficie del pozo 33 [11].	64
Figura 21: Caja de distribución eléctrica del pozo 33.	65
Figura 22: Circuito de fuente de alimentación en OrcadCapture.	68
Figura 23: Tensiones de salida vs Tiempo en OrcadCapture.	69
Figura 24: Circuito impreso para INA117KU en OrcadLayout.	71
Figura 25: Circuito de sensado de tensión en OrcadCapture.	72
Figura 26: VAQ1 vs Tiempo en OrcadCapture.	73
Figura 27: VAQ1, VAQ2, VAQ3 vs Tensión de entrada.	75

Figura 28: Circuito de sensado de corriente con sonda LA 150-P en OrcadCapture.....	78
Figura 29: Circuito de sensado de corriente con sonda LA 55-P en OrcadCapture.....	79
Figura 30: Tensión vs Tiempo en OrcadCapture.	81
Figura 31: IA, IB, IC simulado vs I medido.	83
Figura 32: asignación de terminales analógicos [12].	86
Figura 33: Esquemático de primera sección en OrcadCapture.	87
Figura 34: Esquemático de segunda sección en OrcadCapture.....	89
Figura 35: Esquemático de tercera sección en OrcadCapture.	90
Figura 36: Esquemático de acoplamiento de secciones en OrcadCapture.....	92
Figura 37: Placas unidas.	94
Figura 38: Dispositivo conectado en la caja eléctrica.....	95
Figura 39: Prueba en el laboratorio de máquinas eléctricas.	96
Figura 40: Potencia eléctrica promedio simulada vs Potencia eléctrica promedio medida.	97
Figura 41: Adquisición de voltajes y corrientes de línea.	99
Figura 42: Medición de energía eléctrica	100
Figura 43: Diagrama de bloques y constantes relacionadas con la potencia eléctrica en el motor y el torque neto en la caja de engranajes.....	101
Figura 44: Tiempo transcurrido y el tiempo de stroke.	102
Figura 45: Diagrama de bloques para determinar la posición de la barra pulida teniendo en cuenta el modelo geométrico 1.....	102
Figura 46: Diagrama de bloques para determinar la posición de la barra pulida mediante adquisición de video.....	103
Figura 47: Diagrama de bloques para determinar la fuerza en la barra pulida. .	104
Figura 48: Dinagrama de superficie teniendo en cuenta la geometría y la detección de la barra pulida.....	105
Figura 49: SubVi para la generación de reportes gráficos.	106
Figura 50: Visualización dinámica del proceso.....	107
Figura 51: Visualización de los voltajes y corrientes de línea.	108
Figura 52: Visualización de las potencias promedio de línea.	108

Figura 53: Visualización de valores de potencia promedio.....	109
Figura 54: Registro de los voltajes de línea adquiridos.....	110
Figura 55: Registro de las corrientes de línea adquiridas.....	110
Figura 56: Registro de las potencias promedio de línea.....	111
Figura 57: Registro de potencia promedio trifásica y el torque neto en la caja de engranajes.....	112
Figura 58: Registro de la potencia promedio trifásica y la carga en la barra pulida.....	113
Figura 59: Registro del dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción.....	115
Figura 60: Devanados de la Máquina de inducción de 2 polos, 3 fases y conectada en estrella, presentado en [13].....	127
Figura 61: Transformación para el circuito estacionario representado por las relaciones trigonométricas [13].....	133
Figura 62: Máquina trifásica de inducción de dos polos conectada en Y [13]... 	135
Figura 63: Circuito equivalente trifásico transformado al marco de referencia (dq0) [13].....	138
Figura 64: Curvas características de Par-Velocidad en vacío [13].	139
Figura 65: Variables del motor de inducción de 3 HP en vacío [13].	140
Figura 66: Características de libre aceleración para un motor de inducción de 10-HP. En el marco de referencia fijo al rotor [13].	141
Figura 67: Esquemático del sistema en Simulink	141
Figura 68: Bloque asynchronous machine pu Units	142
Figura 69: Corriente de fase (a) en por unidad del estator [13].	146
Figura 70: Corriente de fase (b) en por unidad del estator [13].	147
Figura 71. Corriente de fase (c) en por unidad del estator [13].	147
Figura 72: Corriente de fase (a) en por unidad del rotor [13].	147
Figura 73: Corriente de fase (b) en por unidad del estator [13].	148
Figura 74: Corriente de fase (c) en por unidad del rotor [13].	148
Figura 75: Torque electromagnético en por unidad [13].	148
Figura 76: Velocidad en por unidad del rotor [13].	149
Figura 77: Vqs en por unidad del estator [13].	149

Figura 78: I_{qs} en por unidad del estator [13].	149
Figura 79: V_{ds} en por unidad del estator [13].	150
Figura 80: I_{ds} en por unidad del estator [13].	150
Figura 81: I_{qr} en por unidad del rotor [13].	150
Figura 82: I_{dr} en por unidad del rotor [13].	151
Figura 83: V_{qs} en por unidad del estator [13].	151
Figura 84: I_{qs} en por unidad del estator [13].	151
Figura 85: V_{ds} en por unidad del estator [13].	152
Figura 86: I_{qr} en por unidad del rotor [13].	152
Figura 87: I_{dr} en por unidad del rotor [13].	152
Figura 88: Entrada de Torque mecánico en por unidad del motor	153
Figura 89: Torque electromagnético en por unidad	153
Figura 90: Velocidad del rotor en por unidad del motor	153
Figura 91: I_{qs} e I_{ds} respectivamente en por unidad en el estator	154
Figura 92: V_{qs} e V_{ds} respectivamente en por unidad en el estator	154
Figura 93: I_{qr} e I_{dr} respectivamente en por unidad en el rotor	155
Figura 94: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor	155
Figura 95: Entrada de velocidad del rotor en por unidad del motor	155
Figura 96: Torque electromagnético en por unidad	156
Figura 97: I_{qs} e I_{ds} respectivamente en por unidad en el estator	156
Figura 98: V_{qs} e V_{ds} respectivamente en por unidad en el estator	157
Figura 99: I_{qr} e I_{dr} respectivamente en por unidad en el rotor	157
Figura 100: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor	157
Figura 101: Entrada de torque mecánico en por unidad del rotor en el motor.	158
Figura 102: Velocidad del rotor en por unidad del motor	158
Figura 103: Torque electromagnético en por unidad	158
Figura 104: I_{qs} e I_{ds} respectivamente en por unidad del estator	159
Figura 105: V_{qs} e V_{ds} respectivamente en por unidad del estator	159
Figura 106: I_q y I_d respectivamente en por unidad del rotor	160
Figura 107: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor	160
Figura 108: Capa Silkscreen Top	162
Figura 109: Capa Bottom	162



Figura 110: Capa Top.....	163
Figura 111: Capa Soldermask Bottom.....	163
Figura 112: Capa Soldermask Top.....	164
Figura 113: Capa Silkscreen Top.....	164
Figura 114: Capa Bottom.....	165
Figura 115: Capa Top.....	165
Figura 116: Capa Soldermask Bottom.....	166
Figura 117: Capa Soldermask Top.....	166
Figura 118: Capa Silkscreen Top.....	167
Figura 119: Capa Bottom.....	167
Figura 120: Capa Top.....	168
Figura 121: Capa Soldermask Bottom.....	168
Figura 122: Capa Soldermask Top.....	169
Figura 123: Diagrama de flujo completo.....	170

Índice de tablas

Tabla 1: Especificaciones Unidad de bombeo mecánico convencional TC-322-C [11].	59
Tabla 2: Componentes del circuito de la fuente DC.	66
Tabla 3: Componentes del circuito sensor de tensión.	69
Tabla 4: VAQ1, VAQ2, VAQ3 vs Voltaje de línea.	74
Tabla 5: Componentes del circuito sensor de corriente.	77
Tabla 6: Comparación de corrientes eficaces medidas y corrientes eficaces simuladas.	82
Tabla 7: Componentes anexos (primera sección).	88
Tabla 8: Componentes anexos (segunda sección).	89
Tabla 9: Componentes anexos (tercer sección).	91
Tabla 10: Componentes anexos (acoplamiento entre secciones).	92
Tabla 11: Comparación entre las potencias promedio medida y simulada.	97
Tabla 12: Parámetros de 4 motores de inducción [13].	139

RESUMEN

TÍTULO: SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN TENIENDO EN CUENTA LAS VARIABLES ELÉCTRICAS PRESENTES EN UN POZO DE CAMPO ESCUELA COLORADO

AUTORES: Harvey Alexander Millán Cárdenas, Diego Fernando Gutiérrez Delgado, Julio Gabriel Lara Alvarez.

PALABRAS CLAVES: Campo-Escuela Colorado, Dinagrama de superficie, Potencia consumida.

DESCRIPCIÓN:

El Campo-Escuela Colorado es el resultado del convenio firmado entre ECOPETROL S.A. y la Universidad Industrial de Santander. La escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, como estamento de la Universidad, está vinculada al convenio con la realización de este proyecto de investigación.

Con este convenio se busca desarrollar las aptitudes investigativas de los estudiantes en sus programas académicos incorporando un componente práctico, con un proceso de selección de material bibliográfico para dar solución a problemáticas presentes en Campo-Escuela Colorado.

Se desarrolla una metodología a través de herramientas de hardware y software para adquirir el dinagrama de superficie a partir de la medición de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción instalado en una unidad de bombeo mecánico convencional, en donde no se tiene en cuenta el variador de velocidad dentro del proceso planteado.

El proceso para determinar el dinagrama de superficie inicia con el sensado y adquisición de variables eléctricas instantáneas de entrada al motor de inducción en condiciones de estado dinámico y torque de carga dinámico. Con los valores de voltajes, corrientes de línea adquiridos, se determina la potencia eléctrica a la entrada del motor y el torque neto en la caja de engranajes de la unidad de bombeo. Posteriormente se determina la posición de la barra pulida y el factor de torque teniendo en cuenta dos modelos de la geometría dinámica del sistema de bombeo. Finalmente, se determina la fuerza y la posición en la barra pulida y teniendo estos se genera el dinagrama de superficie.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MsC(c). Alfredo Rafael Acevedo Picón.

SUMMARY

TITLE: SELECTION OF THE INSTRUMENTATION TAKING INTO ACCOUNT THE ELECTRIC VARIABLES PRESENT IN A WELL OF FIELD SCHOOL COLORADO.

AUTHORS: Harvey Alexander Millán Cárdenas, Diego Fernando Gutiérrez Delgado, Julio Gabriel Lara Alvarez.

KEY WORDS: Field-School Colorado, surface Dynagraph, Power consumed.

DESCRIPTION

The Field-School Colorado is the result of an agreement signed between ECOPETROL S.A and the Industrial University of Santander. The School of Electrical, Electronic, and Telecommunications engineering, as a part of the University, is linked to the agreement whit the realization of this research project.

With this agreement is sought to develop the investigative skills of students in their academic programs incorporating a practical component, in a selection process of bibliographic material to give solution to present problematic in Field School Colorado.

A methodology is developed through tools of hardware and software to acquire the surface dynagraph based on the measurement of the electrical power consumed by the induction motor installed in a conventional mechanical pumping unit, where not taken into account the variable speed drive in the process raised.

The process for determining the surface dynagraph begins with the sensing and acquisition of the instantaneous electrical variables input the induction motor in dynamic state and dynamic load torque. With the values of voltage, current line acquired, is determined electrical power to the engine inlet and the net torque on the gearbox of the pump unit. Subsequently determines the position of the polished rod and the torque factor taking into account two models of dynamic geometry of the pumping system. Finally, determine force and position in the polished rod and having these is generated the surface dynagraph.

* Research Thesis

** Physicosmechanical Engineerings Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications Engineering Department. Manager: MSm(c). Alfredo Rafael Acevedo Picón.

Introducción

En este trabajo se desarrolla una propuesta para determinar la carta dinagráfica de superficie en el pozo 33 de Campo Colorado.

El método comienza obteniendo la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, a través de la medición y registro de valores instantáneos de corriente y tensión con la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009 de National Instruments. Además, se obtiene la posición de la barra lisa mediante programación, video a través de una cámara web y el software de procesamiento de imágenes IMAQ de LabView.

Posteriormente con los registros de tensión, corriente, posición de la barra lisa, parámetros de geometría y estructura dados por el fabricante, se desarrolla un diagrama de bloques en el entorno de programación gráfica de LabVIEW, donde se calcula la potencia instantánea consumida por el motor, torque neto en la caja de engranajes, fuerza en la barra pulida y finalmente se obtiene el dinagrama de superficie.

Identificación del problema

La necesidad de optimizar el funcionamiento de un sistema de bombeo mecánico convencional ubicado en campo escuela colorado, nos lleva a analizar algunas de las variables físicas presentes en el proceso de extracción de crudo; tomando como variables principales aquellas que están relacionadas con la unidad motriz y el sistema de bombeo en superficie.

Una de las herramientas de optimización del levantamiento artificial por bombeo mecánico, es la toma de la carta dinamométrica, que tiene como objetivo analizar las condiciones de trabajo del equipo de superficie y de subsuelo de los pozos productores. Convencionalmente, la carta dinamométrica de superficie, se realiza

con la toma de registros de carga sobre la barra pulida, para determinar el comportamiento de la bomba durante cada ciclo de bombeo y por medio de la ecuación de onda se determina la carta dinamométrica de fondo de la bomba y la carga sobre los tramos de varilla.

En este trabajo, se pretende plantear las bases teóricas para poder optimizar el funcionamiento de una de las unidades de bombeo mecánico de campo escuela colorado, analizando diversos aspectos físicos y estructurales que permitan generar la representación de la carta dinamométrica de superficie de un pozo a partir de la medición de la potencia eléctrica consumida por el motor y la programación de la posición de la barra pulida.

Objetivo

Objetivo General

Desarrollar una propuesta que permita generar la carta dinográfica de superficie a partir de la medición de potencia eléctrica consumida por un motor de inducción, teniendo en cuenta diversos aspectos estructurales y geométricos de un sistema de bombeo mecánico convencional ubicado en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado.

Justificación para solucionar el problema

La generación de la carta dinamométrica de superficie parte de la medición de potencia eléctrica consumida por el motor en una carrera de la barra pulida. Posteriormente se determina el torque neto en la caja de engranajes y la fuerza en la barra pulida, teniendo en cuenta parámetros estructurales y geométricos de la unidad de bombeo convencional [1].

Esta metodología es una forma novedosa y alternativa que se está implementando actualmente en los sistemas de bombeo mecánico, para determinar la carta dinamométrica de superficie. Esto puede mejorar de forma eficiente la producción de petróleo en torno a la automatización del sistema que lleva a reducir significativamente el costo de levantamiento por barril, los costos de mantenimiento, reducción de costo de suministro de electricidad total; mejorando así la calidad energética de todo el sistema [2].

Estado del arte

En la patente de Manuel Vázquez y José Fernández [1], se presenta un sistema para optimizar la producción de petróleo en un pozo con unidad de bombeo convencional. Además de este sistema de optimización, también es presentado un modelo matemático que permite encontrar el dinagrama de superficie a partir de la medición de potencia eléctrica en el motor. Este modelo inicia con la relación entre la potencia instantánea entregada al motor y el torque neto en la caja de engranajes. Esta relación es presentada por MaCcoy y sus colaboradores en [3], para estudiar la eficiencia de la producción de petróleo partiendo de la medición de potencia eléctrica en el motor.

Continuando con el modelo matemático presentado por Vázquez y Fernández, se encuentra la fuerza en la barra pulida teniendo en cuenta el torque neto en la caja de engranajes y la geometría de la unidad de bombeo. Finalmente, teniendo el valor de la posición y la fuerza en la barra pulida, se muestra de manera gráfica el dinagrama de superficie.

Este mismo proceso para encontrar el dinagrama de superficie en un pozo de petróleo con unidad de bombeo convencional es descrito de manera cualitativa por M. Vázquez y J. Fernández en [2]. En este artículo se muestran las ventajas y los

incrementos en la producción de crudo que se obtienen al implementar este proceso.

Descripción del contenido

La propuesta comienza con las bases teóricas que permiten analizar la relación matemática existente entre la potencia eléctrica consumida por el motor y el dinagrama de superficie. Luego de establecer estas bases teóricas, se muestra el diseño de un dispositivo electrónico, que nos permite medir los voltajes y las corrientes de línea instantáneas en el motor. Este dispositivo entrega en sus salidas señales proporcionales a los voltajes y corrientes de línea instantáneas para ser adquiridas utilizando la tarjeta NI USB 6009 de National Instruments.

Las señales de los voltajes y corrientes de línea adquiridas son procesadas en el entorno de programación gráfica de LabVIEW. Este entorno de programación gráfica permite, mediante el uso de subVIs con funciones específicas, la visualización de las variables físicas de interés presentes en el proceso.

Finalmente, se hace un registro gráfico de cada una de estas variables hasta llegar al dinagrama de superficie de una unidad de bombeo convencional ubicada en un pozo de campo escuela colorado.

Capítulo 1

1. Marco Teórico

La propuesta para determinar el dinagrama de superficie, tiene en consideración fundamentos teóricos concernientes a la potencia eléctrica consumida por un motor de inducción trifásico, la dinámica, partes y geometría en el sistema de extracción mecánica de crudo de tipo convencional. Todos los anteriores aspectos se describen a continuación.

1.1 Potencia en circuitos de corriente alterna

El análisis de potencia permite estudiar el funcionamiento y eficiencia de las máquinas eléctricas presentes en procesos industriales. Para corriente alterna es de gran importancia porque determina el máximo consumo de potencia que puede tener un dispositivo en un circuito eléctrico y/o electrónico.

1.1.1 Potencia instantánea

La potencia instantánea entregada a un dispositivo se define como el producto de tensión y voltaje en cada instante de tiempo, y su unidad de medida es el Vatio. Esta potencia instantánea se expresa en la ecuación (1).

$$p(t) = v(t) * i(t) \quad [W] \quad (1)$$

Donde:

$v(t)$ = Tensión en el dominio del tiempo (V).

$i(t)$ = Corriente en el dominio del tiempo (A).

1.1.2 Potencia promedio o activa

La potencia promedio se define como el valor medio de la potencia instantánea en un intervalo de tiempo, como se puede ver en la ecuación (2). Asimismo es la verdadera potencia que se aprovecha como trabajo.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad [W] \quad (2)$$

Donde:

$p(t)$ = Potencia instantánea (W).

T = Período (s).

1.1.3 Valores eficaces de corriente y tensión

El valor eficaz (RMS) es el valor equivalente de una señal constante (DC) que desarrollaría la misma potencia media “ P ” en un resistor “ R ” de prueba. La expresión del valor (RMS) de una señal periódica, se presenta en la ecuación (3).

$$X_P = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T X^2 * dt} \quad (3)$$

Donde:

X = Señal periódica.

T = Período (s).

Las expresiones de los valores eficaces de las señales sinusoidales puras de corriente y tensión se indican en las ecuaciones (4), (5) respectivamente.

$$I_P = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad [A_{rms}] \quad (4)$$

$$V_P = \frac{V_m}{\sqrt{2}} [V_{rms}] \quad (5)$$

Donde:

I_m = Amplitud máxima de una señal de corriente (A).

V_m = Amplitud máxima de una señal de tensión (V).

1.1.4 Potencia aparente

Es la potencia total representada en la suma fasorial de la potencia activa y la potencia reactiva o el producto de los valores (RMS) del voltaje por la corriente. En la ecuación (6) se muestra la expresión para calcular la potencia aparente donde su unidad de medida es el Volt.Amper.

$$|S| = V_P * I_P \quad [VA] \quad (6)$$

1.1.5 Factor de potencia

El factor de potencia se basa en la diferencia de fase entre las ondas sinusoidales de voltaje y de corriente. Además, se define como la relación entre la potencia real y la potencia aparente, como se expresa en la ecuación (7).

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{|S|} \quad (7)$$

1.1.6 Potencia compleja

La potencia compleja en un elemento eléctrico se representa como la suma vectorial de la potencia promedio y la potencia reactiva. La ecuación (8) representa la potencia compleja:

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q} \quad [\text{VA}] \quad (8)$$

Donde:

\mathbf{P} = Potencia promedio o activa (W).

\mathbf{Q} = Potencia reactiva (VAr).

La potencia reactiva \mathbf{Q} es la encargada de generar los campos magnéticos en equipos eléctricos como los motores y transformadores.

1.2 Medición de potencia

La medición de potencia activa trifásica consumida por el motor de inducción se expresa en la ecuación (9). Esta se determina aplicando la definición de potencia promedio expresada en la ecuación (2), y se obtiene sumando las potencias activas de cada fase.

$$P_{3\phi} = \frac{1}{T} \int_0^T (p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)) dt \quad [W] \quad (9)$$

1.3 Características principales de la máquina de inducción

Una máquina de inducción trifásica es operada normalmente como motor, es decir transforma la energía eléctrica en energía mecánica, en escasas ocasiones es operada como generador.

En un sistema de bombeo mecánico el torque de carga en el eje del motor es dinámico, esto implica que durante un Stroke la máquina de inducción pueda fluctuar de un estado de operación a otro [4].

1.3.1 Conexión del motor de inducción

En la figura 1 es posible observar las variables eléctricas de interés y la conexión en configuración delta del motor de inducción utilizado en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado, con el propósito de reducir la corriente de arranque y manejar conductores de menos diámetro.

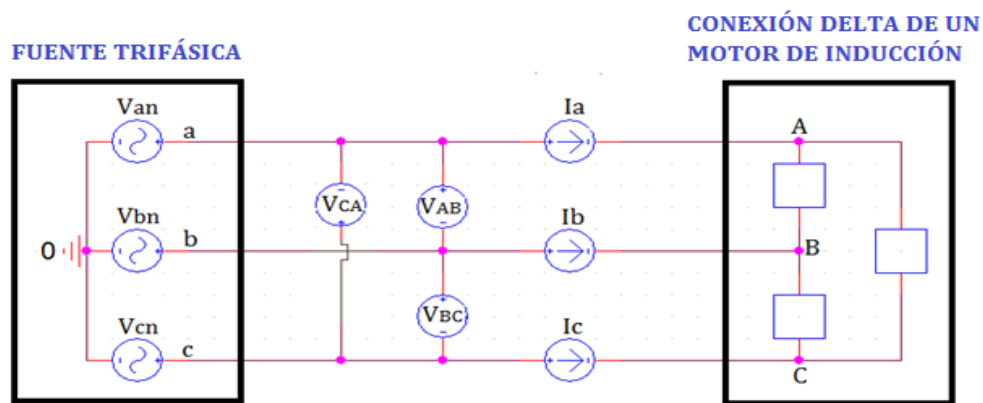


Figura 1: Conexión del motor de inducción del pozo 33.

Las tensiones y corrientes de línea mostradas se denotan como:

V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} = Tensiones de línea.

I_a, I_b, I_c = Corrientes de línea.

Teniendo en cuenta la expresión para la potencia trifásica descrita en la ecuación (9), se reemplazan las potencias por el producto entre la corriente y el voltaje instantáneos en cada línea, como se muestra en la ecuación (10).

$$\overline{P}_{3\phi} = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{AB}(t) * I_a(t) + V_{BC}(t) * I_b(t) + V_{CA}(t) * I_c(t)) dt \quad [W] \quad (10)$$

Esta potencia trifásica media es solo una aproximación, debido a que se desconoce el escalamiento y el desfase que se tendría que aplicar en las corrientes de línea de entrada a los devanados del estator para hallar las corrientes de fase.

La figura 2. Muestra los valores nominales de la máquina de inducción que se encuentra instalada en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado.



Figura 2: Placa del motor de inducción.

Los datos de placa son:

- Potencia de salida: 10 HP
- Tensión nominal: 220/440 (V rms/V rms)
- Corriente nominal: 27.9 /14 (A rms/A rms).
- Frecuencia: 60 (Hz).
- Velocidad nominal: 1185 (rpm).
- Fabricante: Wester Electric.

1.3.2 Velocidad síncrona

Es la velocidad del campo magnético que gira alrededor del estator, generada por las corrientes trifásicas que se aplican en los devanados del estator [5].

La expresión de la velocidad síncrona se presenta en la ecuación (11).

$$N_s = \frac{120 * f_e}{P} \text{ [rpm]} \quad (11)$$

Donde:

f_e = Frecuencia eléctrica (Hz).

P = Número de polos de la máquina de inducción.

1.3.3 Deslizamiento

Es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad mecánica del eje del rotor, usualmente es expresada en términos porcentuales [5].

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} * 100 \quad (12)$$

N_m = Velocidad mecánica del eje del motor (rpm).

1.3.4 Comportamiento como motor o como generador

En la figura 3 se destacan dos regiones de interés:

- En la región como motor el deslizamiento esta dentro del intervalo $0 < s < 1$, y la velocidad del rotor es menor que la velocidad síncrona.

- En la región como generador el deslizamiento es negativo $S < 0$, la velocidad del eje del rotor supera la velocidad de sincronismo por alguna fuente mecánica externa, la característica de par de la máquina se invierte y convierte potencia mecánica en potencia eléctrica [5].

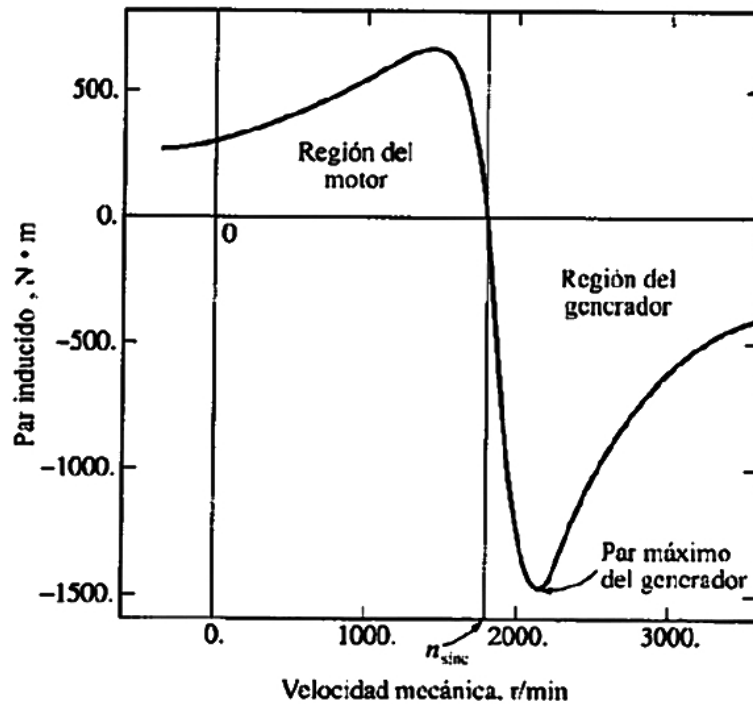


Figura 3: Característica Par inducido vs Velocidad mecánica [5].

1.4 Sistema de bombeo mecánico

Es un mecanismo que permite llevar el crudo desde el yacimiento hasta la superficie en forma artificial, este tipo de levantamiento se caracteriza por su simplicidad y robustez a la hora de implementarlo en campo, además es muy utilizado en campos petroleros [6].

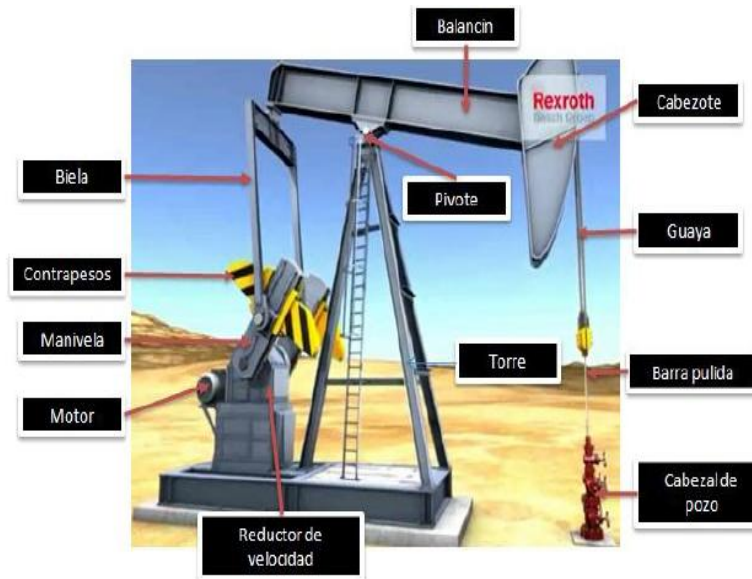


Figura 4: Equipo de superficie de la unidad convencional [6].

1.4.1 Equipo de superficie

Los elementos principales de superficie del sistema de bombeo mecánico se muestran en la figura 4, y se describen a continuación.

Motor: Es una máquina de inducción encargada de transferir movimiento y fuerza a la unidad de bombeo, su adaptación a la unidad de bombeo es por medio de una polea [6].

Unidad de bombeo: la operación de la unidad de bombeo es convertir un movimiento cíclico del motor en un movimiento ascendente y descendente en las varillas, sus principales partes son la polea y correa, caja de engranajes, contrapesos, manivela, biela, balancín y el cabezote [6].

Las unidades se clasifican según norma API por su punto de apoyo en el balancín y su elemento de contrabalance [6].

Cabezal del pozo: Está compuesto por una serie de válvulas que dirigen el flujo de petróleo hacia los tanques de almacenamiento [6].

1.4.2 Equipo de subsuelo

El equipo de subsuelo está compuesto por los siguientes elementos:

Bomba de subsuelo: Es la vía de entrada del flujo de crudo a la tubería de producción, su función es bombear el crudo desde el fondo hacia la superficie. Las partes principales de una bomba de subsuelo son: la varilla de succión, el pistón, el barril de trabajo, la válvula viajera y la válvula estática [6].

Hay dos clases de bombas:

- Tipo tubo o barril.
- Tipo varilla.

Sarta de varillas: Es un componente fundamental en el equipo de superficie el cual permite proporcionar movimiento y potencia de la unidad de superficie a la bomba de fondo de pozo. Son elaboradas en acero y fibra de vidrio [6].

Tubería de producción: Esta tiene en su interior la sarta de varillas y la bomba de subsuelo y cumple la función de ser el camino por donde el flujo de crudo llega hasta la superficie [6].

1.4.3 Geometría de la unidad de bombeo

1.4.3.1 Determinación de la posición de la barra pulida teniendo en cuenta el modelo geométrico 1

Terminología

A, C, G, J, K, P y R = Dimensiones de la geometría de la unidad de bombeo en (in).

$$PR = A \left(\theta_4 - \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad [in] \quad (19)$$

Donde:

$\theta_2, \alpha, \beta, \theta_4 =$ Ángulos de la geometría (rad).

$\theta =$ Ángulo de la manivela (rad).

1.4.3.2 Determinación del factor de torque teniendo en cuenta el modelo geométrico 2

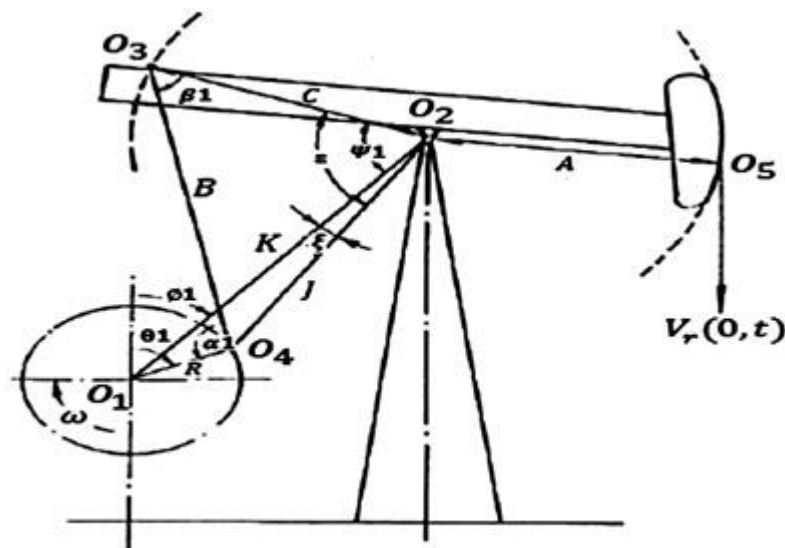


Figura 6: Modelo 2, de la geometría de la unidad convencional [7].

En la figura 6, se observa la geometría del modelo 2, con sus respectivas distancias y ángulos [7]. Durante la determinación del factor de torque es necesario calcular ángulos y distancias por medio de la trigonometría.

En la ecuación (20), se determina el ángulo α_1 a partir de los ángulos ϕ_1 , θ_1 , β_1 y ψ_1 .

$$\alpha_1 = \varnothing_1 - \theta_1 + \beta_1 + \psi_1 \quad [rad] \quad (20)$$

Para determinar el ángulo \varnothing_1 , es necesario tener en cuenta las distancias K , I y G dadas por el fabricante. Las expresiones para encontrar este ángulo se muestran a continuación.

$$(H - G) = \sqrt{K^2 - I^2} \quad [in] \quad (21)$$

$$\varnothing_1 = \tan^{-1}\left(\frac{I}{H - G}\right) \quad [rad] \quad (22)$$

Donde:

$$\psi_1 = \begin{cases} \varepsilon - \xi, & \sin(\theta_1 - \varnothing_1) \geq 0 \\ \varepsilon + \xi, & \sin(\theta_1 - \varnothing_1) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \frac{(C^2 + B^2 - J^2)}{2CB} \quad [rad] \quad (24)$$

$$\varepsilon = \cos^{-1} \frac{(C^2 + J^2 - B^2)}{2CJ} \quad [rad] \quad (25)$$

$$\xi = \cos^{-1} \frac{(K^2 + J^2 - R^2)}{2CJ} \quad [rad] \quad (26)$$

$$J = \sqrt{K^2 + R^2 - 2KR \cos(\theta_1 - \varnothing_1)} \quad [in] \quad (27)$$

$A, H, G, K, I, J, C, B, R$ = Dimensiones de la geometría de la unidad de bombeo (in).

$\alpha_1, \varnothing_1, \beta_1, \psi_1, \varepsilon, \xi$ = Ángulos de la geometría (rad).

θ_1 = Ángulo de la manivela (rad).

La ecuación (28), indica el factor de torque calculado en función del modelo geométrico 2.

$$FT(\theta_1) = \frac{A * R \sin \alpha_1}{C \sin \beta_1} \quad [in] \quad (28)$$

1.4.4 Análisis de torque

Antes de iniciar el análisis del torque en la caja de engranajes, es necesario definir la siguiente terminología:

FT = Factor de torque (In).

PRL = Carga en la barra pulida (lb).

B = Desbalance estructural (lb).

γ = Ángulo de fase de la manivela (rad).

θ = Ángulo de la manivela (rad).

A, R, C = Dimensiones de la unidad de bombeo dadas por el fabricante (in).

β = Ángulo entre P y C (rad).

α1 = Ángulo entre P y R, medido en sentido de las manecillas del reloj (rad).

M = Máximo momento de contrabalance de las contrapesas y la manivela (lb. in).

CBE = Efecto de contrabalance (lb).

θ_c = Ángulo de la manivela en el efecto de contrabalance (rad).

FT_c = Factor de torque a un ángulo ***θ_c*** (in).

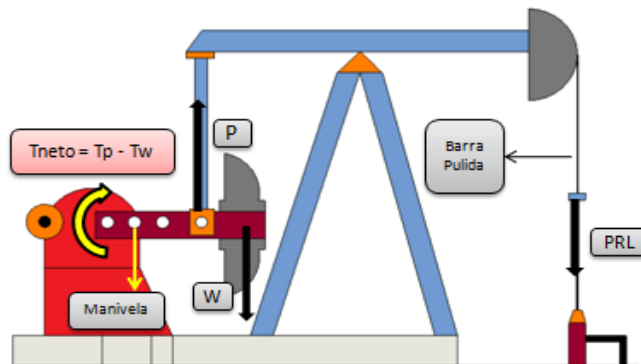


Figura 7: Análisis del torque en la unidad convencional [6].

En la figura 7. Se puede apreciar que la carga en la barra pulida (**PRL**) actúa a través de la unidad de bombeo, aplicando una fuerza (**P**) en la biela. Esta fuerza aplica un torque (**T_p**) en el eje de la caja de engranajes [6].

Por otra parte, el peso de la manivela y de las contrapesas (**W**) aplican un torque (**T_w**) en el eje de la caja de engranajes opuesto al torque (**T_p**) [6].

El torque neto en la caja de engranajes se define como la diferencia entre el torque del eje de baja (**T_p**) y el torque (**T_w**), para cualquier ángulo de la manivela. Este se expresa en la ecuación (29).

$$T_{neto}(\theta) = T_p(\theta) - T_w(\theta) \quad [lb.in] \quad (29)$$

Donde:

T_p = Torque originado por las cargas en la barra lisa (lb.in).

T_w = Torque generado por las contrapesas (lb.in).

1.4.4.1 Torque **T_p** causado por la fuerza aplicada a la barra pulida

El torque (**T_p**) causado por la fuerza aplicada a la barra pulida es igual al factor de torque (**FT**) multiplicado por la diferencia de la carga en la barra pulida y el desbalance estructural, como se expresa en la ecuación (30) [6].

$$T_p(\theta) = FT(\theta) * [PRL(\theta) - B] \quad [lb.in] \quad (30)$$

1.4.4.2 Factor de torque

El factor torque es un número que al multiplicar por las cargas en la barra pulida determina el torque aplicado en el eje de baja velocidad de la caja de engranajes. Puede pensarse en el factor de torque como una manivela ficticia en la caja de engranaje a la cual las cargas de la barra pulida son aplicadas, como se aprecia en la figura 8 [6].

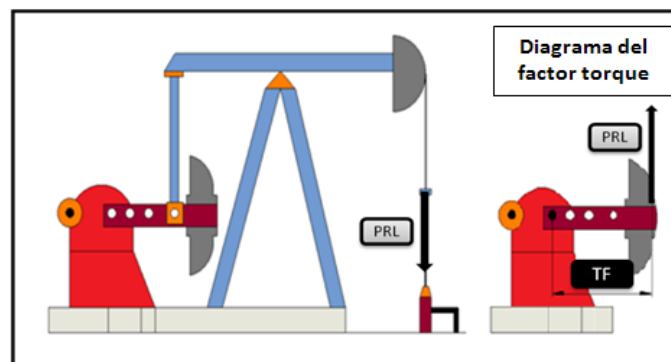


Figura 8: Forma práctica para entender la definición del factor de torque [6].

La expresión para calcular el torque es tomada del modelo geométrico 2 [7].

$$FT(\theta) = \frac{A * R \sin \alpha 1}{C \sin \beta 1} \quad [in] \quad (31)$$

Donde:

A, R, C = Dimensiones de la unidad de bombeo especificadas por el fabricante en pulgadas (in).

$\beta 1$ = Ángulos entre P Y C (rad).

$\alpha 1$ = Ángulo entre P y R medido en sentido de las manecillas del reloj

(rad).

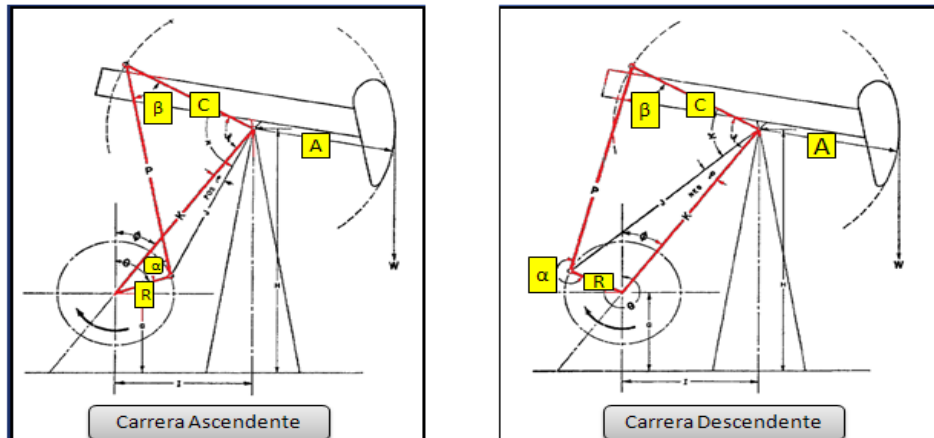


Figura 9: Parámetros y geometría para determinar el factor de torque [6].

En la figura 9, se aprecia el modelo para determinar el factor de torque a través de los parámetros y geometría de la unidad.

1.4.4.3 Desbalance estructural de la unidad de bombeo mecánico convencional

El desbalance estructural (B), es la fuerza que se necesita para que la barra lisa mantenga el balancín en una posición horizontal con las bielas desconectadas de los pines de la manivela, para unidades convencionales como se muestra en la figura 10. La fuerza es positiva cuando actúa hacia abajo y negativa cuando actúa hacia arriba [6].

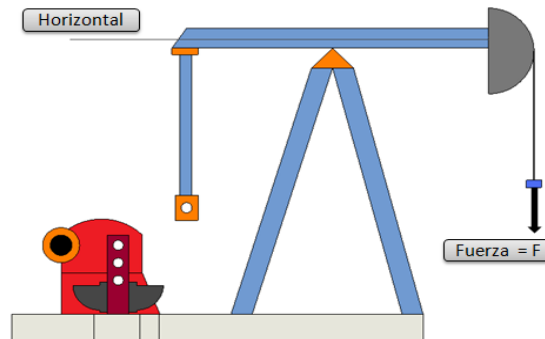


Figura 10: Forma práctica para determinar el desbalance estructural [6].

1.4.4.4 Ángulo de fase de la manivela

El propósito del ángulo de fase de la manivela es ayudar a reducir el torque en la caja de engranaje mejorando la fase entre las cargas en la barra pulida y el momento de las contrapesas [6].

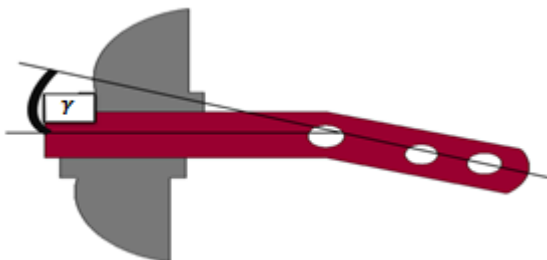


Figura 11: Ángulo de fase de la Manivela [6].

En la figura 11, se aprecia el ángulo de fase de la manivela el cual está entre el pin de la manivela y los brazos de las contrapesas, para la mayoría de las unidades de bombeo convencionales el ángulo de fase de la manivela es cero [6].

1.4.4.5 Torque de las contrapesas y la manivela

El torque (T_W) causado por las contrapesas en la caja de engranaje se expresa en la ecuación (32) [6].

$$T_W(\theta) = M * \sin(\theta - \gamma) \text{ [lb. in]} \quad (32)$$

Donde:

M = Máximo momento de contrabalance de las contrapesas y las manivelas (Lb.in).

En la ecuación (33), se puede apreciar la expresión de torque neto en la caja de engranajes con sus dos elementos definidos anteriormente [6].

$$T_{neto}(\theta) = FT(PRL - B) - M \sin(\theta - \gamma) \text{ [lb. in]} \quad (33)$$

La fuerza en la barra pulida se despeja de la ecuación (33), dando como resultando la expresión de la ecuación (34).

$$PRL(\theta_1) = \frac{T_{neto}(\theta_1) + M \sin(\theta_1 - \gamma)}{FT(\theta_1)} + B \text{ [lb]} \quad (34)$$

1.4.4.6 Máximo momento de contrabalance

El efecto de contrabalanceo (CBE) a un ángulo dado de la manivela es equivalente a las cargas en la barra pulida que balancean las contrapesas a esa posición [6].

Cuando se registra el efecto de contrabalance, el torque causado por las cargas en la barra pulida es igual y opuesto al torque de las contrapesas, en este instante,

el torque neto en la caja de engranaje es igual a cero, como se expresa en la ecuación (35) [6].

$$T_{neto}(\theta) = 0 = FT_c(CBE - B) - M \sin(\theta_c - \gamma) \text{ [lb.in]} \quad (35)$$

De la ecuación (35), despejamos (M) y obtenemos la siguiente expresión

$$M = \frac{FT_c * (CBE - B)}{\sin(\theta_c - \gamma)} \text{ [lb.in]} \quad (36)$$

Donde:

M = Momento máximo de contrabalance (lb.in).

CBE = Efecto de contrabalance (lb).

θ_c = Ángulo de la manivela en efecto de contrabalance (rad).

FT_c = Factor de torque a un ángulo θ_c (in).

1.5 Dinagrama de superficie generado por la posición y la fuerza de la barra pulida

El dinagrama de superficie es un medio para determinar el comportamiento de la bomba por cada ciclo de bombeo, y se basa en el registro de cargas y posición de la barra pulida como se puede observar en la figura 12 [8].

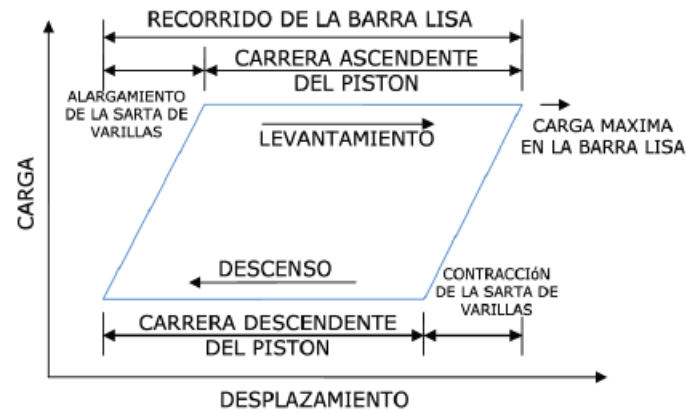


Figura 12: Dinagrama ideal de superficie [8].

Para generar el dinagrama de superficie se superponen los puntos de carga y desplazamiento en un instante de tiempo.

1.6 Relación entre la potencia eléctrica y el torque neto en la caja de engranajes

Partimos de la definición de potencia. Físicamente la potencia es la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo, apreciada en la ecuación (37) [9].

$$Potencia = \frac{trabajo}{tiempo} \quad (37)$$

El trabajo es obtenido multiplicando la fuerza por la distancia expresada en la ecuación (38), y se representa en unidades de $N.m$ (Newton.metro) y $lb.ft$ (libras.pie) [9].

$$trabajo = fuerza * distancia \quad (38)$$

Reemplazando la ecuación (38), en la (37). Obtenemos la potencia en términos de la fuerza, distancia y tiempo, expresada en la ecuación (39)

$$Potencia = \frac{fuerza * distancia}{tiempo} \quad (39)$$



La velocidad es la relación entre la distancia y el tiempo, apreciada en la ecuación (40) [9].

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo} \quad (40)$$

La potencia es igual a la fuerza por la velocidad, denotada en la ecuación (41) [9].

$$Potencia = fuerza * velocidad \quad (41)$$

Finalmente, la ecuación (42), expresa la potencia en el eje de rotación.

$$Potencia = torque * velocidad rotacional \quad (42)$$

En el sistema internacional, las unidades de potencia se expresan en W (Watts), el torque $N.m$ (Newton.metro), y la velocidad angular en rpm (revoluciones por minuto).

En la ecuación (43), un Watt es equivalente a un $N.m$ sobre segundo.

$$1[W] = 1 \left[\frac{N.m}{s} \right] \quad (43)$$

En la ecuación (44), se expresa la equivalencia de una revolución por minuto.

$$1[rpm] = 1 \left[\frac{2\pi}{1 rev} \right] * \left[\frac{1min}{60 s} \right] \quad (44)$$

Las unidades de potencia en el eje de rotación en kW (kilo Watts), se expresan en la ecuación (45).

$$1[kW] = 1[W] * 1 \left[\frac{kW}{1000 W} \right] * 1 \left[\frac{min}{60 s} \right] * 1 \left[\frac{2\pi}{rev} \right] \quad (45)$$

La ecuación (46), expresa la relación útil de potencia en el eje de rotación en kW (kilo Watts) [9].

$$P = \frac{T[N.m] * rev[rpm]}{9550} [kW] \quad (46)$$



Despejando el torque de la ecuación (46). Se obtiene la nueva expresión de torque en la ecuación (47).

$$T = \frac{9549 * P[kW]}{rev[rpm]} [N.m] \quad (47)$$

La ecuación (48), indica la relación de conversión de $N.m$ (Newton.metro) a $lb.in$ (libras.pulgada).

$$1[N.m] = 8.85[lb.in] \quad (48)$$

La ecuación (49), es la nueva expresión de torque en $lb.in$ (libras.pulgada).

$$T = \frac{84.508 * P[kW]}{rev[rpm]} [lb.in] \quad (49)$$

La relación entre revoluciones por minuto y Strokes por minuto es tomada de la nomenclatura de bombeo artificial y formulas de aplicación de LUFKIN, expresada en la ecuación (50) [10].

$$SPM = \frac{rpm}{R} * \frac{d}{D} \quad (50)$$

Donde:

rpm = Revoluciones por minuto del motor primario.

R = Relación de la caja de engranajes.

d = Diámetro de la polea del motor primario.

D = Diámetro de la polea de la caja reductora.

Teniendo en cuenta las ecuaciones que relacionan al torque [$lb.in$] con la potencia eléctrica [kW] y las revoluciones por minuto [rpm] con los Strokes por minuto [SPM], se determina la ecuación (51) [3].

$$T_n(t) = \frac{84.508 * P(t) * Eff}{SPM * Sv} [lib.in] \quad (51)$$

Los términos presentes en la ecuación del torque neto en la caja de engranajes se describen a continuación:

$P(t)$ = Potencia instantánea consumida por el motor en (kW).

Eff = Eficiencia motor / reductor típicamente de 0.8.

SPM = Carreras por minuto de la unidad de bombeo.

Sv = Velocidad mínima / velocidad promedio típicamente de 0.9.

Capítulo 2

2. Descripción del proceso propuesto para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción.

El Proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, tiene en cuenta el modelo matemático presentado en la patente de Manuel Vázquez y José Fernández [1].

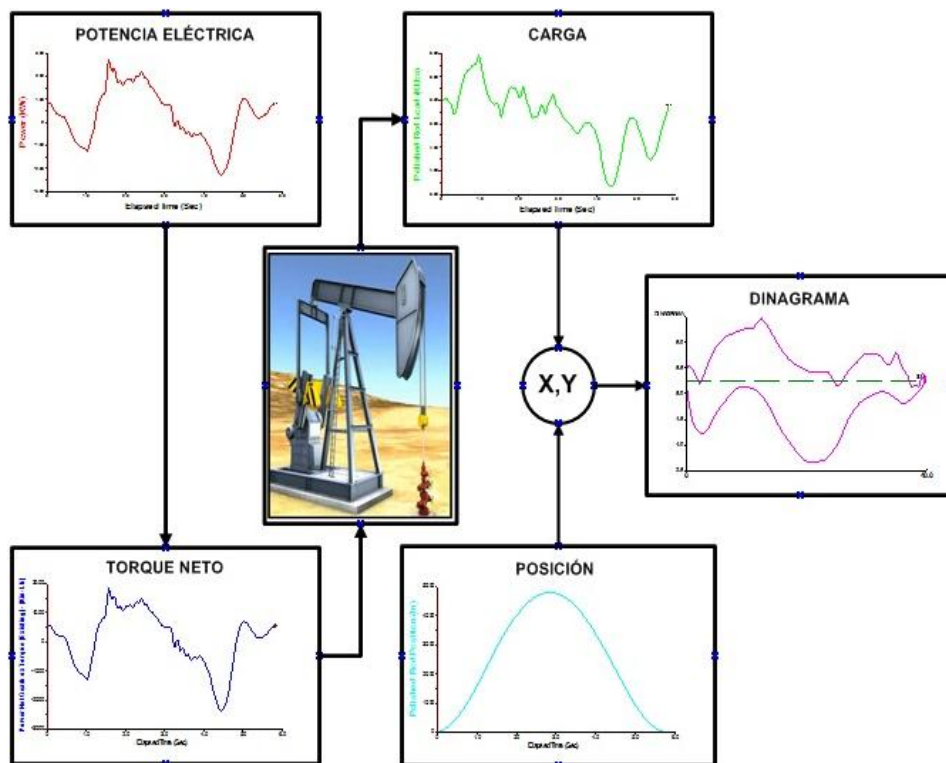


Figura 13: Diagrama de bloques del proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica suministrada al motor de inducción.

En la figura 13, se muestra un diagrama de bloques en donde se presenta el proceso para determinar el dinagrama de superficie en un sistema de bombeo

mecánico convencional. Este proceso consta de cinco etapas, iniciando con la potencia consumida por el motor de inducción. En la segunda etapa se determina el torque neto en la caja de engranajes teniendo en cuenta la potencia consumida por el motor. La tercera etapa tiene en cuenta la geometría, dimensiones de la unidad de bombeo y el torque neto en la caja de engranajes para determinar la fuerza o carga en la barra pulida. En la cuarta y quinta etapa, se determina la posición de la barra pulida para finalizar el proceso al representar el dinagrama de superficie teniendo en cuenta la Fuerza vs la Posición en la barra pulida. Además, se toman graficas de referencia de cada una de las etapas del proceso con la ayuda de mediciones en campo realizadas con el analizador de pozos TWM (Total Well Management) desarrollado por ECHOMETER COMPANY.

2.1 Potencia eléctrica consumida por el motor trifásico de inducción

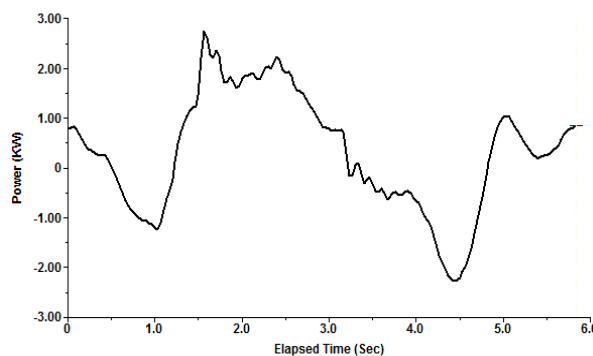


Figura 14: Potencia del motor de inducción instalado en el pozo 33 [11].

En la figura 14, se muestra la forma de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción instalado en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado. Esta es tomada empleando el software TWM y se toma como referencia en la primera etapa del proceso.

La potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, se determina con un dispositivo electrónico que permite medir de manera aproximada los voltajes y corrientes de línea. En el capítulo 3, se describe todo lo relacionado con su diseño, fabricación y funcionamiento.

La medición de potencia eléctrica consumida por el motor, no tiene en cuenta la presencia de un variador de velocidad, ya que convierte el sistema eléctrico en un sistema no lineal, por lo tanto, la medición de potencia eléctrica es más compleja. Es necesario mencionar esta apreciación, ya que en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado se encuentra instalado un variador de velocidad en su sistema y la potencia eléctrica consumida por el motor cambia los resultados del proceso.

La expresión para hallar la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, teniendo en cuenta los voltajes y corrientes de línea instantáneos, fue descrita en el capítulo 1, en la ecuación (10). Esta ecuación es retomada en el inicio del proceso para determinar el dinagrama de superficie.

$$\overline{P}_{3\phi} = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{AB}(t) * I_a(t) + V_{BC}(t) * I_b(t) + V_{CA}(t) * I_c(t)) dt [W] \quad (10)$$

2.2 Torque neto en la caja de engranajes

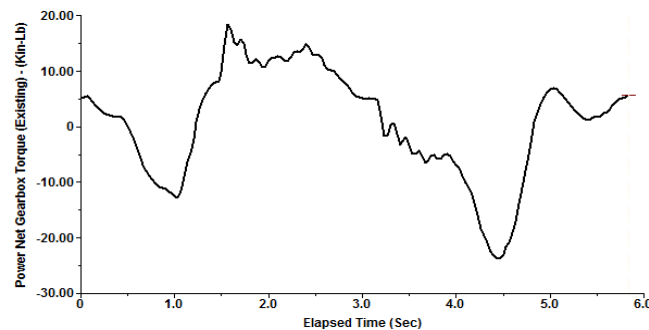


Figura 15: Torque neto en la caja de engranajes de la unidad TC-322-C [11].

En la segunda etapa del proceso para determinar el dinagrama de superficie, se toma como referencia el torque neto de la caja de engranajes obtenido con el analizador TWM, este se muestra en la figura 15.

El torque neto en la caja de engranajes se relaciona de manera proporcional con la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, como se mostro en el capítulo 1, en la ecuación (51).

$$T_n = \frac{84.508 * P(t) * Eff}{SPM * Sv} [lb.in] \quad (51)$$

En el caso de la unidad TC-322-C se tienen cuenta los siguientes valores:

$$SPM = 10,2$$

$$Sv = 0,9$$

$$Eff = 0,8$$

2.3 Fuerza en la barra pulida

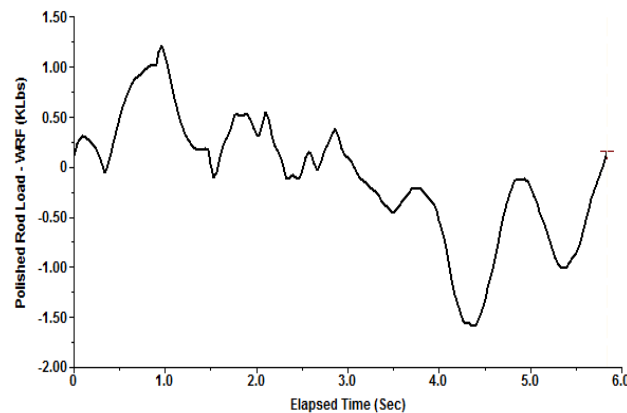


Figura 16: Fuerza en la barra pulida de la unidad TC-322-C [11].

La fuerza en la barra pulida, se muestra en la figura 16. Esta gráfica es tomada con el analizador de pozos TWM y se utiliza como referencia en la cuarta etapa del proceso para determinar el dinagrama de superficie.

Teniendo en cuenta la geometría, dimensiones y el torque neto en la caja de engranajes de la unidad de bombeo mecánico, se determina la fuerza en la barra pulida. La relación entre el torque neto y la fuerza en la barra pulida se expresa en la ecuación (34) y representa la tercera etapa para determinar el dinagrama de superficie.

$$PRL(\theta 1) = \frac{T_{neto}(\theta 1) + M \sin(\theta 1 - \gamma)}{FT(\theta 1)} + B \quad (34)$$

En el desarrollo de la ecuación (34), es necesario especificar las dimensiones y características dadas por el fabricante de la unidad de bombeo mecánico convencional. Esta unidad es de referencia TC-322-C fabricada por LUFKIN. Las dimensiones y especificaciones de esta unidad se relacionan con la figura 17 y se muestran en la tabla 1.

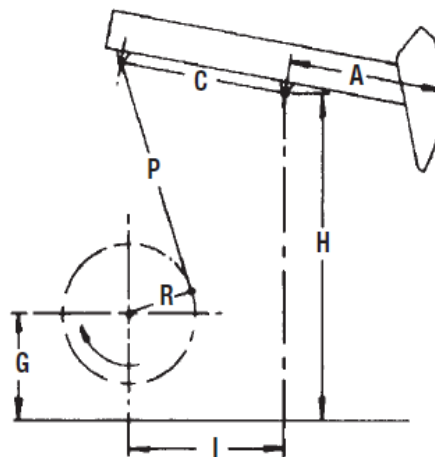


Figura 17: Dimensiones Unidad de bombeo mecánico convencional [10].



<i>Fabricante</i>	<i>LUFKIN</i>
<i>Clase</i>	<i>Convencional</i>
<i>API</i>	<i>TC - 322 - C</i>
<i>Caja de engranajes</i>	<i>90000 [in.lb]</i>
<i>Carga estructural</i>	<i>17000 [lb]</i>
<i>Desbalance estructural</i>	<i>44 [lb]</i>
<i>A</i>	<i>84 [in]</i>
<i>P</i>	<i>93 [in]</i>
<i>K</i>	<i>122 [in]</i>
<i>C</i>	<i>64 [in]</i>
<i>I</i>	<i>81 [in]</i>
<i>Tau</i>	<i>0 [grados]</i>
<i>R</i>	<i>18 [in]</i>
<i>Largo del Stroke</i>	<i>48 [in]</i>
<i>SPM</i>	<i>10.2</i>

Tabla 1: Especificaciones Unidad de bombeo mecánico convencional TC-322-C [11].

El factor de torque FT , se determina utilizando el modelo geométrico de la unidad de bombeo convencional presentado [7]. Este modelo se describe en el capítulo 1 y se reemplaza el valor de las dimensiones y características presentadas en la tabla 1.

Teniendo en cuenta lo anterior se reemplaza dichos valores en este modelo geométrico, a continuación:

$$\theta_1 = \text{ángulo de la manivela [rad]}$$

$$\alpha_1 = \theta_1 - \theta_1 + \beta_1 + \Psi_1 \text{ [rad]}$$

$$(H - G) = \sqrt{(122)^2 - (81)^2} = 91.2304 \text{ [rad]}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{81}{91.2304}\right) = 0.7261 \text{ [rad]}$$

$$J = \sqrt{122^2 + 18^2 - 2 * 122 * 18 \cos(\theta_1 - 0.7261)} \text{ [in]}$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \frac{(64^2 + 93^2 - J^2)}{2 * 64 * 93} \text{ [rad]}$$

$$\varepsilon = \cos^{-1} \frac{(64^2 + J^2 - 93^2)}{2 * 64 * J} \text{ [rad]}$$

$$\xi = \cos^{-1} \frac{(122^2 + J^2 - 18^2)}{2 * 122J} \text{ [rad]}$$

$$\psi_1 = \begin{cases} \varepsilon - \xi, & \sin(\theta_1 - \theta_1) \geq 0 \\ \varepsilon + \xi, & \sin(\theta_1 - \theta_1) < 0 \end{cases}$$

Luego, se realiza una simulación teniendo en cuenta la ecuación del factor de torque y los valores obtenidos anteriormente para el segundo modelo de geometría.

$$FT(\theta_1) = \frac{84 * 18 \sin \alpha_1}{64 \sin \beta_1} \text{ [in]}$$

En la figura 18, es posible observar el factor de torque simulado para la unidad TC-322-C, en el entorno de programación gráfica de LABVIEW. El factor de torque tiene un periodo igual a 360°, por lo tanto es posible determinar el valor del factor de torque a un ángulo de 90°.

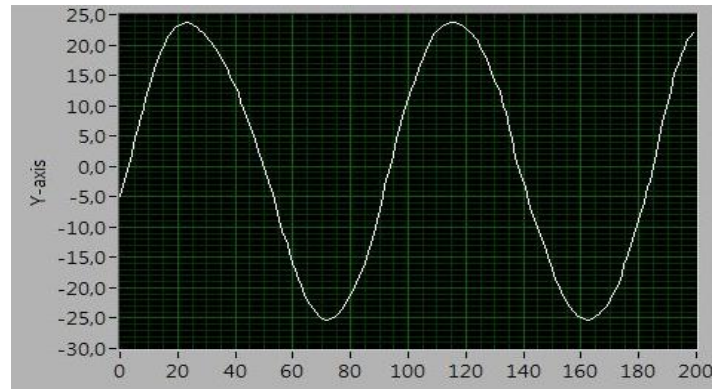


Figura 18: Simulación del Factor de torque para la unidad TC-322-C.

Revisando los valores de la simulación se encuentra que el factor de torque a un ángulo de 90° es $FT_c = 23.642 [in]$.

Finalmente, se encuentra el máximo momento de contrabalance M dado en la ecuación (36), a partir del efecto de contrabalance CBE dado en la tabla 1.

$$M = \frac{23.642 * (1000 - 0.044)}{\sin(90 - 0)} = 23640 [lb. in]$$

Retomando la ecuación (34), para determinar la fuerza en la barra pulida PRL , se reemplazan los valores encontrados anteriormente.

$$PRL(\theta 1) = \frac{T_{neto}(\theta 1) + 23640 * \sin(\theta 1 - 0)}{FT(\theta 1)} + 44 [klb]$$

2.4 Posición de la barra pulida

La posición de la barra pulida puede ser determinada de dos maneras. La primera forma es teniendo en cuenta el modelo geométrico 1 de la unidad de bombeo

convencional presentado en [6] y la segunda forma es opcional, mediante detección por video, usando el software de análisis y procesamiento de imágenes IMAQ para LABVIEW. La detección de la barra pulida usando IMAQ, es presentada en el capítulo 4.

En la figura 19, se muestra la posición de la unidad TC-322-C tomada con el analizador de pozos TWM y es usada como referencia en esta etapa del proceso.

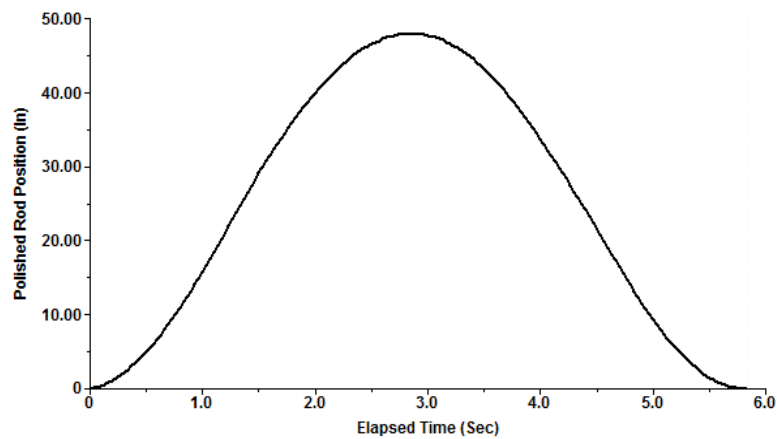


Figura 19: Posición de la barra pulida de la unidad TC-322-C [11].

A continuación, se toman los valores de las características y dimensiones de la unidad TC-322C presentados en la tabla 1 y se reemplazan en el modelo geométrico 1 [6].

$$\theta_2 = 2\pi - \theta + \alpha \quad \text{ángulo de la manivela [rad]}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{81}{122} \quad [\text{rad}]$$

$$L = \sqrt{122^2 + 18^2 - 2 * 122 * 18 \cos \theta_2} \quad [\text{in}]$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{(L^2 + 122^2 - 18^2)}{2 * 122 * L} * (j) \quad [\text{rad}]$$

$$\text{donde : } j = \begin{cases} 1 \text{ para,} & 0^0 < \theta_2 < \pi \\ -1 \text{ para,} & \pi < \theta_2 < 2\pi \end{cases}$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \frac{(93^2 - 64^2 - L^2)}{2 * 64 * L} - \beta \quad [rad]$$

Finalmente, se llega a la expresión para encontrar la posición de la barra pulida teniendo en cuenta la geometría de la unidad de bombeo. Esta expresión se muestra en la ecuación (19).

$$PR = 84 \left(\theta_4 - \frac{\pi}{2} - \alpha \right) [in] \quad (19)$$

La expresión anterior representa la cuarta etapa del proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la unidad de bobeeo mecánico convencional.

2.5 Dinagrama de superficie generado por la fuerza y la posición de la barra pulida

Partiendo de la ecuación para determinar la fuerza en la barra pulida presentada en la sección 2.3 y de la ecuación para determinar la posición de la barra pulida presentada en la sección 2.4, es posible representar el dinagrama de superficie en un gráfico (x,y), donde el eje (x), representa la posición en el tiempo de la barra pulida y el eje (y), representa la fuerza de la barra pulida en el tiempo.

La figura 20, muestra una representación del dinagrama de superficie del pozo 33 de Campo Escuela Colorado. Esta figura es tomada con el analizador TWM y sirve como referencia para observar los valores máximos y mínimos de la fuerza y posición en la barra pulida.

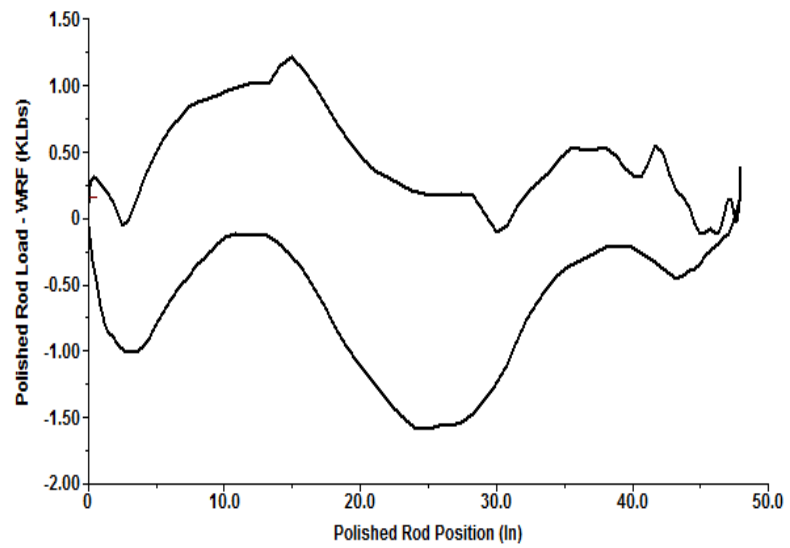


Figura 20: Dinagrama de superficie del pozo 33 [11].

Capítulo 3

3. Adquisición de datos

En este capítulo se muestra en detalle el proceso de diseño y construcción de un dispositivo de sensado y adecuación de señales, para la adquisición de los valores de tensión y de corriente instantáneas por cada línea en un motor de inducción de 10 HP, conectado a un sistema trifásico. La adquisición se realiza en la caja de distribución eléctrica durante uno o más Strokes en un sistema de bombeo mecánico en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado.



Figura 21: Caja de distribución eléctrica del pozo 33.

El variador de velocidad no es conectado, es decir la red trifásica alimenta directamente el motor de inducción de 10 HP.

3.1 Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación hace parte del dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente. En su diseño utiliza un transformador con Tap Central, este debe ser conectado a una toma monofásica disponible en la caja de distribución eléctrica.

3.1.1 Componentes del circuito

Dispositivo	Cantidad
Transformador con Tap central	1
Diodo IN4001	4
Capacitor 1000 uF	4
Regulador LM7815C	1
Regulador LM7915C	1
Resistencia 1 kΩ	2
LED	2

Tabla 2: Componentes del circuito de la fuente DC.

- **Transformador con Tap central:** Es un transformador monofásico de 110/24 (V rms/ V rms).

Cuenta con una tierra en el secundario que a su vez es también el punto de tierra de los dispositivos electrónicos, por tanto los aísla de la tierra de potencia proveniente de la red de alimentación monofásica.

- **Diodo D1N4001:** Es un diodo con un voltaje de polarización directa de 1.1 V y una tensión pico inversa de 50 V. Se utilizan cuatro diodos de esta referencia para realizar una configuración de rectificación de onda completa.
- **Capacitor electrolítico 1000 uF:** Es un condensador de 25 V que no permite cambios bruscos de voltaje y se carga a un valor pico de tensión determinado por el tipo de señal de entrada en sus terminales.
- **Regulador LM7815C:** Es un regulador de tensión positiva de +15 V de salida.
- **Regulador LM7915C:** Es un regulador de tensión negativa de -15 V de salida.
- **Resistencia 1 kΩ:** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, limita la corriente para la protección del LED chorro blanco.
- **LED:** Es un diodo luminiscente de 3mm de diámetro, cada diodo indica la polarización de la fuente de alimentación.

3.1.2 Diagrama esquemático del circuito

El circuito esta dividido en dos partes:

- El transformador con Tap central que se conecta directamente en la toma monofásica de 110 V rms de la caja eléctrica.
- El Rectificador de onda completa con carga capacitiva, con reguladores de tensión (positiva y negativa) de la figura 22 recibe las dos señales de tensión sinusoidales referenciadas a la tierra del secundario del transformador con Tap central y entrega una fuente continua dual de ± 15 V.

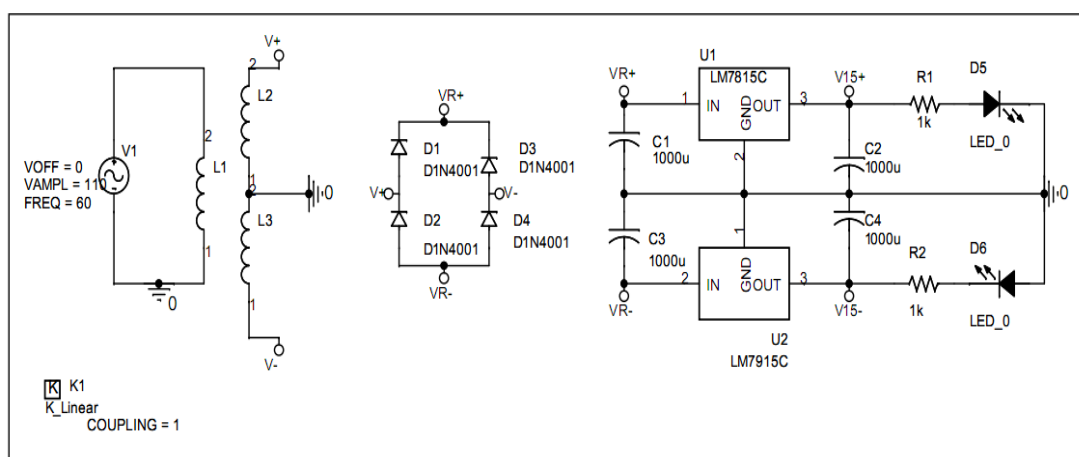


Figura 22: Circuito de fuente de alimentación en OrcadCapture.

3.1.3 Resultados de simulación

En la figura 23 se obtienen las tensiones de salida de los regulares:

- LM7815C con una tensión continua de +15.09 V.
- LM7915C con una tensión continua de -15.59 V.

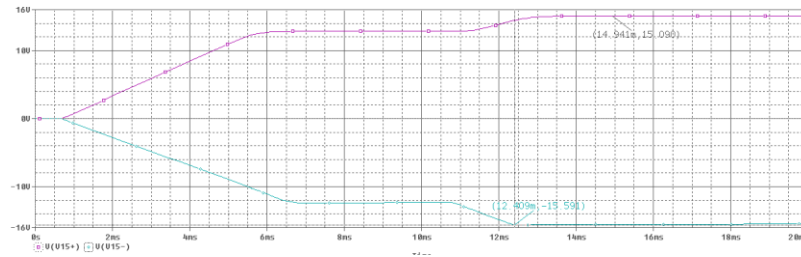


Figura 23: Tensiones de salida vs Tiempo en OrcadCapture.

3.2 Sensado de voltajes

La red trifásica de Campo Escuela Colorado proporciona una tensión de línea de 440 V rms con una frecuencia de 60 Hz y desfase de 120 grados, las fases deben estar directamente conectadas, una a una, a los bornes del motor de inducción, donde el voltaje entre ellas es la tensión de línea de entrada para cada uno de los tres circuitos de sensado de tensión.

3.2.1 Componentes del circuito

Dispositivo	Cantidad
Resistencia 1 M Ω	6
Resistencia 51 k Ω	6
Resistencia 1 k Ω	3
Resistencia de 220 Ω	6
Optoacoplador 4N25M	6
INA117KU	3
Diodo Zener	6

Tabla 3: Componentes del circuito sensor de tensión.

- **Resistencia 1 M Ω :** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, limita la corriente en la base del transistor BJT del optoacoplador.
- **Resistencia 51 k Ω :** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, limita la corriente de la tensión de línea de entrada.
- **Resistencia 1 k Ω :** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, representa la resistencia de carga del INA117KU.
- **Resistencia 220 Ω :** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, proporciona la ganancia en la etapa de salida del optoacoplador, es decir en el emisor del transistor BJT operando este en región activa.
- **Optoacoplador 4N25M:** Es un integrado que posee internamente un diodo infrarrojo emisor y un fototransistor, aísla eléctricamente un circuito de entrada de un circuito de salida.
- **INA117KU:** Es un amplificador diferencial de instrumentación de tipo superficial que toma las señales de salida de los optoacopladores y las resta para formar una onda sinusoidal proporcional a la tensión de línea de entrada. Para su utilización es necesario el diseño de un circuito impreso de una sola cara por medio de OrcadLayout.

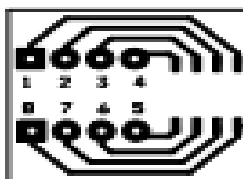


Figura 24: Circuito impreso para INA117KU en OrcadLayout.

Este diseño se implementa tres veces en fibra de vidrio, soldando cada respectivo INA117KU superficial con 8 espadines, para que posteriormente puedan ser soldados en la sección dos del dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente.

- **Diodo Zener:** se utilizan dos diodos de esta referencia conectados en configuración de circuito limitador que se encarga de asegurar una tensión pico 6.2 V en la salida del circuito de sensando de tensión, si el INA117KU tiene alguna falla que implique más amplificación de tensión, evita los daños en la tarjeta de adquisición NI USB 6009.

3.2.2 Diagrama esquemático del circuito

- Cuando se supera el voltaje de polarización directa de 1.15 V del diodo del optoacoplador, este conduce, lo que me indica que para una señal sinusoidal de 440 V rms de entrada conduce un solo diodo por cada semiciclo.
- El diseño de la figura 25 se implementa tres veces donde se obtienen las tensiones VAQ1, VAQ2, y VAQ3 de igual magnitud pero desfasadas 120 grados entre sí, como señales de entrada a la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.

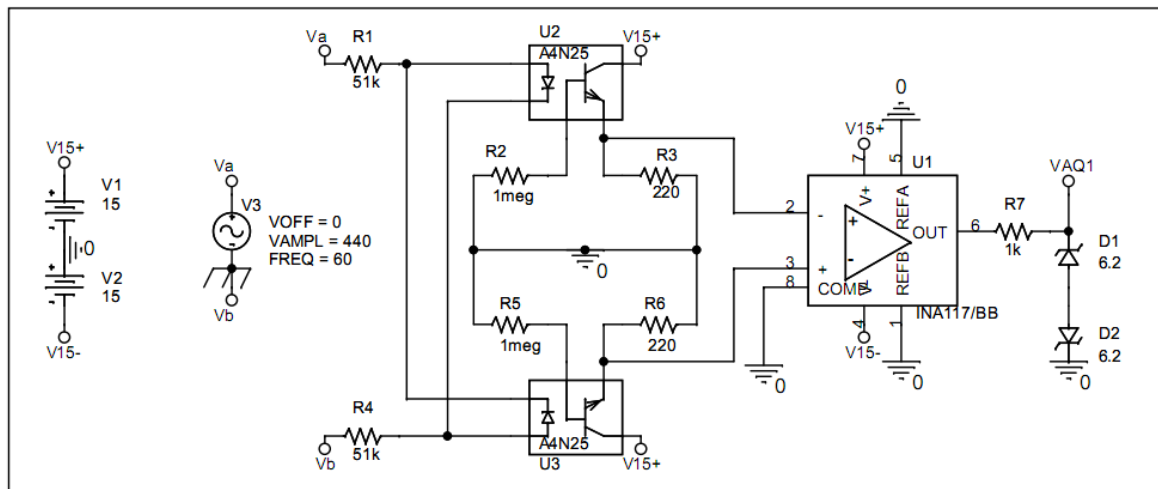


Figura 25: Circuito de sensado de tensión en OrcadCapture.

3.2.3 Resultados de simulación

- Las salidas de tensión VAQ1, VAQ2, y VAQ3 de los INA117KU son sinusoidales, tienen una amplitud pico de 2.5 V y están desfasadas 180 grados respecto de la señal sinusoidal de entrada de 440 V rms, este desfase es arreglado multiplicando por una constante negativa en el proceso de programación en el entorno de LabVIEW.
- En la figura 26 se presenta un tiempo muerto de unos cuantos micro segundos de la señal de salida de uno de los INA117KU, en el periodo de transición de la forma de onda positiva a la negativa y viceversa, debido al espacio de duración en que la señal de tensión de entrada al diodo logra superar su voltaje ánodo cátodo.

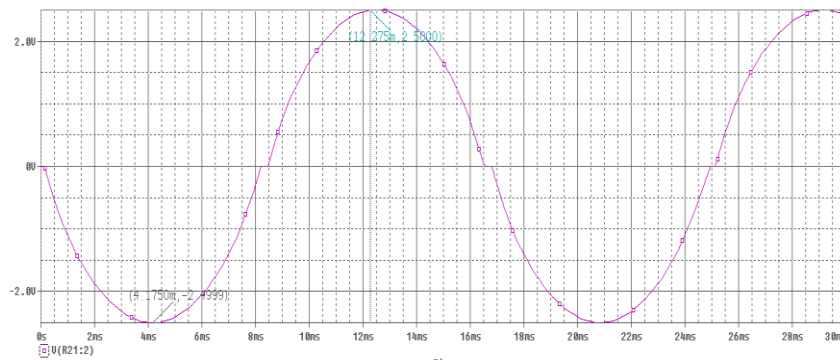


Figura 26: VAQ1 vs Tiempo en OrcadCapture.

3.2.4 Resultados experimentales

- La resistencia de emisor del optoacoplador no es exactamente igual para cada uno de los tres circuitos de sensado de tensión debido a su tolerancia, esto causa una pequeña variación en la magnitud de los voltajes de salida, por lo tanto cada amplitud pico difiere un poco de las demás.
- En la tabla 4 se muestra, una prueba realizada en el laboratorio de maquinas eléctricas, utilizando un autotransformador, se alimenta el lado primario de un transformador monofásico de 220/440 V rms/V rms y obteniendo en el secundario la señal de entrada a el circuito de sensado de tensión. Se hacen mediciones con un multímetro y un osciloscopio, con el fin de obtener una aproximación para la región lineal entre la tensión de línea de entrada eficaz y la tensión de salida eficaz, en cada uno de los tres circuitos de sensado de tensión.

VAB	VAQ1	VBC	VAQ2	VCA	VAQ3
0	0	0	0	0	0
22	0	22	0	22	0
30	0,0061	30	0,00597	30	0,00366
44	0,0321	44	0,0287	44	0,0232
66	0,091	66	0,0771	66	0,0724
88	0,161	88	0,146	88	0,135
110	0,241	110	0,218	110	0,205
132	0,326	132	0,298	132	0,26
154	0,417	154	0,38	154	0,363
176	0,512	176	0,463	176	0,443
198	0,602	198	0,552	198	0,527
220	0,695	220	0,64	220	0,61
242	0,789	242	0,727	242	0,72
264	0,885	264	0,815	264	0,783
286	0,981	286	0,906	286	0,87
308	1,08	308	0,993	308	0,954
330	1,17	330	1,07	330	1,04
352	1,27	352	1,17	352	1,13
374	1,35	374	1,26	374	1,21
396	1,45	396	1,35	396	1,29
418	1,55	418	1,43	418	1,37
440	1,63	440	1,52	440	1,45

Tabla 4: VAQ1, VAQ2, VAQ3 vs Voltaje de línea.

- En la figura 27 se observan las respectivas regresiones lineales, para una variación de tensión de línea de entrada, desde 0 V rms hasta 440 V rms con incrementos de 22 V rms, obteniendo una salida respectiva de voltaje eficaz.

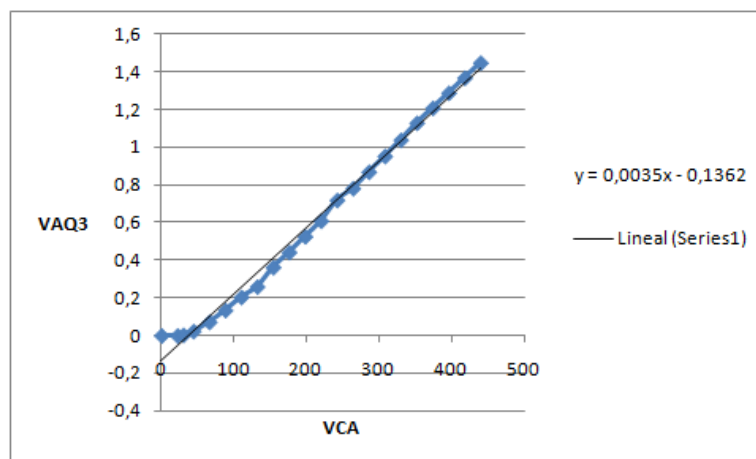
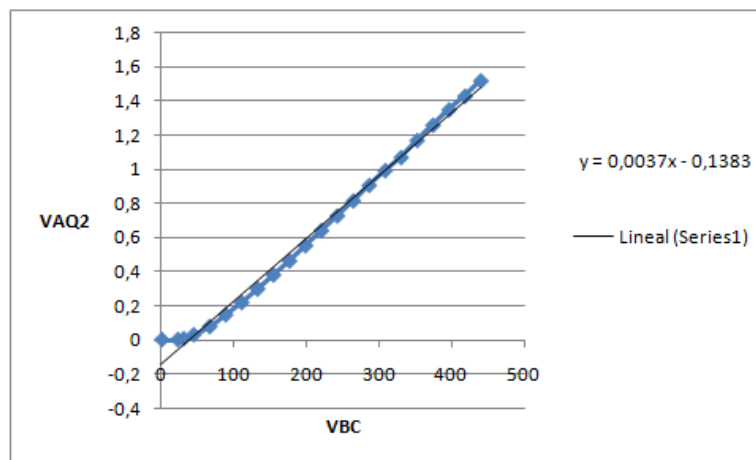
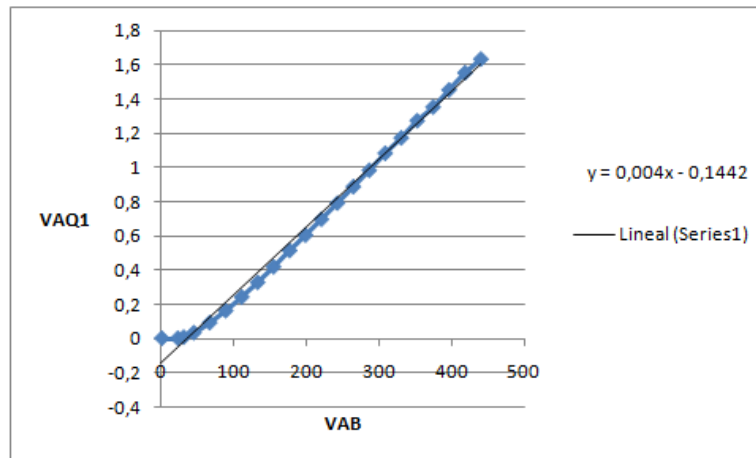


Figura 27: VAQ1, VAQ2, VAQ3 vs Tensión de entrada.

- Gracias a esta regresión lineal, se puede obtener un rango de valores de entrada al circuito de sensado de tensión en donde se tiene un comportamiento lineal.

3.3 Sensado de corriente

De acuerdo a la información suministrada por Campo Escuela Colorado la magnitud de la máxima corriente de línea manejada por un motor de inducción de 10 HP utilizado en el pozo 33 se presenta en el arranque y es aproximadamente de 45 A rms.

Para el circuito de sensado de corriente es necesario que cada uno de los tres cables de entrada al motor de inducción, pase por un transductor de corriente a la vez. Al pasar cada línea por cada transductor se obtiene una corriente de salida proporcional a la que fluye por la red. Este dispositivo debe soportar una corriente primaria mayor que la del arranque del motor.

Se deja como alternativa adicionar un transductor más por si se presenta la posibilidad de medición de la corriente en el neutro.

Los transductores de corriente proporcionan un aislamiento galvánico por medio del efecto Hall entre un circuito primario y un circuito secundario, para su funcionamiento se deben alimentar a una tensión de continua de ± 15 V.

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente, pero como son transductores de compensación lazo cerrado su salida es corriente instantánea.

3.3.1 Componentes del circuito

Dispositivo	Cantidad
Transductor LA 150-P	3
Transductor LA 55-P	1
Capacitor 1 uF	8
Resistencia 10 k Ω	4
Resistencia 1 k Ω	3
Resistencia 0.5 k Ω	7
Resistencia de 0.25 k Ω	2
Jumper	12

Tabla 5: Componentes del circuito sensor de corriente.

- **Transductor LA 150-P:** Es un transductor de corriente, con corriente nominal en el primario de 150 A rms y corriente nominal del secundario de 75 mA rms, es decir tiene una relación de transformación de 1:2000.
- **Transductor LA 55-P:** Es un transductor de corriente, con corriente nominal en el primario de 50 A rms y corriente nominal del secundario de 50 mA rms, es decir tiene una relación de transformación de 1:1000.
- **Capacitor 1 uF:** Es un condensador de tantáleo de 35 V que no permite cambios bruscos de voltaje y se carga a un valor pico de tensión determinado por el tipo de señal de entrada en sus terminales.

- **Resistencia 10 k Ω :** Es un resistor con potencia de disipación de 1 W, se encarga de asegurar una tensión.
- **Jumper:** Es un contacto eléctrico que permite conectar resistencias con la salida del transductor de corriente y obtener una tensión de salida.

3.3.2 Diagrama esquemático del circuito

- Los valores de las resistencias se determinaron de acuerdo a dos parámetros: corriente de línea y relación de conversión del tipo de transductor de corriente.

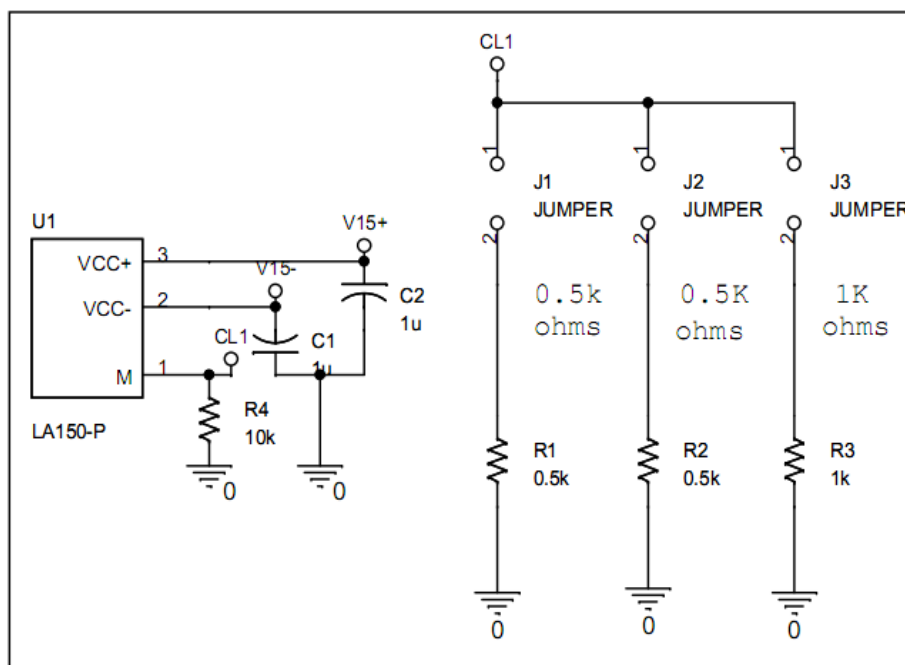


Figura 28: Circuito de sensado de corriente con sonda LA 150-P en OrcadCapture.

- El circuito de la figura 27, es implementado tres veces para las tensiones de salida CL1, CL2 y CN.

- Con estos diseños se obtienen las tensiones CL1, CL2, y CL3 de igual magnitud pero desfasadas 120 grados entre sí, como señales de entrada a la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.
- Se dispone de dos sondas LA 150-P para la salida CL1 y CL2.

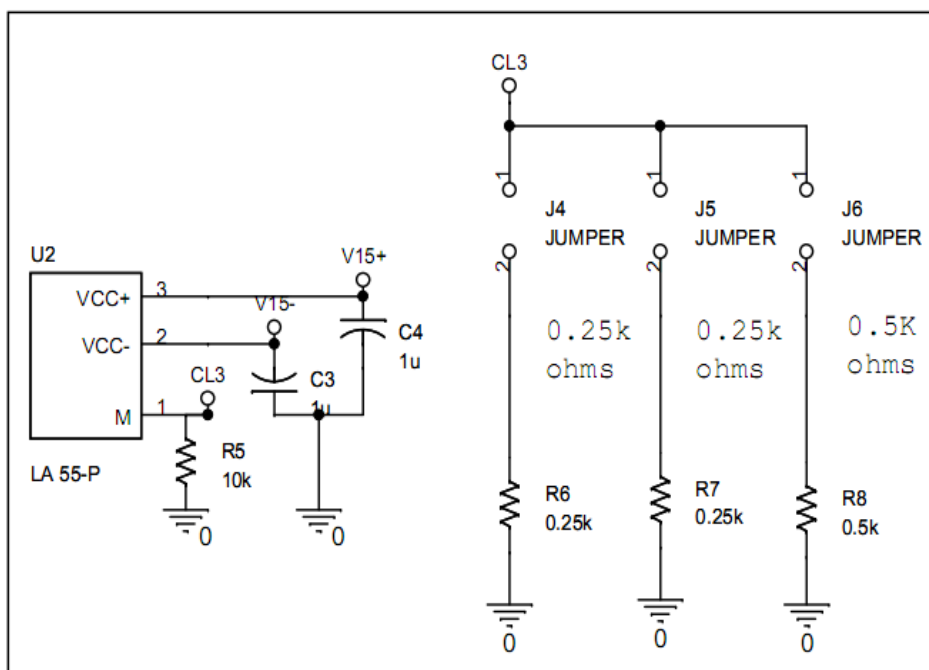


Figura 29: Circuito de sensado de corriente con sonda LA 55-P en OrcadCapture.

- El circuito de la figura 28, es implementado una sola vez para la salida CL3.
- Se dispone de una sonda LA 55-P para la salida CL3.

3.3.3 Resultados de simulación

Las salidas CL1, CL2, CL3 son sinusoidales, en la figura 29 se obtiene una amplitud pico de 5 V de acuerdo a los siguientes valores de corriente:

Para una corriente de línea máxima de entrada de 20 A:

- Sonda LA 150-P se conecta uno de los jumper de resistencia de 0.5 k Ω .
- Sonda LA 55-P se conecta uno de los jumper de resistencia de 0.25 k Ω .

Para una corriente de línea máxima de entrada de 30 A:

- Sonda LA 150-P, se conecta dos jumper, uno de resistencia de 0.5 k Ω y el otro de una resistencia de 1 k Ω .
- Sonda LA 55-P, se conecta dos jumper, uno de resistencia de 0.25 k Ω y el otro de una resistencia de 0.5 k Ω .

Para una corriente de línea máxima de entrada de 50 A:

- Sonda LA 150-P y sonda 55-P, se conectan los tres jumper.

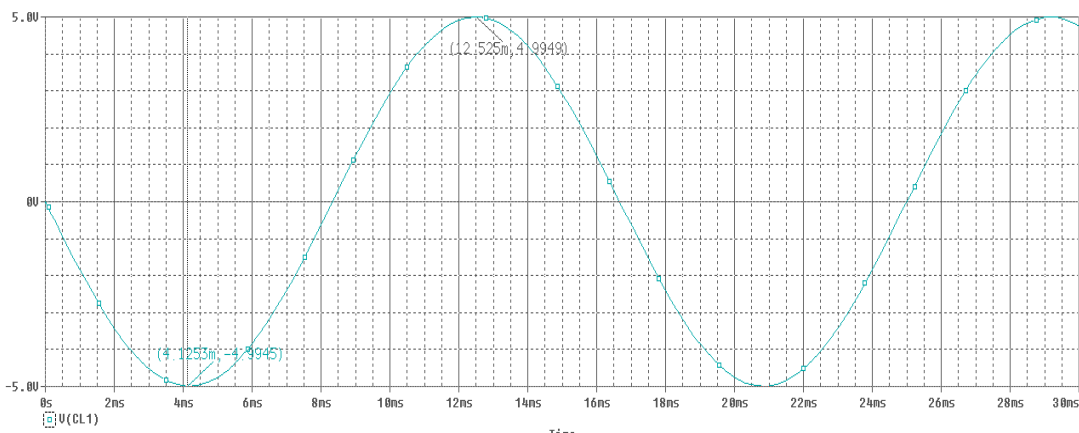


Figura 30: Tensión vs Tiempo en OrcadCapture.

Por seguridad se deja conectada la última configuración de 50 A, debido a que se presenta una alta corriente en el arranque del motor de inducción.

3.3.4 Resultados experimentales

- Se realizaron pruebas en el laboratorio de máquinas eléctricas, utilizando un autotransformador conectándolo directamente a un circuito trifásico resistivo puro en configuración estrella, cada línea de alimentación es introducida por un transductor a la vez.
- La tabla 6 muestra los valores de corrientes eficaces de línea medidas y las corrientes eficaces de línea simuladas.

- Esta prueba hace parte del experimento realizado para calcular por medio de programación la potencia eléctrica con todo el hardware implementado, como se explica posteriormente en los resultados experimentales de la adquisición de datos instantáneos de corrientes y de voltajes.

<i>IA_medido</i>	<i>IA_simulado</i>	<i>IB_medido</i>	<i>IB_simulado</i>	<i>IC_medido</i>	<i>IC_simulado</i>
0	0	0	0	0	0
1,2	1,072696652	1	1,149317842	1	0,937741762
1,3	1,30256022	1,25	1,30256022	1	1,015886908
1,4	1,455802599	1,45	1,455802599	1	1,015886908
1,45	1,609044978	1,45	1,532423789	1,05	1,094032055
1,6	1,609044978	1,6	1,532423789	1,2	1,172177202
1,7	1,609044978	1,7	1,609044978	1,2	1,328467496
1,75	1,685666168	1,8	1,685666168	1,35	1,484757789
1,8	1,838908546	1,9	1,838908546	1,6	1,71919323
1,9	1,838908546	2	1,838908546	1,9	1,797338376
2	1,915529736	2,1	1,915529736	2	1,875483523
2,1	1,992150925	2,2	2,068772115	2,1	1,95362867
2,2	2,068772115	2,2	2,068772115	2,15	1,95362867
2,25	2,068772115	2,35	2,145393304	2,25	2,031773817
2,3	2,222014494	2,3	2,145393304	2,3	2,18806411
2,45	2,375256873	2,5	2,451878062	2,45	2,344354404

Tabla 6: Comparación de corrientes eficaces medidas y corrientes eficaces simuladas.

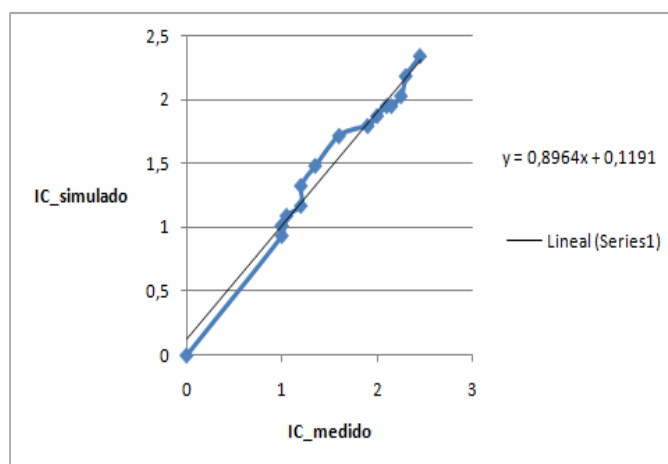
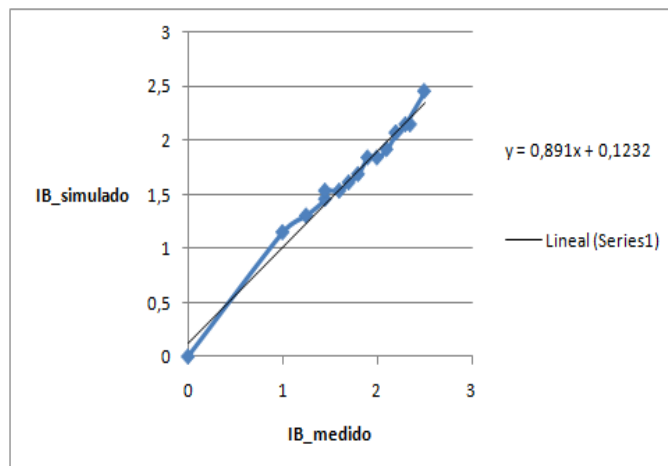
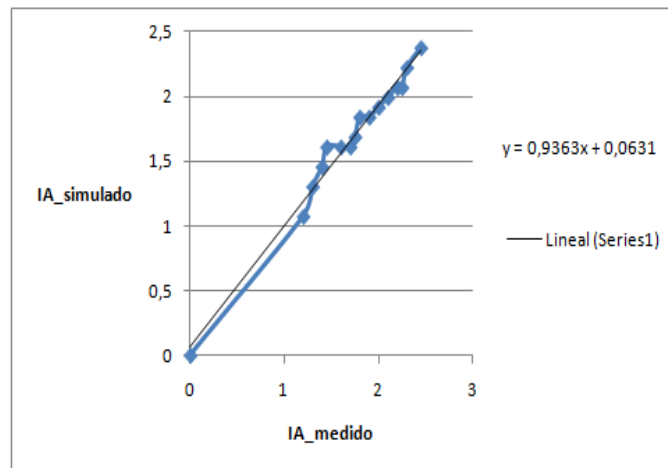


Figura 31: IA, IB, IC simulado vs I medido.

- En la figura 31 se observa el comportamiento de los transductores de corriente para una variación de tensión de entrada de 0 V rms a 200.8 V rms con incrementos de 10 V rms, comparando la corriente de línea eficaz medida directamente con una pinza analógica con la corriente eficaz obtenida en simulación.
- Los transductores de corriente tienen una muy buena linealidad, así que no se hace necesario utilizar una regresión lineal para calibrar los valores en simulación.
- De acuerdo a la tensión de salida obtenida del circuito de sensado de corriente, se hacen los respectivos escalamientos en el proceso de programación en el entorno de LabVIEW, teniendo en cuenta la relación de conversión de cada transductor, y la resistencia al conectar cualquiera de los jumper disponibles.
- Las amplitudes de las tensiones de salida del circuito de sensado de corriente varían en un valor muy pequeño una en comparación a otra. Para una mayor precisión en magnitud se pueden utilizar resistencias variables con muy buena linealidad o resistencias de precisión.

3.4 Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009.

Las variables eléctricas de entrada a la tarjeta de adquisición deben ser procesadas utilizando ocho puertos analógicos para ocho respectivas entradas de tensión, siete de tensión: VAQ1, VAQ2, VAQ3, CL1, CL2, CL3, CN y una entrada de tierra como punto de referencia, es opcional utilizar el puerto para CN. Por

medio de labVIEW se establece una interfaz para visualizar los datos adquiridos con el hardware diseñado.

3.4.1 Características de la tarjeta NI USB 6009

El USB-6009 de National Instruments brinda funcionalidad básica de adquisición de datos básica para aplicaciones de registro simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio [12].

- Energizado a 5 V por bus USB para una mayor movilidad
- Taza de muestreo 48 kS/s
- Rango de tensión de entrada analógico ± 10 V
- 8 entradas analógicas de 14 bits a 48 kS/s
- 2 salidas analógicas de 12 bits a 150 S/s
- 12 E/S digitales
- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET

3.4.2 Puertos analógicos de entrada

Cada señal de salida tanto de la etapa de sensado de tensión, y etapa de sensado de corriente además de la tierra de los dispositivos electrónicos proveniente del transformador con Tap central se conectan por medio de cables a las diferentes entradas de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009, procurando que la magnitud pico de estas no exceda en ningún instante de tiempo, el máximo rango de voltaje permitido para una entrada analógica.

Solo es de interés capturar datos analógicos entonces no se utilizan los puertos de entrada digital, y puertos de salida de la tarjeta.

Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Figura 32: asignación de terminales analógicos [12].

Se utilizan los siguientes terminales de entrada analógicos:

- Terminal 1: GND a la tierra del circuito.
- Terminal 2: AI0 a VAQ3.
- Terminal 3: AI4 a VAQ2.
- Terminal 5: AI1 a VAQ1.
- Terminal 6: AI5 a CN (Opcional).
- Terminal 8: AI2 a CL3.
- Terminal 9: AI6 a CL2.
- Terminal 11: AI3 a CL1.

3.5 Dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente.

El hardware está constituido como la unión de las cuatro etapas de: fuente de alimentación, sensado de corriente y de voltaje, y tarjeta de adquisición de datos. Por medio de OrcadLayout se hacen tres diseños de circuitos impresos por separado, de cinco capas cada uno, reduciendo así su tamaño debido al poco espacio disponible en la caja eléctrica, implementándose por secciones unidas con postes y tornillos pasantes para darle mayor rigidez.

En los anexos se encuentran cada una de las cinco capas impresas: Silkscreen, Top, Bottom, Soldermask Bottom, y Soldermask Top respectivas al esquemático de cada sección.

3.5.1 Secciones del dispositivo de medición y adquisición de voltaje y corriente

3.5.1.1 Primera sección

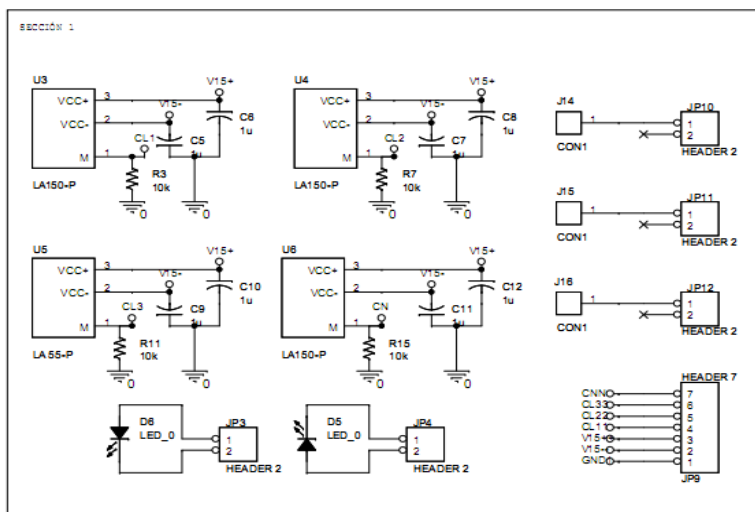


Figura 33: Esquemático de primera sección en OrcadCapture.

Componentes anexos	Cantidad
Banana hembra	3
Molex grande	3
Molex pequeño	2
Espadines	7

Tabla 7: Componentes anexos (primera sección).

- **Banana hembra:** Es un conector de entrada de tensión, cada punto de conexión representa uno de los bornes de entrada al motor de inducción.
- **Molex grande:** Es un conector utilizado para establecer un punto de conexión entre las tensiones de entrada de la sección 1 con el circuito de sensado de tensión de la sección 2.
- **Molex pequeño:** Es un conector utilizado para establecer un punto de conexión entre el circuito de fuente de alimentación de la sección 2 con los LEDs chorro blanco ubicados en la sección 1 para facilitar su visualización.
- **Espadines:** Es un conector macho con siete pines, donde tres de estos terminales tales como: GND, V15+, V15- son entradas provenientes de la sección 2, y los cuatro terminales restantes tales como: CL1, CL2, CL3, CN son salidas provenientes de la sección 1.

3.5.1.2 Segunda sección

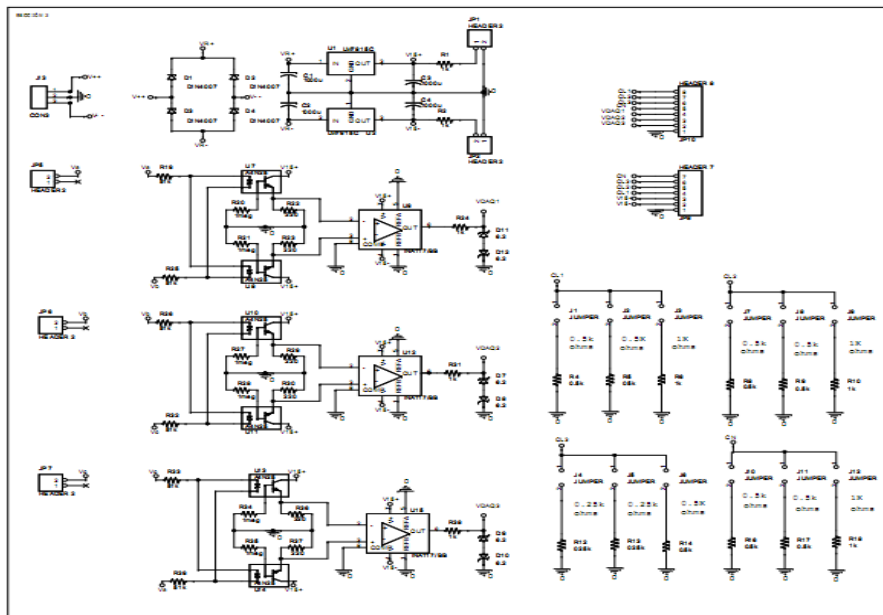


Figura 34: Esquemático de segunda sección en OrcadCapture.

Componentes anexos	Cantidad
Base 6 pines	6
Molex grande	3
Molex pequeño	2
Bornera 3 pines	1
Espadines	15

Tabla 8: Componentes anexos (segunda sección).

Los dos tipos de Molex cumplen la misma función establecida anteriormente en la sección 1.

- **Base 6 pines:** Es un soporte que se utiliza para introducir o retirar el optoacoplador 4N25M.
- **Bornera 3 pines:** Es un conector que se utiliza para acoplar las señales de tensión de salida y tierra del secundario del transformador con Tap central con el circuito de fuente de alimentación.
- **Espadines:** Es un conector macho de siete y ocho pines respectivamente. En el conector de siete pines, tres de estos terminales tales como: GND, V15+, V15- son salidas provenientes de la sección 2, y los cuatro terminales restantes tales como: CL1, CL2, CL3, CN son entradas provenientes de la sección 1. En el conector de ocho pines, los ocho terminales tales como: VAQ1, VAQ2, VAQ3, CL1, CL2, CL3, y CN, son considerados salidas provenientes de la sección 2.

3.5.1.3 Tercera sección

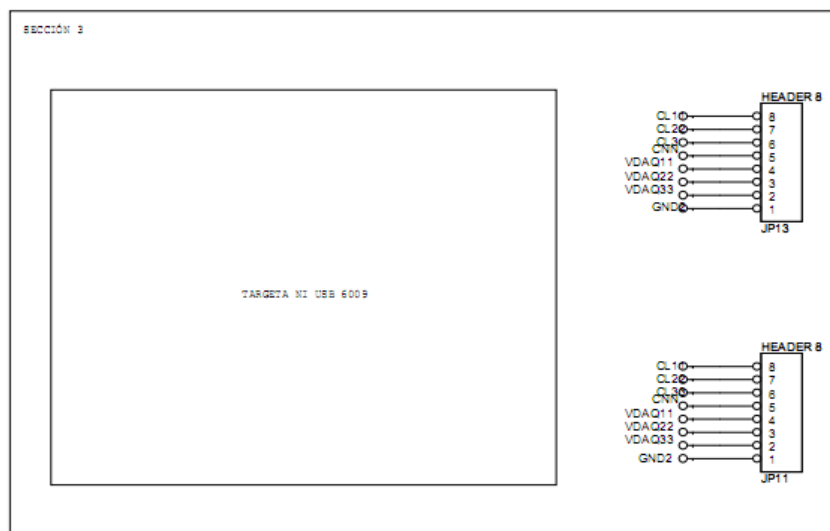


Figura 35: Esquemático de tercera sección en OrcadCapture.

Componentes anexos	Cantidad
Correa ajustable	2
Bornera de 2 pines	4
Espadines	8
Terminal eléctrica	14

Tabla 9: Componentes anexos (tercer sección).

- **Correa ajustable:** Es una correa plástica que se introduce por los huecos de la placa para fijar la tarjeta de adquisición.
- **Bornera de 2 pines:** Es un conector utilizado para unir por medio de cables calibre los puertos de entrada analógicos de la tarjeta con los ocho terminales, tales como: VAQ1, VAQ2, VAQ3, CL1, CL2, CL3, CN, y GND considerados como salidas de la sección 3.
- **Espadines:** Es un conector macho de ocho pines, donde los ocho terminales tales como: VAQ1, VAQ2, VAQ3, CL1, CL2, CL3, CN, y GND son considerados como entradas de la sección 3 provenientes de la sección 2.
- **Terminal eléctrica:** Es un conector que se poncha en cada extremo del cable para darle más consistencia al empalme entre las borneras y la tarjeta de adquisición NI USB 6009.

3.5.2 Acoplamiento entre secciones

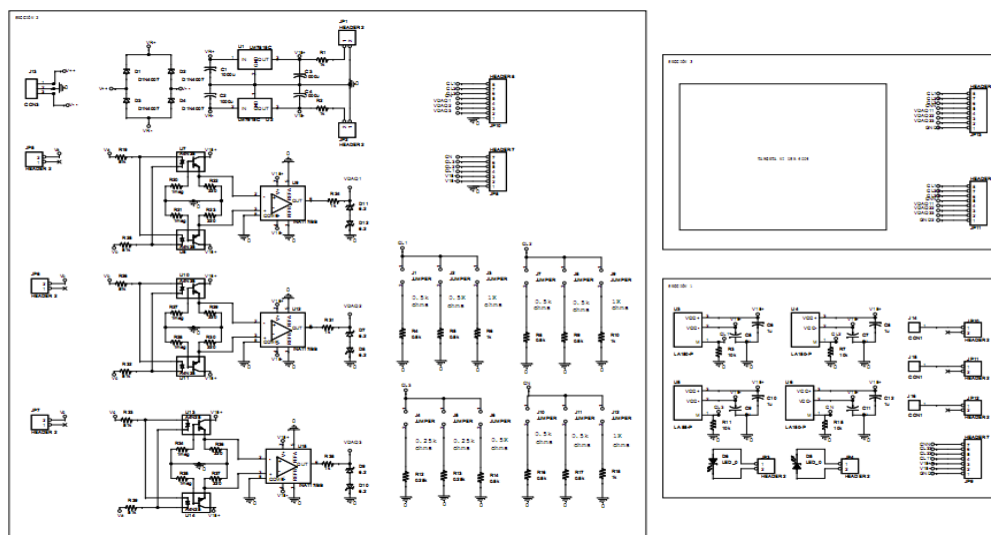


Figura 36: Esquemático de acoplamiento de secciones en OrcadCapture.

Componentes anexos	Cantidad
Cable	3
Correa Rebbon 2 hilos	2
Correa Rebbon 16 hilos	1
Correa Rebbon 14 hilos	1
Conector Rebbon de 16	2
Conector Rebbon de 14	2
Tornillo pasante	4
Tornillo	8
Postes	16

Tabla 10: Componentes anexos (acoplamiento entre secciones).

- **Cable:** Utilizado para la unión de los puntos de conexión entre los molex grande de la sección 1 y sección 2.
- **Correa Rebbon 2 hilos:** Utilizado para la unión de los puntos de conexión entre los molex pequeños de la sección 1 y sección 2.
- **Correa Rebbon 16 hilos:** Utilizado para la unión de los puntos de conexión entre los espadines de la sección 2 con la sección 3.
- **Correa Rebbon 14 hilos:** Utilizado para la unión de los puntos de conexión entre los espadines de la sección 1 y sección 2.
- **Conector Rebbon 16 hilos:** Se poncha en los extremos de la correa Rebbon de 16 hilos.
- **Conector Rebbon 14 hilos:** Se poncha en los extremos de la correa Rebbon de 14 hilos.
- **Tornillo pasante:** Están apoyados en unos empaques de color rojo, se introducen por unos huecos grandes ubicados en los extremos de cada placa para darle estabilidad después de haber colocado todos los postes.
- **Tornillo:** Une dos postes para lograr obtener mayor espacio entre secciones.
- **Postes:** Ayudan a fijar una sección con otra al introducirse en unos pequeños huecos ubicados en los extremos de cada placa.

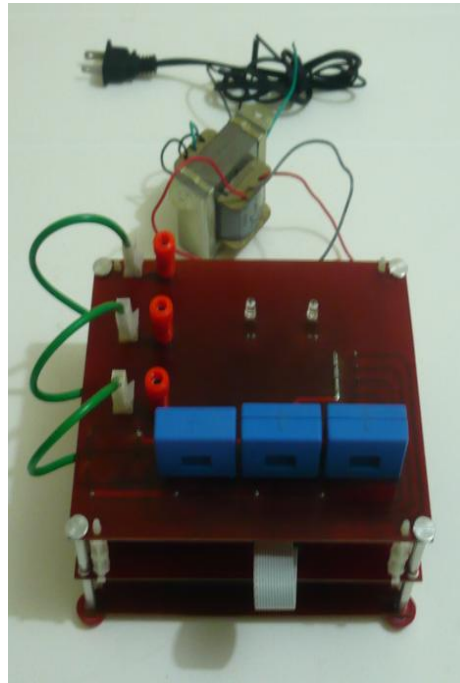


Figura 37: Placas unidas.

Las dimensiones del dispositivo son:

- Largo 16.5 cm
- Ancho 13.7 cm
- Alto 10 cm

3.6 Adquisición de valores instantáneos de voltajes y corrientes

Es la fase donde se sincroniza el software con el hardware, como se observa en la figura 36. Como primera instancia se debe detener la unidad de bombeo, luego de esto, se conecta el dispositivo de medición y adquisición. Finalmente se procede a obtener los datos de las variables de interés en la interfaz del computador al dar nuevamente funcionamiento a la unidad de bombeo durante uno o más Strokes.



Figura 38: Dispositivo conectado en la caja eléctrica.

Cada línea de alimentación al motor de inducción se introduce por cada una de las ranuras de los transductores de corriente y por medio de cables empalmados en la caja eléctrica se obtienen las tensiones en los bornes del motor como entradas para las bananas de la sección 1.

3.7 Resultados experimentales

Se realizaron pruebas en el laboratorio de máquinas eléctricas, utilizando un autotransformador, se alimenta directamente un circuito trifásico resistivo puro en configuración estrella, y el hardware implementado es conectado. Se hace la medición de tensión y corriente de línea con la ayuda de un voltímetro y una pinza amperimétrica, para luego contrastar la medición de una potencia eléctrica media, obtenida de la multiplicación de la corriente eficaz de línea por el voltaje eficaz de línea, con la potencia eléctrica media obtenida en simulación.

Se varía la tensión de entrada del autotransformador de 0 V rms a 200.8 V rms con incrementos de 10 V rms.



Figura 39: Prueba en el laboratorio de máquinas eléctricas.

En la figura 39 se puede observar el montaje realizado en el laboratorio de máquinas eléctricas, donde las bombillas encendidas representan las cargas resistivas conectadas en estrella.

En la figura 40 se muestra que la medición de potencia eléctrica promedio en W encontrada por simulación difiere de la potencia eléctrica promedio medida en W, a causa de la imprecisión que se presenta en la etapa de sensado de tensión.

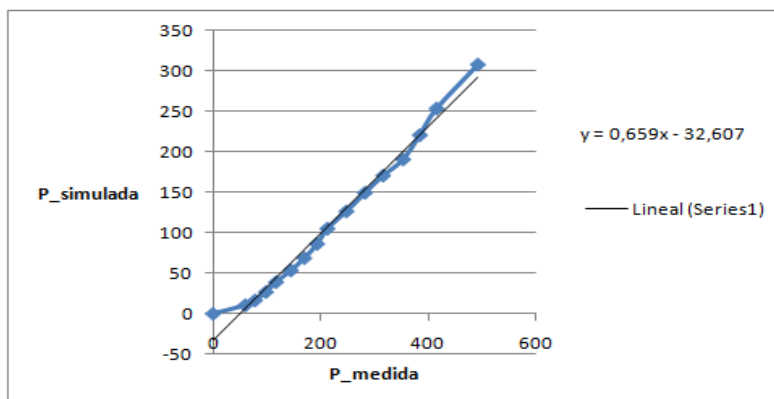


Figura 40: Potencia eléctrica promedio simulada vs Potencia eléctrica promedio medida.

En la tabla 11 se muestra que a medida que se aumenta la tensión de entrada del autotransformador, el error disminuye entre la potencia eléctrica promedio simulada y la potencia eléctrica promedio medida.

VAB_medida	IA_medida	P_medida	Psimulada	% Error
0	0	0	0	0
50,1	1,2	60,12	10,5	82,5349301
60,1	1,3	78,13	16,57	78,7917573
70,1	1,4	98,14	26,95	72,5392297
80,7	1,45	117,015	39,19	66,5085673
90,4	1,6	144,64	53,71	62,866427
99,8	1,7	169,66	68,78	59,4600967
110,4	1,75	193,2	86,32	55,320911
117,9	1,8	212,22	105,19	50,4335124
130,4	1,9	247,76	126,52	48,9344527
141,1	2	282,2	149,507	47,0209072
150,5	2,1	316,05	170,7	45,9895586
160,5	2,2	353,1	190,76	45,9756443
170,7	2,25	384,075	220,66	42,5476795
180,5	2,3	415,15	253,5	38,9377333
200,8	2,45	491,96	307,75	37,4441011

Tabla 11: Comparación entre las potencias promedio medida y simulada.

Capítulo 4

4. Programación del proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia consumida por el motor de inducción en el entorno gráfico de LabVIEW.

En el capítulo 2, se describe el proceso propuesto para determinar el dinagrama de superficie en una unidad de bombeo mecánico convencional. Cada etapa del proceso es programada en el entorno gráfico de LabVIEW. La programación es realizada en forma de diagramas de bloques con la ayuda de SubVIs con funciones específicas, obteniendo como resultado la visualización de las variables de interés en cada una de las etapas del proceso.

4.1 Voltajes y corrientes de línea aplicados al motor de inducción

La medición de los valores de los voltajes y corrientes de línea se realiza a través del dispositivo electrónico descrito en el capítulo 3. Este dispositivo, entrega en sus salidas valores de voltajes y corrientes de línea proporcionales a los valores medidos. Luego son adquiridos con la tarjeta NI USB 6009 de National Instruments.

Los valores de voltajes y corrientes de línea adquiridos son procesados en el entorno de programación gráfica de LabVIEW, por medio del subVI DAQ assistant. Este subVI está configurado para entregar las 6 señales de voltaje adquiridas que son proporcionales a los voltajes y corrientes de línea medidos en la conexión del motor y el suministro eléctrico. La adquisición de estos voltajes se realiza a una tasa de 500 muestras cada 0.001 s.

En la figura 41, se muestra el DAQ Assistant configurado para adquirir 500 muestras cada 0.001 s. También es posible apreciar subVIs correspondientes a la visualización y operaciones matemáticas de los datos.

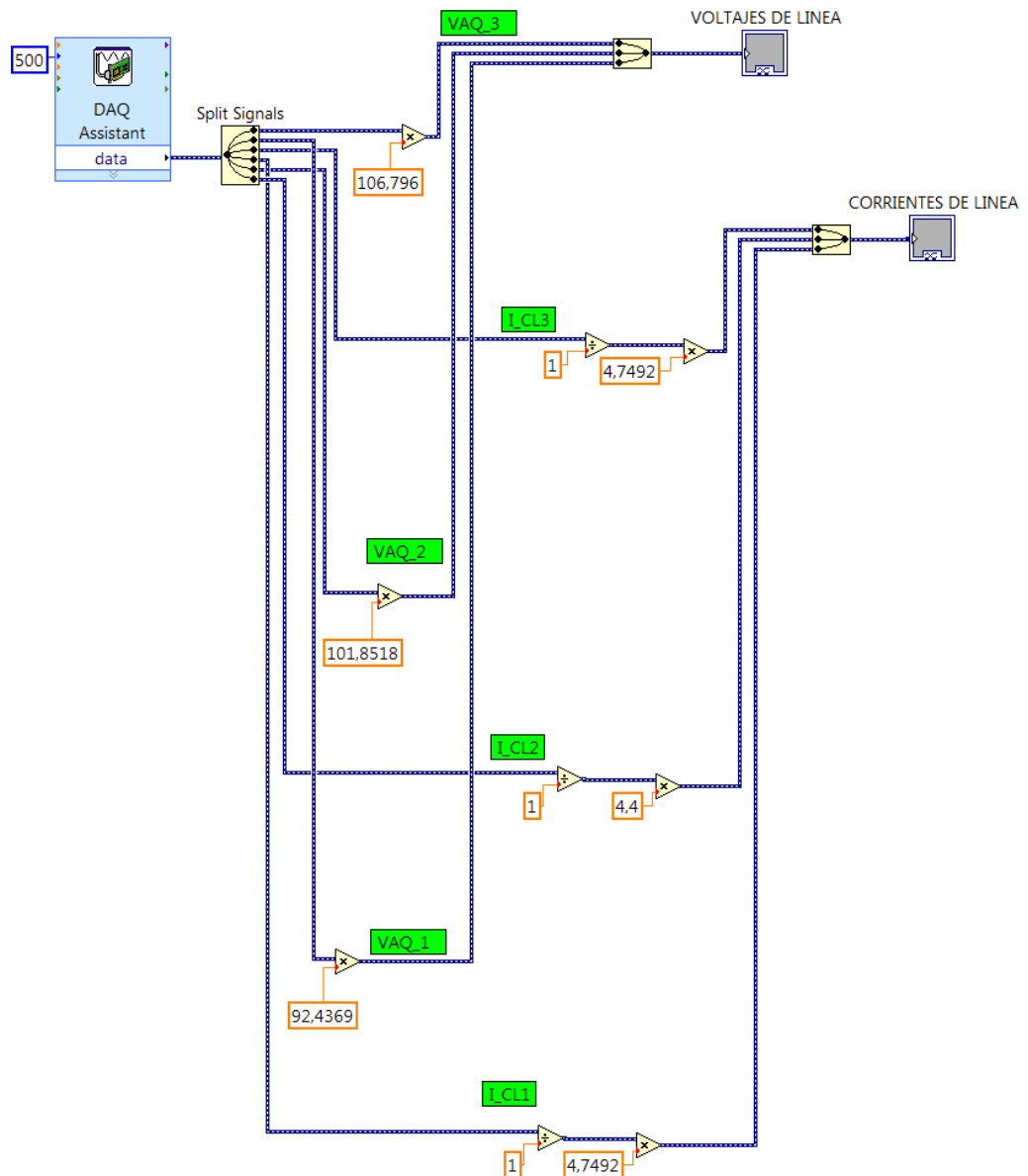


Figura 41: Adquisición de voltajes y corrientes de línea.

Las constantes mostradas en la figura 41, dependen de los valores proporcionales entregados por el dispositivo de medición. Estas señales tienen una amplitud aproximada de 2.5 V, por lo tanto deben ser multiplicadas por una constante para poder visualizar un valor cercano al valor real medido.

4.2 Potencia eléctrica consumida por el motor de inducción

La potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, es determinada con la paleta para la medición de energía eléctrica de LabVIEW. Esta paleta contiene los subVIs denominados EPM_Phase y EPM_Power. Con estos SubVIs es posible realizar cálculos de medición de energía tales como el factor de potencia, potencia real, potencia aparente, potencia reactiva, potencia media y ángulo de fase.

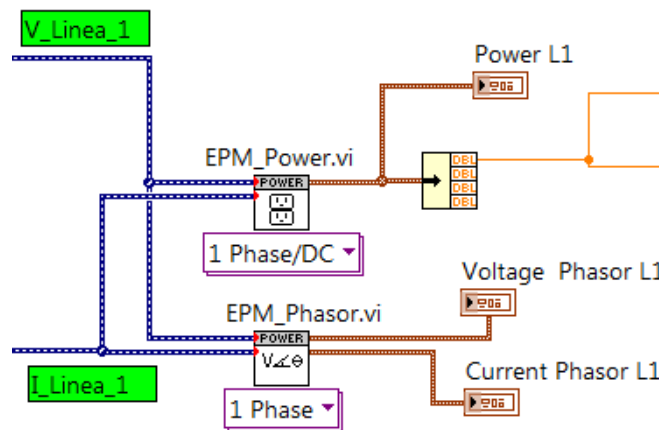


Figura 42: Medición de energía eléctrica

Los subVIs mostrados en la figura 42 son conectados a cada voltaje y corriente de línea. A su salida tenemos como resultado el valor promedio de la potencia por cada línea, pero el ángulo de fase es igual a cero ya que la medición de potencia se realiza como si fueran circuitos monofásicos independientes. Finalmente, las potencias de cada línea se suman, para obtener la potencia trifásica consumida por el motor de inducción.

4.3 Torque neto en la caja de engranajes

Partiendo de la potencia consumida por el motor de inducción, es posible visualizar el torque neto en la caja de engranajes teniendo en cuenta la relación y constantes presentadas en el capítulo 2. En la figura 43, se observa el diagrama de bloques de la relación entre el torque neto, la potencia consumida y las constantes de interés en el entorno grafico de LabVIEW.

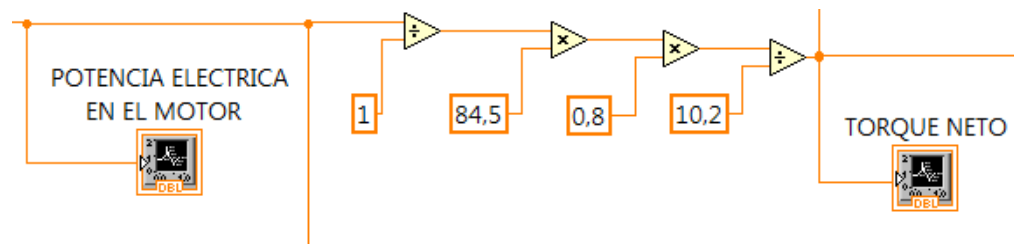


Figura 43: Diagrama de bloques y constantes relacionadas con la potencia eléctrica en el motor y el torque neto en la caja de engranajes.

4.4 Posición de la barra pulida

4.4.1 Posición de la barra pulida teniendo en cuenta las dimensiones y geometría de la unidad de bombeo convencional

Teniendo en cuenta que el tiempo de duración de un Stroke de la unidad de bombeo es aproximadamente igual al tiempo que tarda la manivela en dar una vuelta, es posible determinar la posición de la barra pulida. Esta depende de las dimensiones de la unidad, la geometría de la unidad y del ángulo de la manivela.

En la figura 44, se muestra el subVI denominado Elapsed Time. Este me permite simular el tiempo transcurrido en la simulación y detenerlo cuando el tiempo sea menor o igual al tiempo de un Stroke. El tiempo de un Stroke es de 5.83 s en este caso y es convertido a un ángulo en radianes para calcular la posición de la barra pulida, teniendo en cuenta la geometría y dimensiones de la unidad.

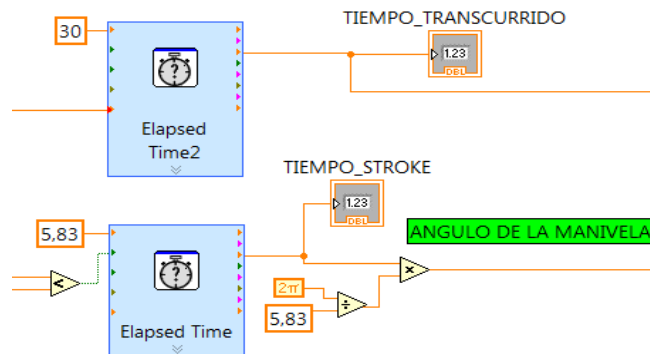


Figura 44: Tiempo transcurrido y el tiempo de stroke.

Después de obtener el ángulo de la manivela en radianes, se realiza un diagrama de bloques teniendo en cuenta el modelo geométrico 1, como se muestra en la figura 45.

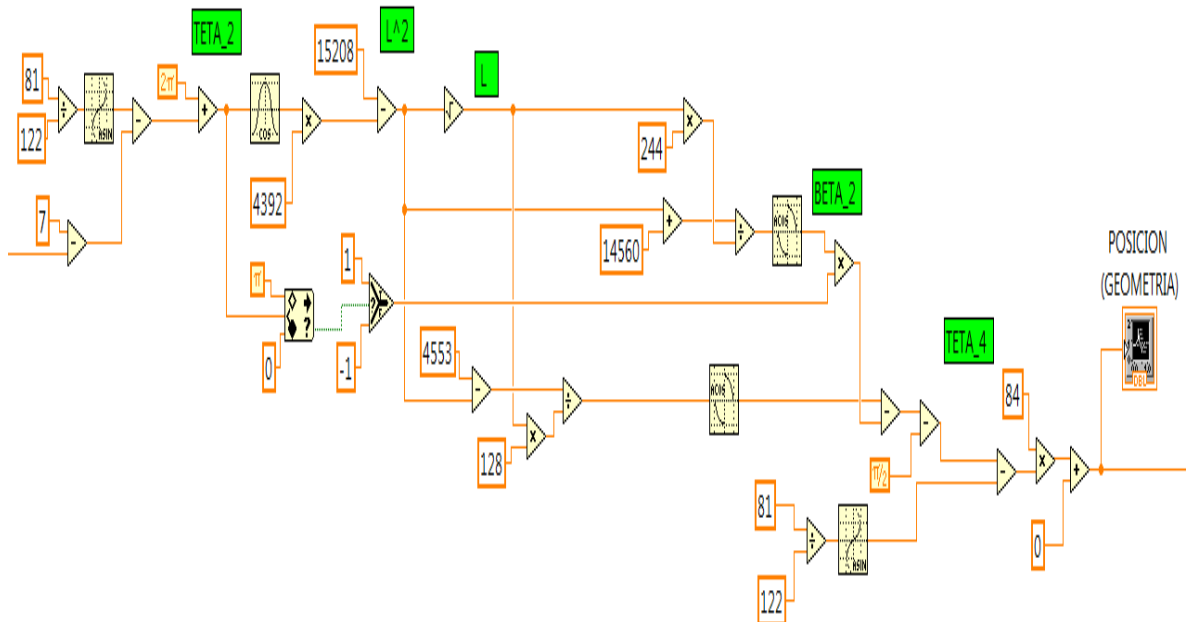


Figura 45: Diagrama de bloques para determinar la posición de la barra pulida teniendo en cuenta el modelo geométrico 1.

4.4.2 Detección de la posición de la barra pulida mediante video

La detección de la posición de la barra pulida mediante video es opcional y se puede llevar a cabo utilizando el software de procesamiento de imágenes denominado IMAQ Visión para labVIEW.

La adquisición de video utilizando IMAQ Visión se realiza con el subVI denominado Vision Acquisition (figura 46). Este subVI reconoce una cámara web y permite configurar características tales como la resolución y el número de fotogramas por segundo. Después de adquirir el video de la unidad de bombeo en movimiento, se utiliza el subVI denominado Vision Assistant.

El Vision Assistan (figura 46) puede ser configurado para reconocer un patrón de color del video adquirido. La barra pulida tiene un color característico que puede ser reconocido, pero para diferenciar la barra pulida de otras partes de la unidad es necesario agregar una señalización de color.

Finalmente después de adquirir video y reconocer un patrón de color en el mismo, se procede a cambiar las coordenadas del plano de la imagen para que sea acorde con el recorrido real de la barra pulida.

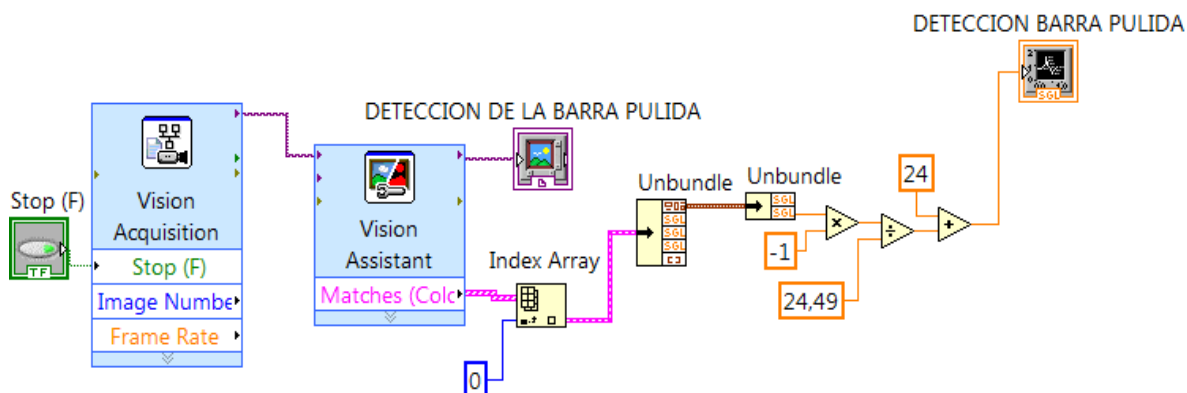


Figura 46: Diagrama de bloques para determinar la posición de la barra pulida mediante adquisición de video.

4.5 Fuerza en la barra pulida

El diagrama de bloques para determinar la fuerza en la barra pulida se muestra en la figura 47. Este diagrama de bloques, tiene en cuenta el proceso presentado en el capítulo 2, donde se tiene en cuenta el modelo geométrico 2, el factor de torque, el torque neto en la caja de engranajes y ángulo de la manivela.

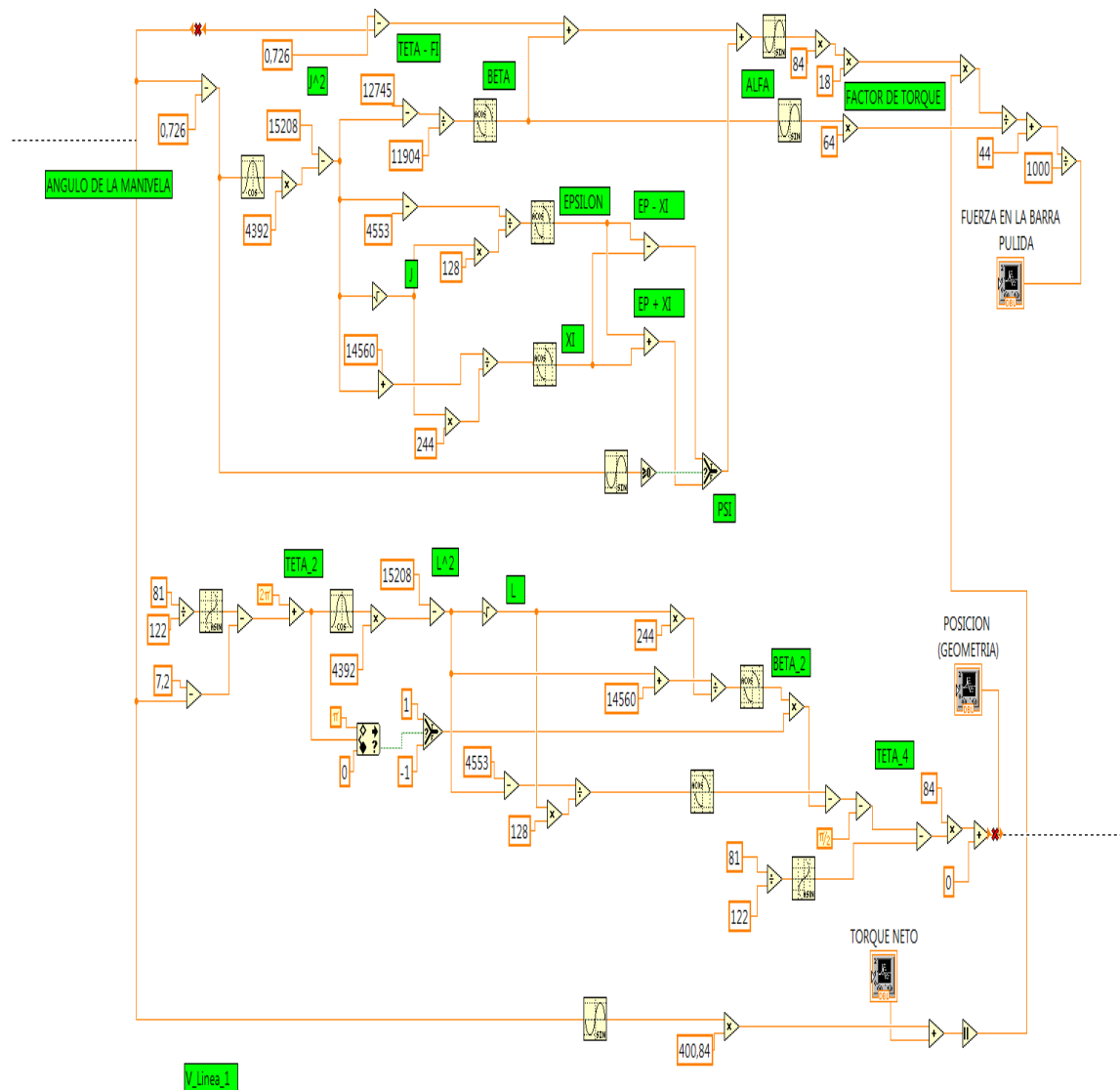


Figura 47: Diagrama de bloques para determinar la fuerza en la barra pulida.

4.6 Dinagrama de superficie generado por la fuerza y la posición en la barra pulida

Finalmente, se obtiene el dinagrama de superficie teniendo en cuenta la fuerza y la posición en la barra pulida. En la figura 48, se observa el diagrama de bloques que me permite realizar un grafico en dos dimensiones (x,y). En el eje (x), se tiene en cuenta los valores de la posición de la barra pulida en el tiempo y en el eje (y) se tiene en cuenta los valores de la fuerza de la barra pulida. Esta gráfica es generada por el subVI denominado XY chart Buffer (figura 48).

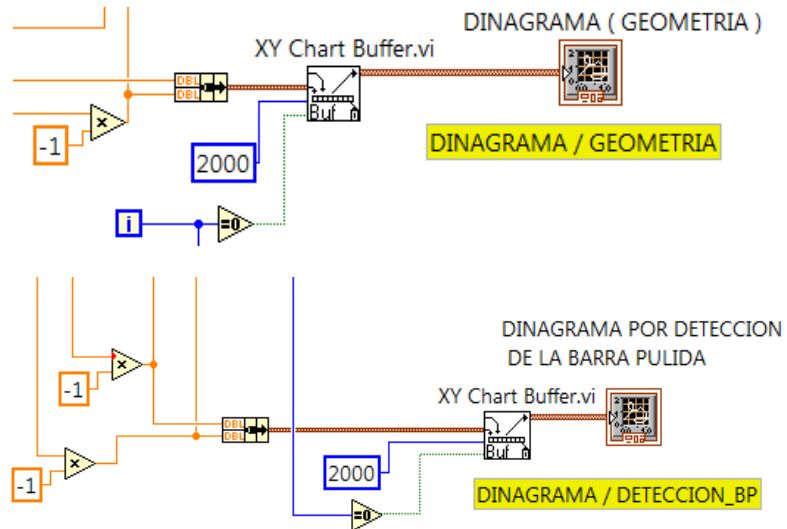


Figura 48: Dinagrama de superficie teniendo en cuenta la geometría y la detección de la barra pulida.

Capítulo 5

5. Visualización y registro de las variables presentes en el proceso para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción

Teniendo en cuenta el proceso para determinar el dinagrama de superficie en una unidad de bombeo mecánico y la simulación del mismo en el entorno de programación grafica de LabVIEW, se realiza la generación de reportes gráficos de cada una de las variables existentes en el proceso. Estos reportes son generados con la ayuda de NI DIADEM, este es un software de gestión y procesamiento de datos para análisis, visualización y presentación de informes. El subVI utilizado para la generación de reportes gráficos se muestra en la figura 49.

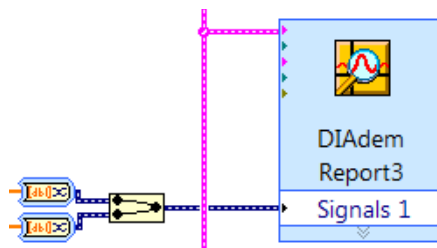


Figura 49: SubVi para la generación de reportes gráficos.

5.1 Visualización de variables de interés

Todos los diagramas de bloques presentados en el capítulo 4, relacionados con el proceso para determinar el dinagrama de superficie pueden ser visualizados en la interfaz gráfica de LabVIEW. En el panel frontal pueden ser observadas de forma dinámica todas las señales adquiridas y las variables presentes en el proceso.

La figura 50, ilustra el proceso dinámico para determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción. Además, es posible observar por separado cada una de las variables de interés.

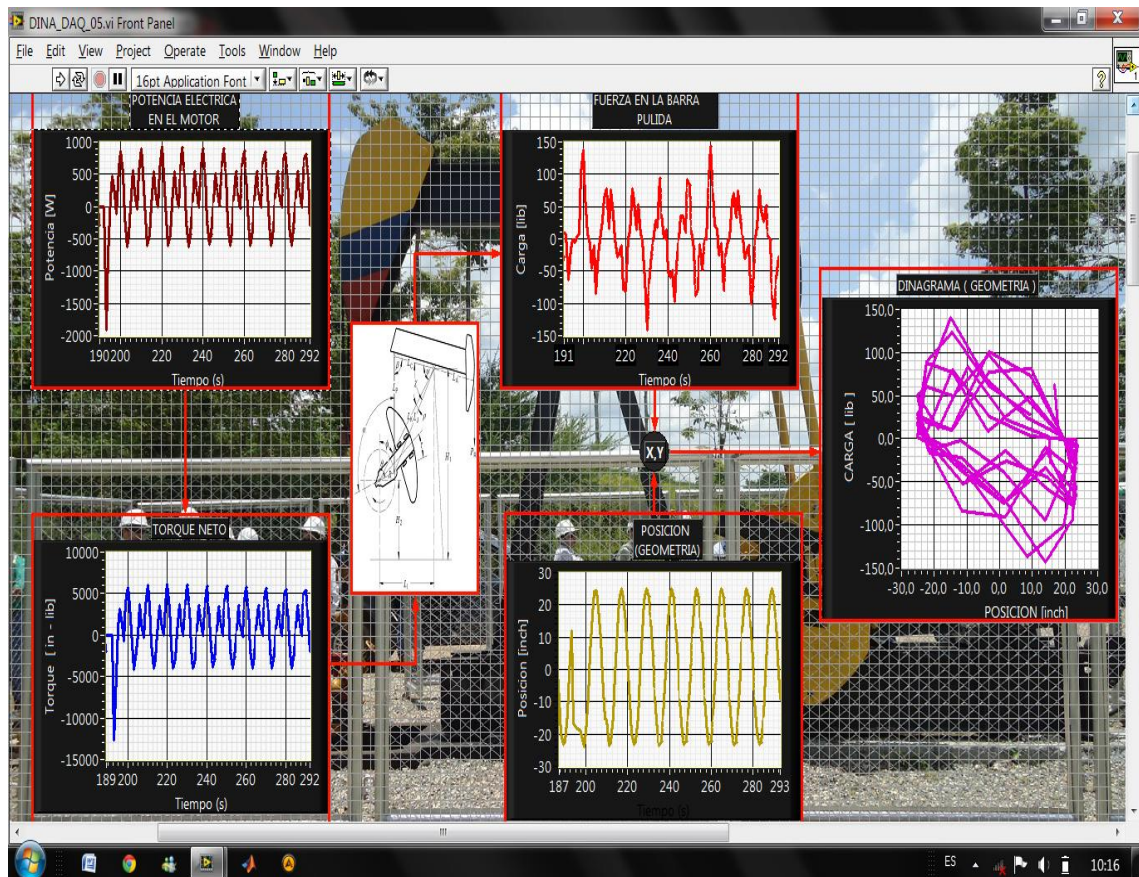


Figura 50: Visualización dinámica del proceso.

También es posible visualizar en tiempo real los voltajes de línea adquiridos, corrientes de línea adquiridas, y potencias eléctricas promedio, calculadas por cada línea como se muestra en las figuras 51, 52 y 53.



Figura 51: Visualización de los voltajes y corrientes de línea.

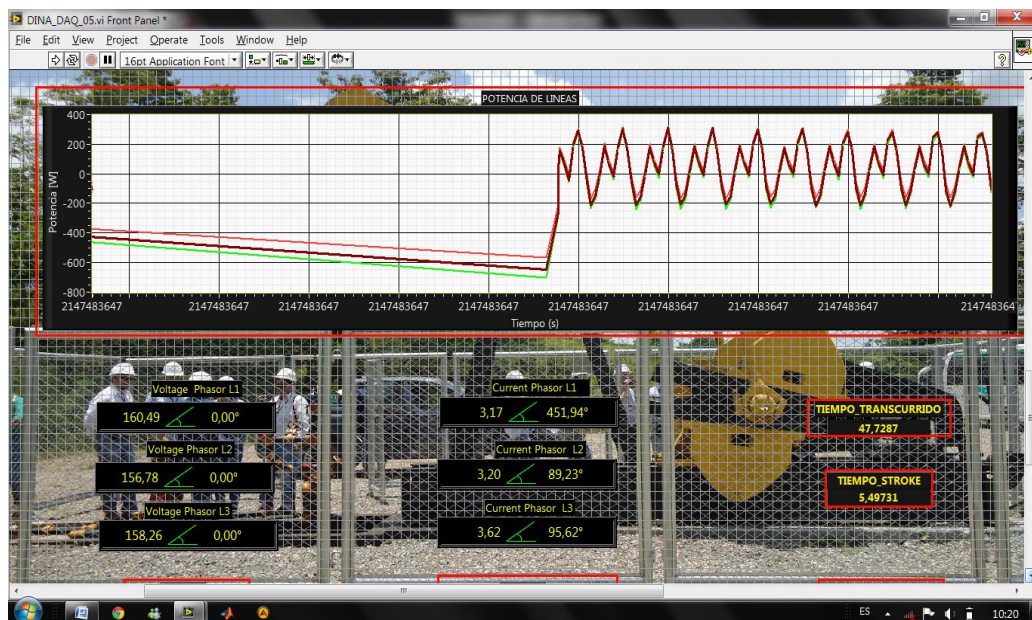


Figura 52: Visualización de las potencias promedio de línea.

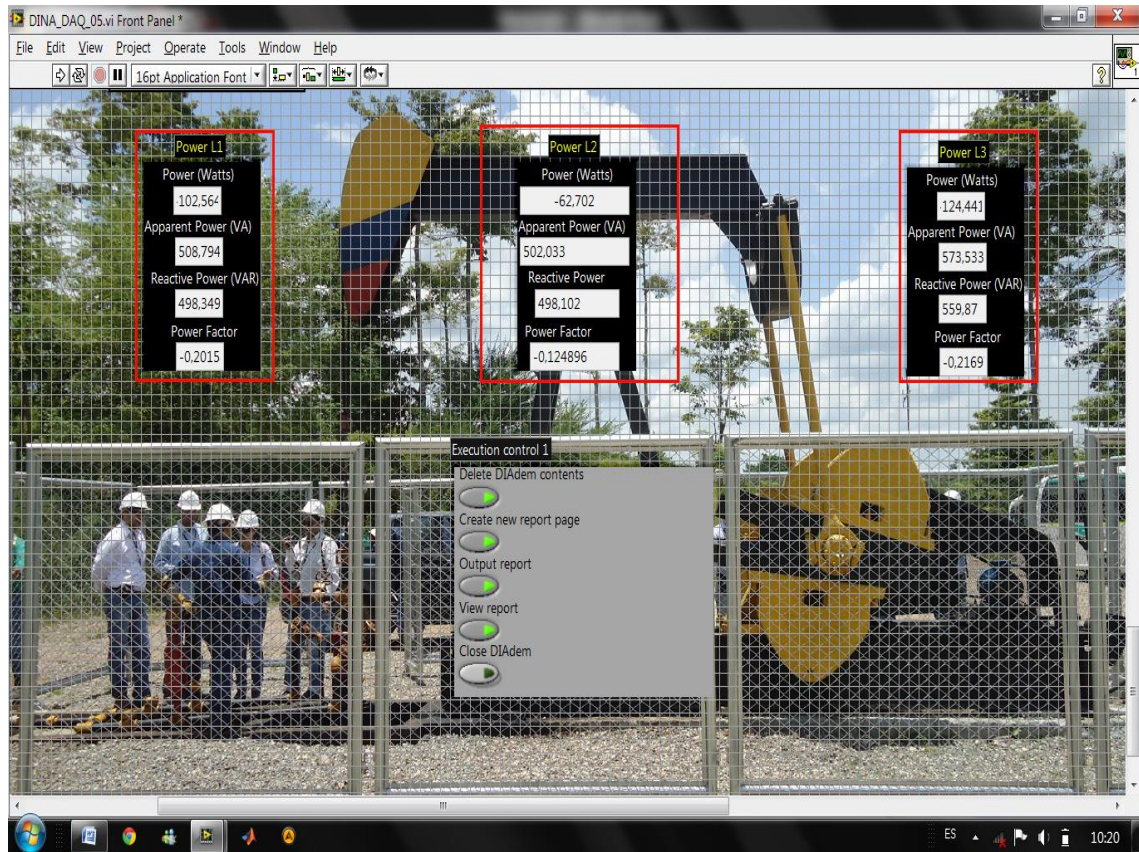


Figura 53: Visualización de valores de potencia promedio.

5.2 Registro de voltajes y corrientes de línea

Los voltajes de línea aplicados al motor de inducción son de 622.254 V pico o 440 V rms aproximadamente. En la figura 55, se aprecian el registro de los voltajes de cada línea. Estos voltajes se mantienen con amplitud y frecuencia constante, pero están desfasados 120 grados entre sí.

Las corrientes de línea aplicadas al motor de inducción, varían en amplitud y fase dependiendo de la posición de la barra pulida, ya que la máquina de inducción puede operar como motor o como generador. En la figura 55, se observa que la

frecuencia de la corriente se mantiene y se presenta variación en amplitud pero no es posible apreciar el cambio de fase.

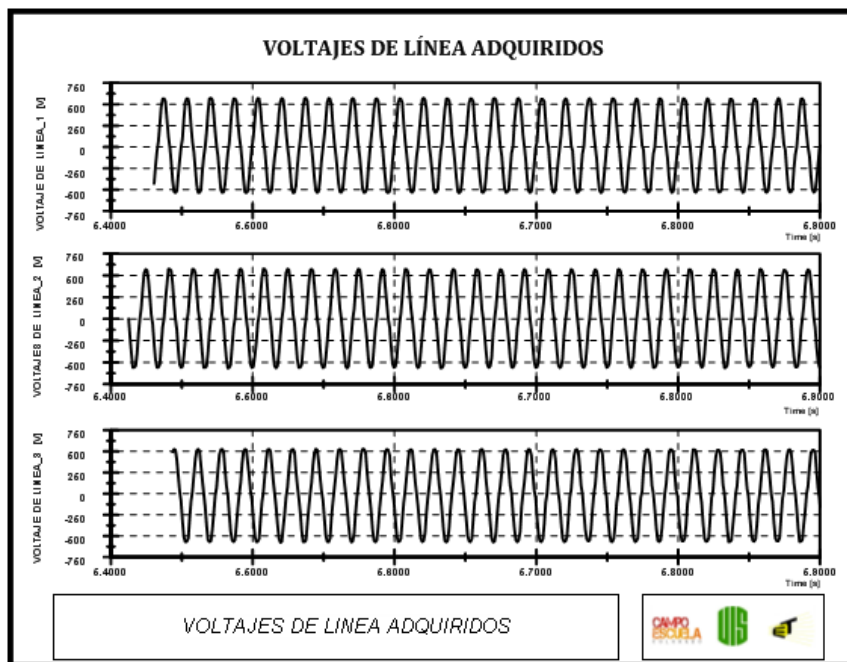


Figura 54: Registro de los voltajes de línea adquiridos.

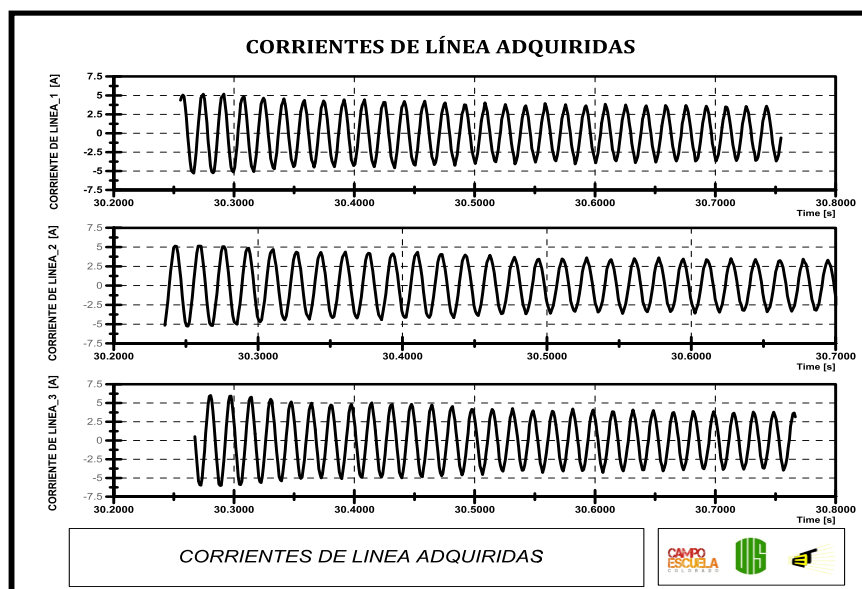


Figura 55: Registro de las corrientes de línea adquiridas.

5.3 Registro de las potencias promedio de línea consumidas por el motor de inducción

Las potencias promedio de cada línea (figura 56) son aproximadamente iguales. Estas se calculan partiendo de los valores de voltajes y corrientes de línea adquiridas. Y sus valores oscilan entre 300 W y -200 W aproximadamente.

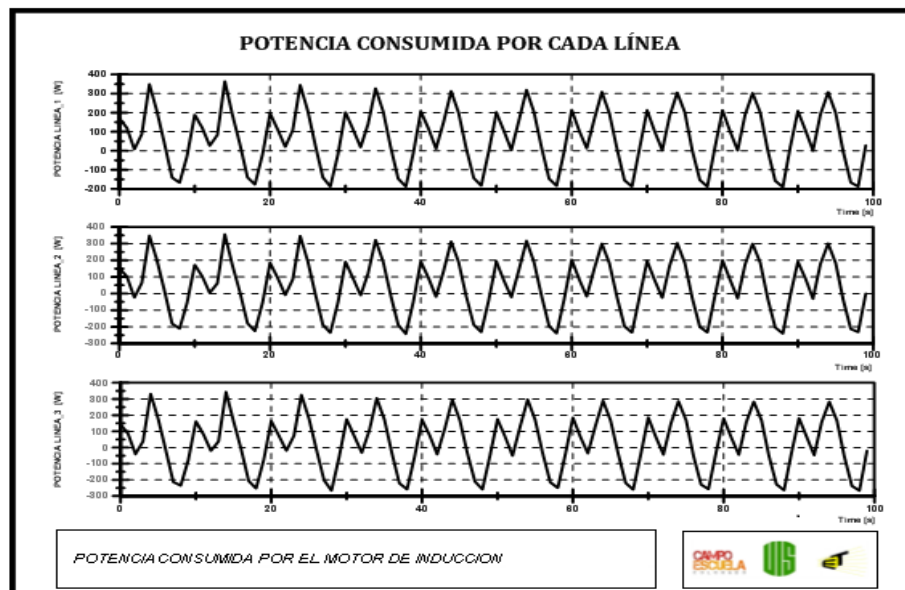


Figura 56: Registro de las potencias promedio de línea.

5.4 Registro de la potencia promedio trifásica consumida por el motor de inducción

La potencia promedio trifásica consumida por el motor de inducción, se obtiene al sumar las potencias por cada línea y tiene un comportamiento cíclico que depende del recorrido de la barra lisa. En la parte inferior de la figura 57, es posible observar lo mencionado anteriormente y además, se aprecian valores positivos y negativos indicando el estado de operación como motor o como generador.

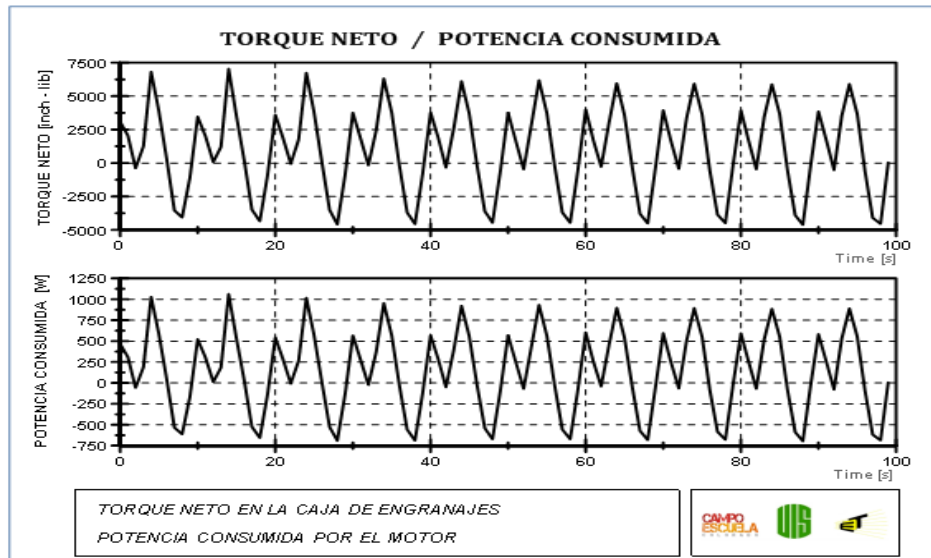


Figura 57: Registro de potencia promedio trifásica y el torque neto en la caja de engranajes.

5.5 Registro del torque neto en la caja de engranajes

El torque neto en la caja de engranajes, depende de la relación proporcional con la potencia promedio trifásica consumida por el motor de inducción. En la parte superior de la figura 57, se muestra que el torque neto es proporcional a la potencia promedio trifásica y tiene valores que oscilan entre 7500 in.lb y -400 in.lb

5.6 Registro de la posición de la barra pulida

En el capítulo 2, se describen dos formas para determinar la posición de la barra pulida. Uno de los métodos es mediante la detección mediante video de un patrón de color presente en la barra lisa de la unidad de bombeo. Al realizar las pruebas en campo, se determinó que la cámara usada no era la adecuada para detectar dicha posición, debido a condiciones de distancia entre el punto de medición de datos y la unidad de bombeo, ya que los datos fueron adquiridos cerca a la caja de

alimentación del motor de inducción. Además de la distancia de 30 metros aproximadamente, también afecto las condiciones de luz en la detección de la barra pulida.

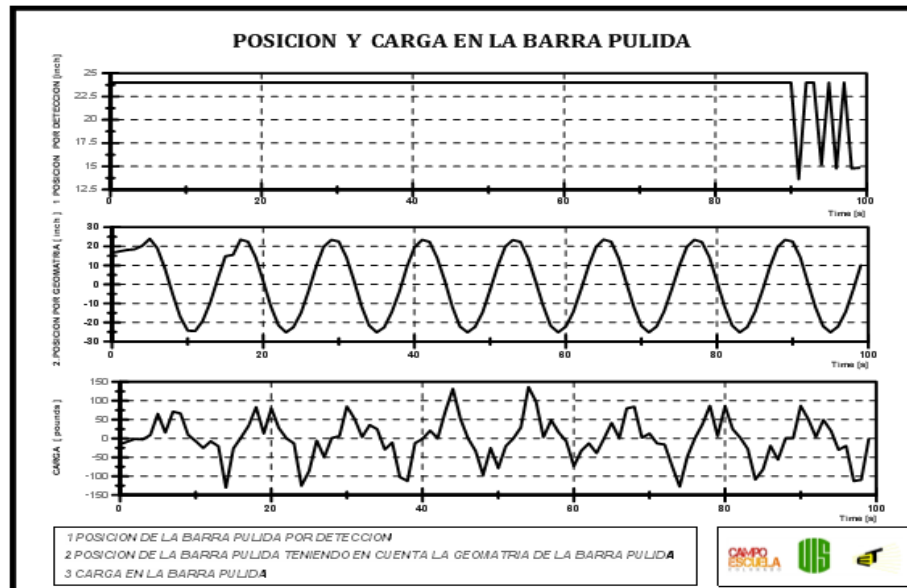


Figura 58: Registro de la potencia promedio trifásica y la carga en la barra pulida.

En la parte superior de la figura 58, se puede apreciar que la detección de la barra pulida mediante video no fue posible debido a lo anteriormente mencionado.

El método alternativo para determinar la posición de la barra pulida se presentó en el capítulo 2, en donde se tiene en cuenta el modelo geométrico 1. En la parte media de la figura 58, se aprecia la determinación de la posición de la barra pulida por simulación. Los valores de la posición oscilan entre 24 in y -24 (in).

5.7 Registro de fuerza en la barra pulida

La fuerza en la barra pulida se muestra en la parte inferior de la figura 58 y tiene valores que oscilan entre 1200 lb y -1200 lb. El valor obtenido de la carga en la barra pulida no es preciso, porque depende de datos que no fueron proporcionados por el fabricante y tampoco fueron proporcionados por los operadores de Campo Escuela Colorado. Los datos mencionados se refieren al valor del máximo momento de las contrapesas M y en efecto de contrabalance CBE explicados en el capítulo 1.

Además, el valor de la fuerza en la barra pulida depende directamente de la potencia promedio adquirida. Al tener un error de medida en las tensiones de línea se ve afectado el valor de la potencia promedio trifásica, por ende este error se refleja en los valores de fuerza determinados en la barra pulida.

5.8 Registro del dinagrama de superficie

El dinagrama de superficie mostrado en la figura 59, es el objetivo de este trabajo de investigación. Este depende de los valores de la fuerza y posición de la barra pulida. EL gráfico mostrado, no es preciso debido a que algunos datos no fueron proporcionados por el fabricante de la unidad de bombeo y errores en el cálculo de la potencia promedio trifásica. Por lo tanto se obtiene un dinagrama que está dentro de los límites mostrados en la figura 20, del dinagrama de superficie tomado con el analizador de pozos TWM.

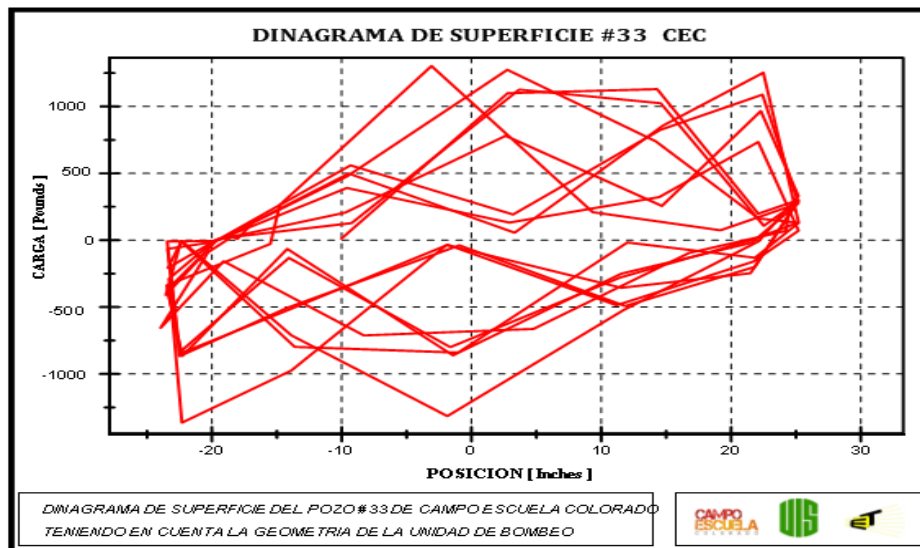


Figura 59: Registro del dinagrama de superficie a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción.

Capítulo 6

6. Conclusiones

El proceso propuesto para determinar el dinagrama de superficie en un sistema de bombeo convencional, plantea las bases teóricas para analizar y optimizar la extracción de crudo en Campo Escuela Colorado.

En este trabajo de investigación, se presenta la primera versión de un sistema que permite determinar el dinagrama de superficie a partir de la potencia consumida por el motor de inducción, pero teniendo en cuenta la falta de datos estructurales, errores de medición de voltaje y el cálculo de la potencia promedio trifásica.

El dinagrama de superficie calculado con el proceso propuesto en este trabajo de investigación, requiere los datos del máximo momento en las contrapesas, el máximo momento en la manivela y el efecto de contrabalance, para obtener un mejor resultado de medición, ya que no se disponen de estos datos en campo.

El proceso propuesto para determinar el dinagrama de superficie en el pozo 33 de campo colorado, no incluye la presencia del variador de velocidad en el sistema de bombeo convencional, ya que la medición de potencia consumida por el motor de inducción requiere un análisis más complejo y el mejoramiento del sistema de adquisición de datos.

Para mejorar el proceso propuesto de generación del dinagrama de superficie, es necesario realizar un análisis profundo de cada una de las variables involucradas.

La idea de implementar un hardware surgió de la necesidad de medir las variables eléctricas instantáneas, debido a que la universidad no contó con un dispositivo que pueda sensor dichas variables en este proyecto.

Al inicio de la investigación se estudió el modelo del motor de inducción en estado dinámico con ayuda de Matlab, pero debido a la complejidad de modelar el torque o velocidad en el eje del motor, se decidió enfocar el proceso en otra dirección.

La culminación de este trabajo se debe en gran parte al proceso presentado en la patente denominada “System and Method for Optimizing Production From A Rod-Pumping System”.

En el proceso de investigación se presentó inconvenientes ambientales y logísticos para realizar pruebas, ya que solo fue posible realizar una visita a Campo Escuela Colorado para hacer las mediciones respectivas.

Se realizaron pruebas en el laboratorio de maquinas eléctricas, para examinar el correcto funcionamiento y calibración del dispositivo implementado, en condiciones de voltaje y corriente de entrada controladas, pero teniendo en cuenta que el comportamiento del motor de inducción no es igual al estar acoplado a una unidad de bombeo mecánico de crudo.

El motor de inducción utilizado en el pozo 33 de Campo Escuela Colorado, tiene conectado el estator en configuración delta y su funcionamiento es en estado dinámico, lo que dificulta la medición de las corrientes de fase, debido a que estas corrientes no son sinusoidales puras, en este caso no se pueden aplicar las respectivas expresiones matemáticas utilizadas comúnmente para calcular corrientes de fase en circuitos trifásicos.

A raíz de que no se puede determinar fácilmente el escalamiento y el desfase al pasar de corriente de línea a corriente de fase, se opta por calcular la potencia monofásica con la corriente de línea y voltaje de línea medidos con el hardware implementado.

Determinar la posición de la barra pulida por medio de video no fue posible a causa de varias circunstancias tales como: la distancia de separación de aproximadamente 30 metros entre la caja de distribución eléctrica donde se conecta el dispositivo diseñado y la unidad de bombeo, la no disponibilidad de un cable de esa longitud para adaptar la cámara, y las variaciones en las condiciones de luz en el pozo.

Se presentan imprecisiones en simulación de las tensiones de línea obtenidas de la salida del circuito de sensado de tensión, debido al escalamiento realizado en software.

Los escalamientos en software son muy grandes, entonces una caída de tensión pequeña en el circuito de sensado de tensión representaría una pérdida considerable en la tensión de salida de este mismo circuito.

Las imprecisiones de medición de tensión afectan directamente la potencia eléctrica consumida por el motor de inducción, lo cual afecta todo el proceso para determinar el dinagrama de superficie.

Solo es posible utilizar el modelo matemático para el cálculo de la posición de la barra pulida programado en LabVIEW, en condiciones normales de funcionamiento en la unidad de bombeo, si por alguna razón se detuviera esta, el

software seguiría haciendo cálculos, entonces no sería factible este proceso, lo que indica que es mejor medir directamente la posición de la barra pulida.

El sistema implementado para calcular la potencia promedio trifásica, entrega mediciones aproximadas a las reales pero bajo las condiciones de voltaje de 440 V rms y variaciones de corriente hasta de 45 A rms, aplicados al motor instalado en la unidad de bombeo del pozo 33 de Campo Escuela Colorado, ya que los valores de corrientes y tensiones adquiridos por el sistema son aproximadamente iguales a los valores reales.

Capítulo 7

7. Observaciones

El error en la medición de los voltajes de línea instantáneos disminuye al aumentar la amplitud pico sinusoidal de entrada al circuito de sensado de tensión. Esto indica que para una tensión de línea 440 V rms disminuye el error en el cálculo de la potencia promedio trifásica.

La salida del circuito de sensado de tensión no debe exceder los 10 V pico de acuerdo al rango de entrada de los terminales analógicos de la tarjeta NI USB 6009, entonces este sería el valor máximo de tensión de la región lineal anteriormente mencionada.

Para calcular la potencia eléctrica instantánea trifásica como la suma de las tres potencias monofásicas instantáneas, se debe encontrar una alternativa para estimar la corriente de fase en los devanados del estator del motor de inducción que están conectados en delta. Como el voltaje de fase es igual al voltaje de línea, no existe inconveniente alguno para las tensiones.

Utilizar optoacopladores lineales.

El hardware de sensado y adquisición puede ser reducido en tamaño al utilizar dispositivos electrónicos de tipo superficial.

Por medio de la utilización de cámaras inalámbricas se plantea la posibilidad de continuar con la detección de la posición de la barra pulida.

Para sintonizar a un valor específico las magnitudes de las tensiones de salida en la etapa de sensado de tensión, se puede utilizar resistencias variables de pequeño valor en serie con la resistencia de emisor del optoacoplador.

Para arreglar el desfase de 180 grados entre la señal de entrada de 440 V rms y la señal de salida del sensado de tensión, solo se debe cambiar la señales de entrada del INA117KU invirtiendo los puntos de conexión a este, por lo que cambiaría el circuito impreso.

Para obtener una medición de potencia eléctrica instantánea más precisa se debe diseñar un mejor proceso de sensado de tensión, que pueda superar los inconvenientes presentados en el circuito propuesto.

Con la ecuación del torque neto en la caja de engranajes es posible determinar el torque en el eje del motor. Este parámetro puede ingresarse como una señal al bloque de la máquina asíncrona en Matlab, pero teniendo en cuenta que este modelo tiene conectado internamente el estator y el rotor en estrella.

Capítulo 8

8. Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones tienen un orden secuencial según el proceso planteado en este trabajo de investigación, para determinar el dinagrama de superficie en una unidad de bombeo convencional instalada en el pozo 33 de Campo Colorado.

1. Tomar dos dinagramas de superficie en el pozo 33 como patrones de referencia por medio del TWM de ECHOMETER, con el fin de observar la diferencia entre; cuando el motor está conectado directamente a la caja de distribución, y otro, cuando está presente el variador de velocidad.
2. Estudiar el proceso para determinar el dinagrama de superficie presentado en la patente “System and Method for Optimizing Production From A Rod-Pumping System”.
3. Investigar o plantear un modelo geométrico que describa en su totalidad la dinámica de la unidad de bombeo mecánico instalada en el pozo 33.
4. Verificar y corroborar las especificaciones y dimensiones de la unidad de bombeo instalada en el pozo 33, ya que esta puede estar conformada por partes de otras unidades, cambiando así el dinagrama de superficie.
5. Determinar el efecto de contrabalance, teniendo en cuenta la prueba descrita en el seminario de investigación denominado “Estudio de las

variables involucradas en los sistemas de bombeo mecánico para el diseño control y optimización de pozos en Campo Colorado”, o proponer otra alternativa para encontrarlo.

6. Realizar un análisis más profundo de la eficiencia presente en la ecuación del torque neto en la caja de engranajes presentada en la patente System and Method for Optimizing Production From A Rod-Pumping System” para obtener un valor de torque más aproximado al real.
7. Estudiar la medición de potencia eléctrica presentada en el artículo “Simplified Computer-Aided Analysis of Electrical Current in Motors Used for Beam Pumping Systems”.
8. Plantear un nuevo diseño para la medición de voltaje instantáneo en el dispositivo de adquisición de variables eléctricas instantáneas planteado en este seminario de investigación.
9. Sensar la posición de la barra pulida, para determinar el ángulo en la manivela y con este ángulo hallar la fuerza en la barra pulida con el modelo geométrico investigado o planteado que describa la dinámica de la unidad de bombeo.
10. Investigar el número de muestras y el tiempo de muestreo ideal para determinar un dinagrama de superficie que pueda ser comparable con el patrón de referencia.

Bibliografía

- [1] Vázquez Manuel, Fernández José. “System and Method for Optimizing Production From A Rod-Pumping System” Patent US 6,343,656 B1, Feb 5, 2002.
- [2] Vázquez Manuel, and Fernández José. PDVSA Servicios, SPE 52214, “Rod-Pumping Optimization Through Surface and Downhole Parameter Estimation and Simulation”.
- [3] McCoy J, SPE 37499 (1997). “ Motor Power/Current Measurement for Improving Rod Pump Efficiencies ”.
- [4] McCoy J, SPE 25447 (1993). “Simplified Computer-Aided Analysis of Electrical Current in Motors Used For Beam Pumping Systems”.
- [5] Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill Company, 3ra edition, 2000.
- [6] Torrado Diego A, Díaz Fernando, Villamizar Jefferson G, Buitrago Jorge H, Aguilar Luis A. “Seminario de Investigación: Estudio de las Variables Involucradas en los Sistemas de Bombeo Mecánico para el Diseño, Control y Optimización de Pozos en Campo Colorado”. Bucaramanga, 2011. Pregrado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.
- [7] Wang.G, Rahman.S and Yang.G. 9b-6 (1992). ”An Improved Model For the Sucker Rod Pumping System”.
- [8] Díaz José E, Sanabria Francisco. “Metodología Para La Especificación del Motor Empleado En El Sistema De Bombeo Mecánico De Crudo”. Bucaramanga.2010.Trabajo de Grado en Investigación para optar por el título de Ingeniero Electricista, Universidad Industrial De Santander.
- [9] <http://craig.backfire.ca/pages/autos/horsepower>
- [10] Catalog General. Lufkin, 2008/2009.



[11] Echometer Company. Well Analyzer and TWM Software. Operating manual. Texas USA.

[12] User Guide and Specifications NI USB-6008/6009.

[13] Krause Paul C. "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems". IEEE Power Engineering Society, 2ra edition.



Universidad
Industrial de
Santander

CAMPO
ESCUELA
C O L O R A D O



Anexos

ANEXO A

ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

La investigación comienza con el estudio del motor de inducción en estado dinámico con el propósito de determinar el comportamiento de este, ante cargas variables proporcionadas por la unidad de bombeo mecánico, y así encontrar una metodología para generar el dinagrama de superficie, a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor.

El estudio se concentra en el circuito equivalente del modelo dinámico de la máquina de inducción presentado en [13], con su respectiva transformación, para determinar las ecuaciones eléctricas que rigen dicho modelo, teniendo presente los transitorios en el momento de arranque.

Posteriormente se demuestran principios por simulación con el bloque de Asynchronous Machine encontrado en el programa de Simulink de Matlab, con el ingreso de diferentes parámetros tomados de [13], que caracterizan un motor de 10 HP que está conectado en estrella tanto en el estator como en el rotor.

Inductancias de los devanados y ecuaciones de voltaje.

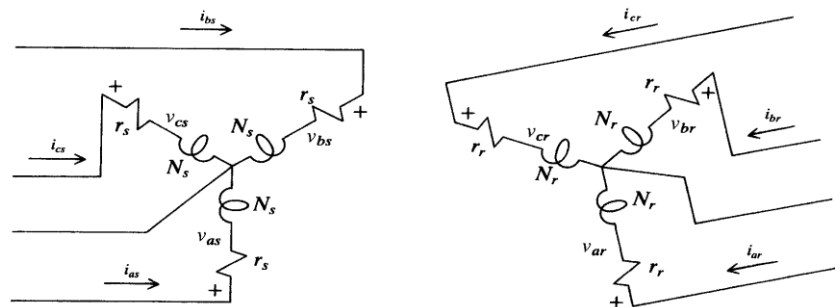


Figura 60: Devanados de la Máquina de inducción de 2 polos, 3 fases y conectada en estrella, presentado en [13].

Los devanados del estator son idénticos y tienen el mismo número de vueltas N_s y la misma resistencia R_s .

El rotor jaula de ardilla puede aproximarse a un rotor con devanados idénticos con igual número de vueltas N_r y el mismo valor de resistencia R_r .

Todas las auto-inductancias del estator son iguales, es decir:

$$L_{aSaS} = L_{bSbS} = L_{cScS}$$

Teniendo en cuenta que la auto-inductancia de los devanados del estator son iguales a la suma de la inductancia de dispersión y la inductancia de magnetización del estator. Tenemos:

$$L_{aSaS} = L_{lS} + L_{mS}$$

Donde L_{mS} puede ser expresada como:

$$L_{mS} = \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g}$$

N_s = Número de vueltas del devanado del estator.

μ_0 = Permeabilidad en el entrehierro.

r = Radio medio del entrehierro.

l = Longitud axial del entrehierro.

g = Longitud uniforme del entrehierro.

Las inductancias mutuas en el estator también son iguales, entonces tenemos:

$$L_{aSbS} = -\frac{1}{2} L_{mS}$$

De la misma manera, Todas las auto-inductancias del rotor son iguales, es decir:

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr}$$

Por lo tanto, las auto-inductancias del rotor pueden ser expresadas como:

$$L_{arar} = L_r + L_{mr}$$

Donde L_r es la inductancia de dispersión del rotor y L_m es la inductancia de magnetización del rotor.

La inductancia de magnetización del rotor puede ser expresada como:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g}$$

La inductancia mutua en los devanados del rotor puede expresarse como:

$$L_{arbr} = -\frac{1}{2} L_{mr}$$

Teniendo en cuenta que las inductancias mutuas en el estator y el rotor son iguales y las auto-inductancias en el estator y el rotor también son iguales, las expresiones de las inductancias mutuas entre los devanados del estator y el rotor, pueden ser escritas como:

$$L_{aSar} = L_{Sr} \cos \theta_r$$

$$L_{aSbr} = L_{Sr} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Y finalmente

$$L_{aScr} = L_{Sr} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right)$$

Donde:

$$L_{sr} = \left(\frac{N_s}{2} \right) \left(\frac{N_r}{2} \right) \frac{\pi \mu_0 r l}{g}$$

Teniendo en cuenta las auto-inductancias y las inductancias mutuas, las ecuaciones de voltaje presentes en la ilustración 1, pueden ser expresadas.

$$v_{aS} = i_{aS} r_s + \frac{d\lambda_{aS}}{dt}$$

$$v_{ar} = i_{ar} r_r + \frac{d\lambda_{ar}}{dt}$$

$$v_{bS} = i_{bS} r_s + \frac{d\lambda_{bS}}{dt}$$

$$v_{br} = i_{br} r_r + \frac{d\lambda_{br}}{dt}$$

$$v_{cS} = i_{cS} r_s + \frac{d\lambda_{cS}}{dt}$$

$$v_{cr} = i_{cr} r_r + \frac{d\lambda_{cr}}{dt}$$

Donde r_s es la resistencia de los devanados de cada fase del estator y r_r es la resistencia de los devanados de cada fase del rotor.

De las ecuaciones de voltaje, el flujo mutuo puede ser escrito como:

$$\lambda_{aS} = L_{aSaS} i_{aS} + L_{aSbS} i_{bS} + L_{aScS} i_{cS} + L_{aSar} i_{ar} + L_{aSbr} i_{br} + L_{aScr} i_{cr}$$

Aquí se puede apreciar la complejidad de las ecuaciones de voltaje, debido a la variación del tiempo entre las inductancias mutuas de los circuitos del rotor y el estator (circuitos en movimiento relativo).

Teoría del marco de referencia

Teniendo en cuenta que algunas inductancias dependen de la velocidad del rotor, los coeficientes de las ecuaciones diferenciales de voltaje que describe el funcionamiento del motor dependen del tiempo, excepto en la condición de rotor bloqueado.

Para reducir la complejidad de las ecuaciones diferenciales es necesario realizar un cambio de variable.

R. H. Park formuló un cambio de variable de voltajes corrientes y flujos mutuos, asociados con los devanados del estator de una máquina síncrona a variables asociadas con devanados ficticios rotando con el rotor.

Refirió las variables del estator al marco de referencia fijo al rotor. Esta transformación elimina la variación en el tiempo de las inductancias presentes en las ecuaciones de voltaje de la máquina síncrona.

La variación del tiempo en las inductancias se presenta por:

- Movimiento relativo de circuitos eléctricos
- Circuitos eléctricos con reluctancia variable

Ecuaciones de transformación (Cambio De Variable)

La transformación de variables trifásicas a un marco de referencia arbitrario, se expresa en:

$$f_{qd0} = K_S f_{abc}$$

Donde:

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}]$$

$$(f_{abcS})^T = [f_{aS} \ f_{bS} \ f_{cS}]$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (40-a)$$

$$\theta = \int \omega dt \quad (40-b)$$

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

f representa cada variable, ya sea voltaje, corriente, flujo mutuo o carga eléctrica, el superíndice T es la transpuesta de la matriz y el subíndice S indica las variables y transformaciones asociadas con el circuito estacionario.

Representación del Cambio de Variable

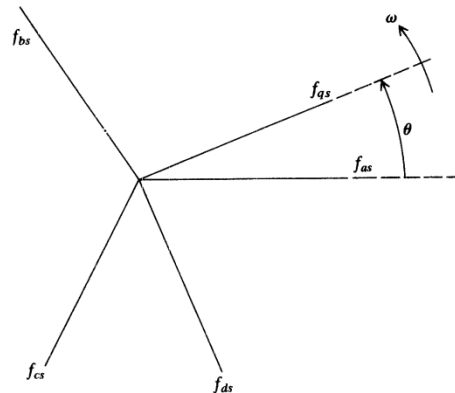


Figura 61: Transformación para el circuito estacionario representado por las relaciones trigonométricas [13].

Es conveniente visualizar la transformación de ecuaciones como una relación trigonométrica entre variables, como las mostradas en la figura 61.

Se puede pensar que f_{qs} y f_{ds} son variables a lo largo de trayectorias ortogonales rotando a una velocidad ω .

Donde f_{as} , f_{bs} y f_{cs} , pueden ser consideradas como variables a lo largo de trayectorias estacionarias desplazadas cada una por 120° .

Si f_{as} , f_{bs} y f_{cs} , son resueltas en f_{qs} , se obtiene la multiplicación por la primera fila de la matriz transformación.

Y si f_{as} , f_{bs} y f_{cs} , son resueltas en f_{ds} , se obtiene la multiplicación por la segunda fila de la matriz transformación.

Las variables f_{0s} , no son asociadas con el marco de referencia arbitrario. Estas variables se relacionan de manera aritmética con las variables a, b, c , independientemente de θ .

La dirección de las variables f_{as} , f_{bs} y f_{cs} , puede ser pensada como la dirección de los ejes magnéticos de los devanados del estator.

Generalmente las condiciones de operación, permiten seleccionar el marco de referencia más conveniente para análisis y/o propósitos de simulación.

Si los voltajes del estator son desbalanceados o discontinuos y los voltajes aplicados al rotor son balanceados o cero, el marco de referencia estacionario puede ser usado.

Si los circuitos externos del rotor son desbalanceados, pero los voltajes aplicados al estator son balanceados, entonces el marco de referencia fijo al rotor es más conveniente.

Variables del circuito estacionario transformadas al marco de referencia arbitrario.

Para una mayor comprensión de las transformaciones al marco de referencia arbitrario se pretende manejar cada elemento del sistema trifásico por separado antes de aplicar las transformaciones a las variables de los circuitos del motor de inducción.

Elementos resistivos

Si los elementos de la matriz diagonal r_s son iguales, entonces:

$$K_s r_s (K_s)^{-1} = r_s$$

Si cada fase del sistema trifásico tiene la misma resistencia, entonces la matriz de resistencia en el marco de referencia arbitrario será igual a la resistencia original.

Elementos inductivos

Similarmente como en el caso de los elementos resistivos se consideran las inductancias de cada fase del sistema trifásico iguales y al realizar la transformación del marco de referencia a la matriz L_s los valores de inductancia transformados quedan iguales a los originales.

La matriz de inductancias que describe la inductancia propia y la de magnetización de cada fase del estator del motor de inducción es de la siguiente forma.

Para un sistema simétrico, la transformación al marco de referencia arbitrario de la matriz L_s da como resultado.

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{Ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Ls} \end{bmatrix}$$

Máquinas de inducción simétricas

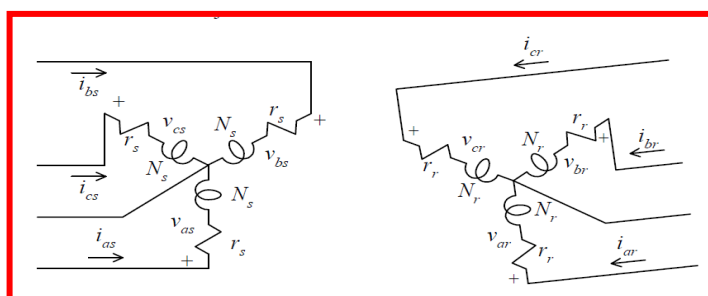


Figura 62: Máquina trifásica de inducción de dos polos conectada en Y [13].

Para este caso particular los devanados del estator son idénticos y distribuidos sinusoidalmente, desplazados 120 grados, con N_s números de vueltas equivalentes y resistencia r_s . Los devanados del rotor son iguales y distribuidos sinusoidalmente, desplazados 120 grados, N_r número de vueltas equivalentes y resistencia r_r .

Ecuaciones de transformación para circuitos del rotor

Un cambio de variable que transforme las variables trifásicas de los circuitos del rotor al marco de referencia arbitrario es:

$$f'_{qd0} = K_r f'_{abcr}$$

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \beta & \sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \theta - \theta_r$$

El desplazamiento θ que me define el marco de referencia, fue tratado en la sección anterior. Y θ_r es definido por:

$$w_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

Ecuaciones de voltaje del motor de inducción en variables del marco de referencia arbitrario

Las ecuaciones de voltaje descritas en forma desarrollada.

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \psi_{ds} + p \psi_{qs} \\
 v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \psi_{qs} + p \psi_{ds} \\
 v_{0s} &= r_s i_{0s} + p \psi_{0s} \\
 v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} + p \psi'_{qr} \\
 v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} + p \psi'_{dr} \\
 v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + p \psi'_{0r} .
 \end{aligned}$$

Expresiones para los enlaces de flujo, en forma desarrollada.

$$\begin{aligned}
 \psi_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \psi_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \psi_{0s} &= L_{ls} i_{0s} \\
 \psi'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\
 \psi'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\
 \psi'_{0r} &= L'_{lr} i'_{0r} .
 \end{aligned}$$

Circuito equivalente trifásico del motor de inducción en el marco de referencia arbitrario.

Se presenta el circuito equivalente trifásico del motor de inducción en el marco de referencia arbitrario.

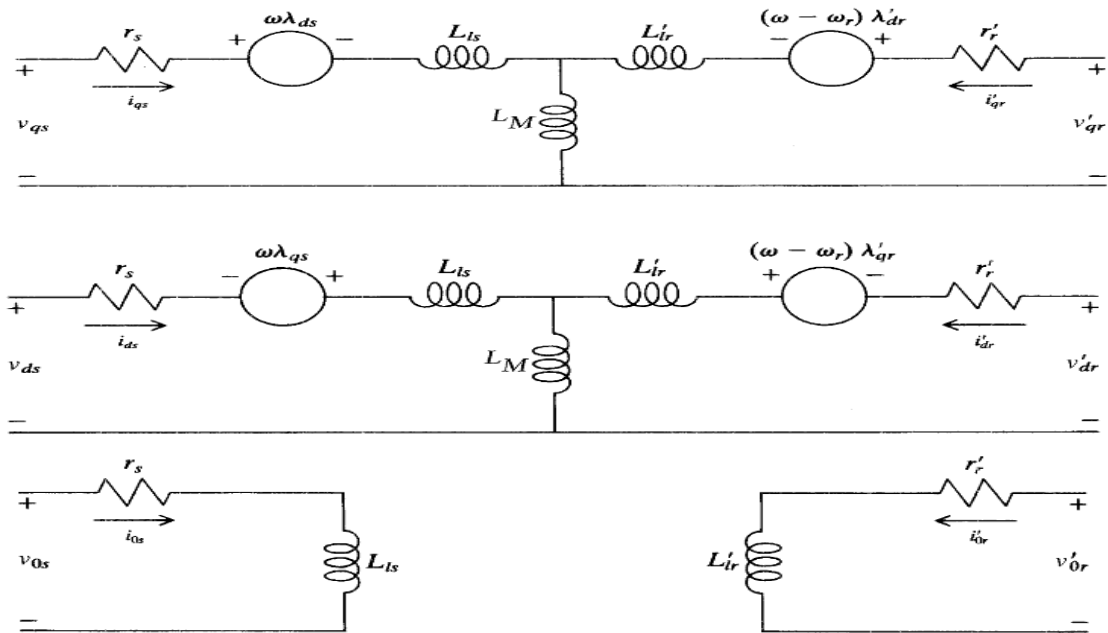


Figura 63: Circuito equivalente trifásico transformado al marco de referencia (d_{q0}) [13].

Ecuación de par en variables del marco de referencia arbitrario

Potencia de entrada instantánea, transformada al marco de transferencia arbitrario d_{q0} .

$$P_e = \frac{3}{2} (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} + 2V_{s0}i_{s0} + V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq} + 2V_{r0}i_{r0})$$

Características de aceleración libre

Se dan los parámetros de los siguientes motores:

Parámetros del motor			T_e	I_s	r_s	X_{ls}	X_M	X'_{lr}	r'_r	J
hp	V	rpm	(N·m)	(A)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(kg·m ²)
3	220	1710	11.9	5.8	0.435	0.754	26.13	0.754	0.816	0.089
50	460	1705	198	46.8	0.087	0.302	13.08	0.302	0.228	1.662
500	2300	1773	1.98×10^3	93.6	0.262	1.206	54.02	1.206	0.187	11.06
2250	2300	1786	8.9×10^3	421.2	0.029	0.226	13.04	0.226	0.022	63.87

Tabla 12: Parámetros de 4 motores de inducción [13].

- Cada motor tiene 4 polos.
- Los parámetros de reactancias se obtuvieron con un frecuencia de 60 Hz.
- El voltaje nominal es de línea a línea.
- La velocidad es a plena carga.
- J es la inercia del rotor.

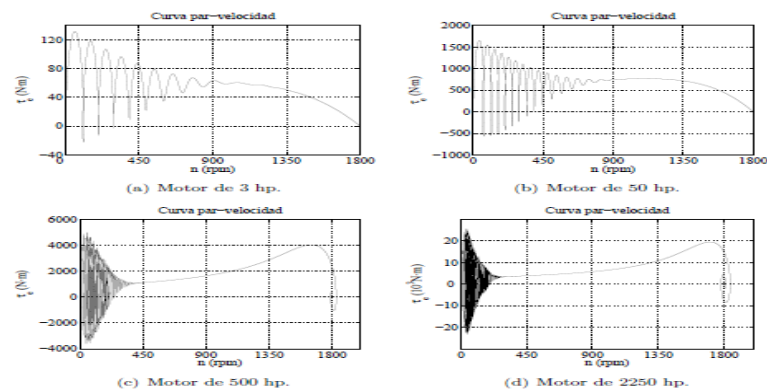


Figura 64: Curvas características de Par-Velocidad en vacío [13].

Los motores de 3 HP y 50 HP son máquinas de deslizamiento relativamente alto; esto es, su par nominal se desarrolla a velocidades considerablemente menores

que la velocidad síncrona, por otro lado, las máquinas de 500 HP y 2250 HP son máquinas de bajo deslizamiento.

Una de las diferencias entre las curvas par-velocidad dinámica y estática ocurre en el caso de los motores de 500 HP y 2250 HP. En particular, la velocidad síncrona tienen un sobretiro, y el par instantáneo y la velocidad presentan oscilaciones decrecientes alrededor del punto de operación final. Esta característica es especialmente evidente en máquinas de alta potencia. Sin embargo, los motores de 3 HP y 50 HP no les ocurre lo mismo.

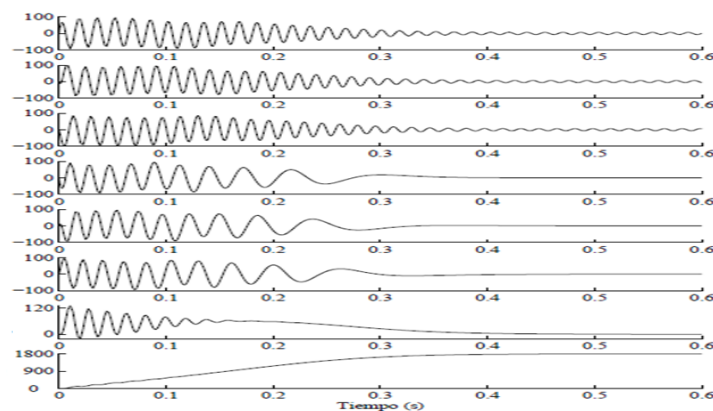


Figura 65: Variables del motor de inducción de 3 HP en vacío [13].

Características en aceleración libre vistas desde el marco de referencia fijo al rotor

Aquí la posición cero del rotor y el marco de referencia son ambos cero, por lo tanto, $f_{ar} = f_{qr}$. Y a causa de que las variables del estator son referidas al rotor, ellas varían con la frecuencia de deslizamiento.

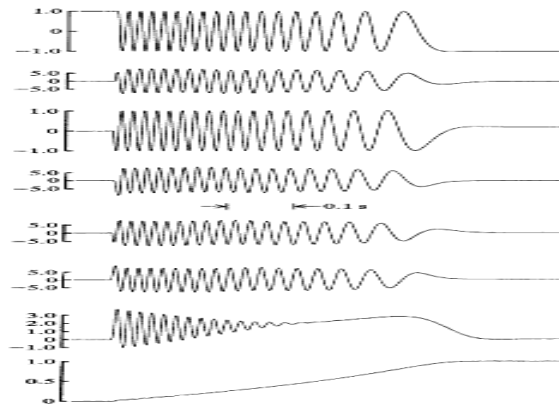


Figura 66: Características de libre aceleración para un motor de inducción de 10-HP. En el marco de referencia fijo al rotor [13].

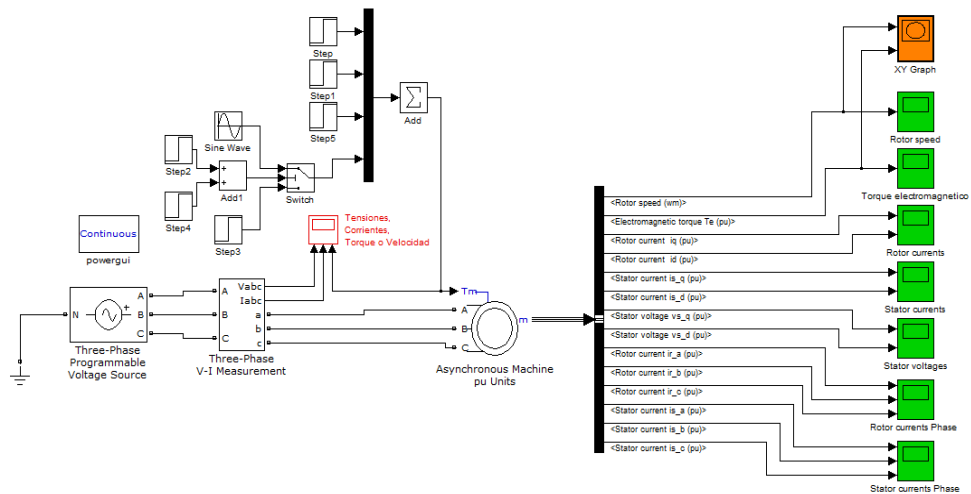


Figura 67: Esquemático del sistema en Simulink

Parámetros en simulación

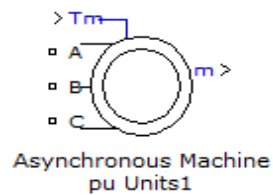


Figura 68: Bloque asynchronous machine pu Units

Configuration	Parameters	Advanced
Preset model:	No	
Mechanical input:	Torque Tm	
Rotor type:	Squirrel-cage	
Reference frame:	Rotor	
Mask units:	pu	

Preset model: Opciones de modelos establecidos de motores con diferentes características de desempeño.

Mechanical input: Puede ser torque mecánico o velocidad mecánica del rotor.

Rotor type: Puede ser rotor devanado o de jaula de ardilla.

Reference frame: Puede ser al: rotor, estacionario, síncrono.

Mask units: Valores en por unidad.

$$r_s = 0.0453$$

$$X_{ls} = 0.0775$$

$$r_r' = 0.0222$$

$$X_{lr}' = 0.0322$$

$$X_M = 2.042$$

$$H = 0.5 \quad p = 6$$

Configuration	Parameters	Advanced
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:		
[7460 220 60]		
Stator resistance and inductance [Rs,Lls] (pu):		
[0.0453 0.0775]		
Rotor resistance and inductance [Rr',Lr'] (pu):		
[0.0222 0.0322]		
Mutual inductance Lm (pu):		
2.042		
Inertia constant, friction factor and pole pairs [H(s) F(pu) p0]:		
[0.5 0 6]		
Initial conditions		
[1,0 0,0,0 0,0,0]		
<input type="checkbox"/> Simulate saturation		
Saturation Parameters [i1,i2,... (pu) ; v1,v2,...(pu)]		
9,1.4799,2.2457,3.2586,4.5763,6.4763 ; 0.5,0.7,0.9,1,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5]		

Parámetros en por unidad de motor de inducción de 10 HP [13].

H: Es la unión de la constante de inercia de carga y del rotor.

F: Es la unión del coeficiente de fricción viscoso de carga y del rotor

P: Es el número de polos de la máquina.

Inicial conditions: Especifica el deslizamiento, el ángulo eléctrico, magnitud de las corrientes en el estator en por unidad, y ángulo de desfase en grados.

[slip, th, las, lbs, lcs, Phaseas, Phasebs, Phasecs]

[1,0,0,0,0,0,0,0]

Slip: Especifica el deslizamiento de la máquina

Th: Ángulo eléctrico en grados

las: Corriente en por unidad del estator de la fase A

lbs: Corriente en por unidad del estator de la fase B

lcs: Corriente en por unidad del estator de la fase C

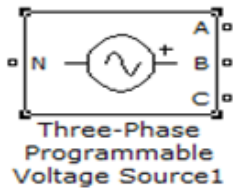


Phaseas: Ángulo en grados de la fase A

Phasebs: Ángulo en grados de la fase B

Phasecs: Ángulo en grados de la fase C

Simulate saturation: especifica si la saturación magnética del rotor y estator es simulada o no.

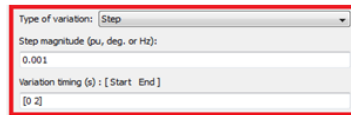


Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)]
[220 120 60]

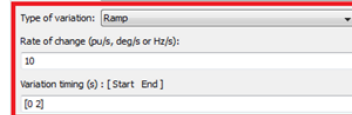
Ingreso de amplitud eficaz, fase y frecuencia de tensión de alimentación fase a fase

Time variation of:	Amplitude
	None
	Amplitude
	Phase
	Frequency

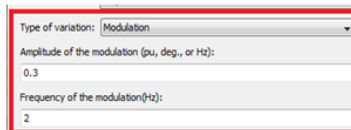
Selección de variación en el tiempo



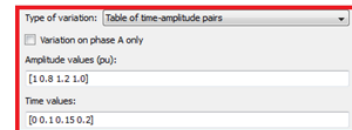
Especifique la magnitud de cambio de Step



Especifique la rata de cambio

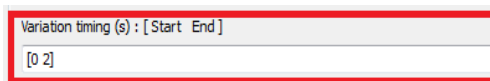


Especifique la amplitud de cambio y la frecuencia de modulación



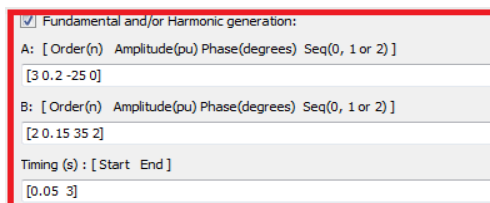
Cuando el cuadro es seleccionado solo hay variación en la fase A.

Bloque Three-Phase Programmable Voltage Source



Especifica el tiempo en segundos, cuando Time Variation of, toma efecto y cuando este se detiene.

Especifica el tiempo, en segundos, cuando la generación de armónicos está superpuesta dentro de la señal fundamental y el tiempo cuando éste se detiene.



Par de armónicos que se pueden superponer a la señal de tensión fundamental de la fuente, se especifica el orden, amplitud, fase, y secuencia: 1= secuencia positiva, 2=secuencia negativa, 0=secuencia cero. Para el orden de los armónicos y para la secuencia de 0 a 2, producen un desbalance en el voltaje de alimentación trifásico sin armónicos.

$$\begin{aligned}\Phi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\ \Phi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\ \Phi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Phi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\ L_s &= L_{ls} + L_m \\ L'_r &= L'_{lr} + L_m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\ \psi_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\ \psi_{0s} &= L_{ls} i_{0s} \\ \psi'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\ \psi'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\ \psi'_{0r} &= L'_{lr} i'_{0r}\end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - B \omega_r - T_L)$$

Comparación entre ecuaciones de Simulink y [13].

$$\begin{aligned}V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega \Phi_{ds} \\ V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \Phi'_{dr} \\ V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \Phi'_{qr}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \psi_{ds} + p \psi_{qs} \\ v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \psi_{qs} + p \psi_{ds} \\ v_{0s} &= r_s i_{0s} + p \psi_{0s} \\ v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} + p \psi'_{qr} \\ v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} + p \psi'_{dr} \\ v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + p \psi'_{0r}\end{aligned}$$

$$T_e = 1.5 p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds})$$

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m (i_{qd} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

Comparación entre ecuaciones de Simulink y [13].

Características del motor en vacío

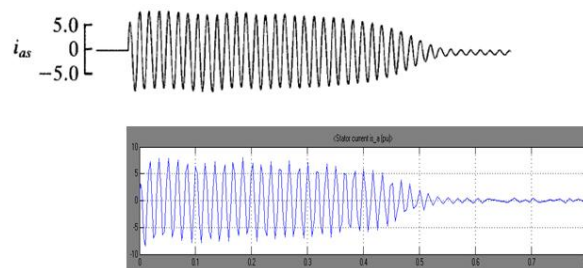


Figura 69: Corriente de fase (a) en por unidad del estator [13].

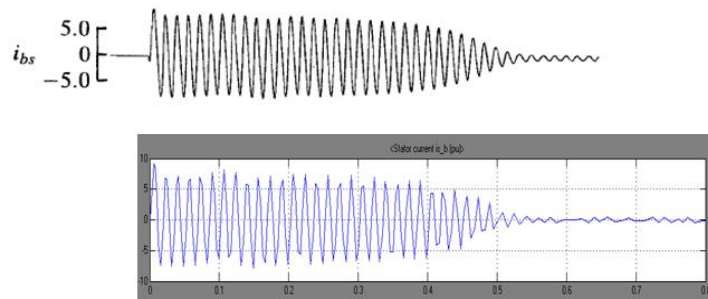


Figura 70: Corriente de fase (b) en por unidad del estator [13].

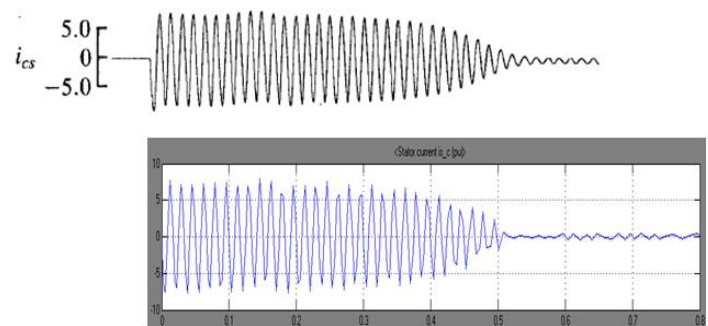


Figura 71. Corriente de fase (c) en por unidad del estator [13].

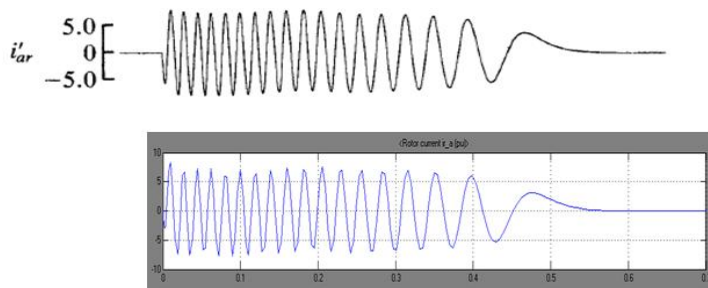


Figura 72: Corriente de fase (a) en por unidad del rotor [13].

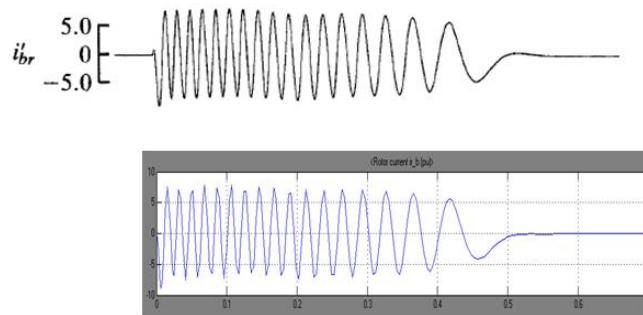


Figura 73: Corriente de fase (b) en por unidad del estator [13].

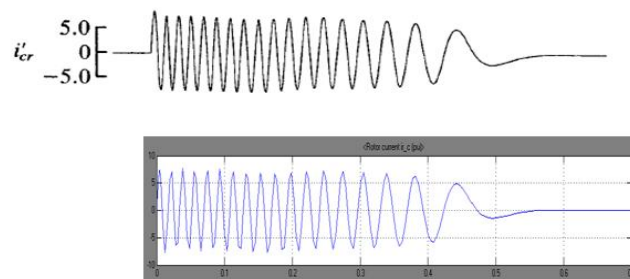


Figura 74: Corriente de fase (c) en por unidad del rotor [13].

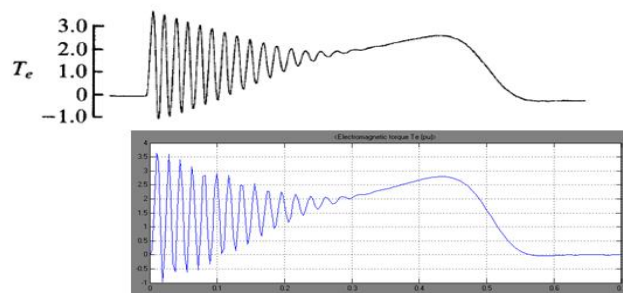


Figura 75: Torque electromagnético en por unidad [13].

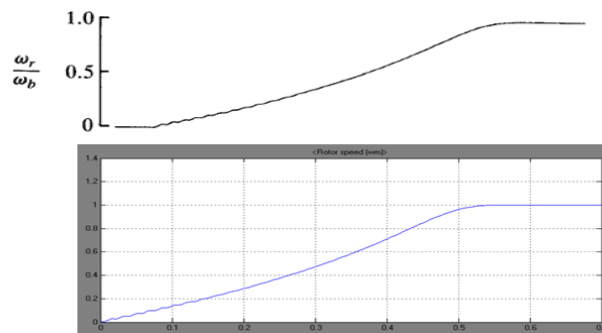


Figura 76: Velocidad en por unidad del rotor [13].

Simulación motor en vacío, marco de referencia estacionario

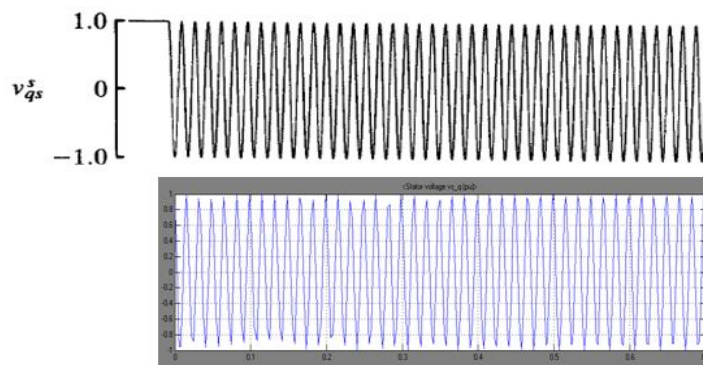


Figura 77: v_{qs}^s en por unidad del estator [13].

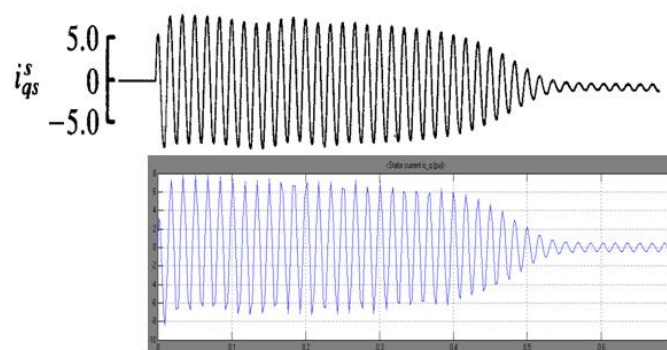


Figura 78: i_{qs}^s en por unidad del estator [13].

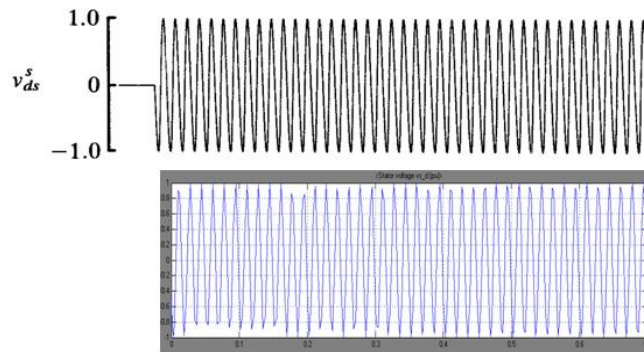


Figura 79: v_{ds} en por unidad del estator [13].

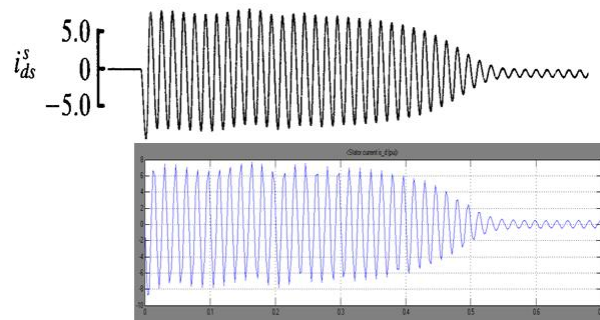


Figura 80: i_{ds} en por unidad del estator [13].

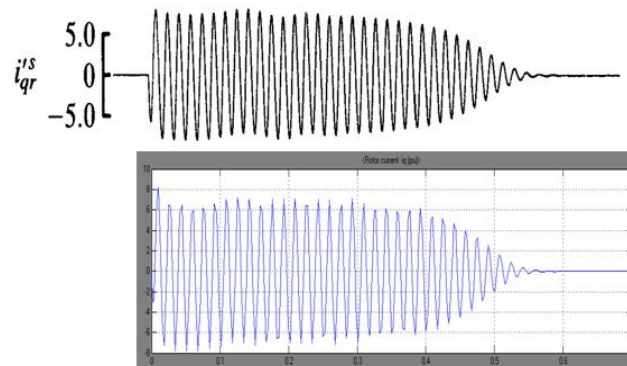


Figura 81: i_{qr} en por unidad del rotor [13].

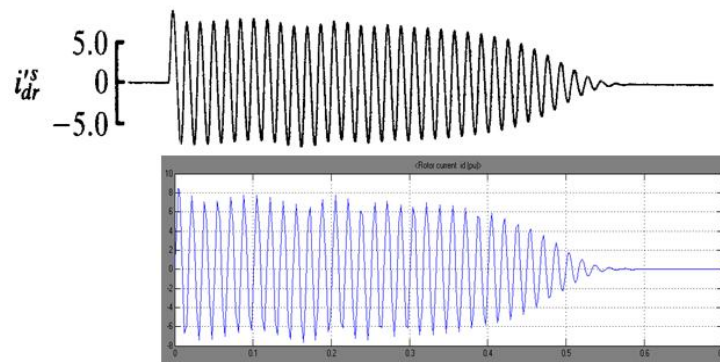


Figura 82: i_{dr} en por unidad del rotor [13].

Simulación motor en vacío, marco de referencia rotor

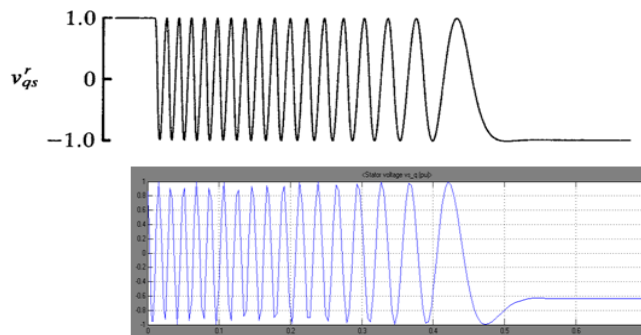


Figura 83: v_{qs} en por unidad del estator [13].

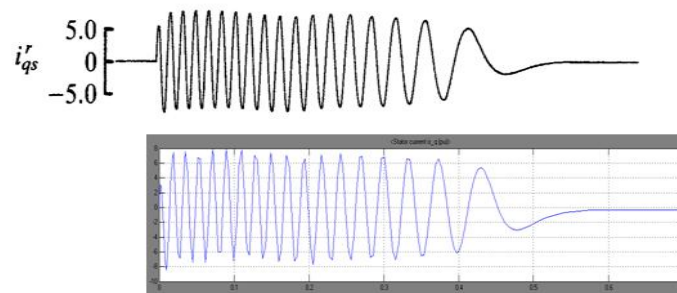


Figura 84: i_{qs} en por unidad del estator [13].

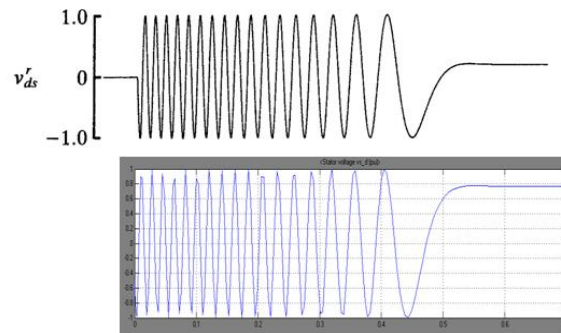


Figura 85: V_{ds} en por unidad del estator [13].

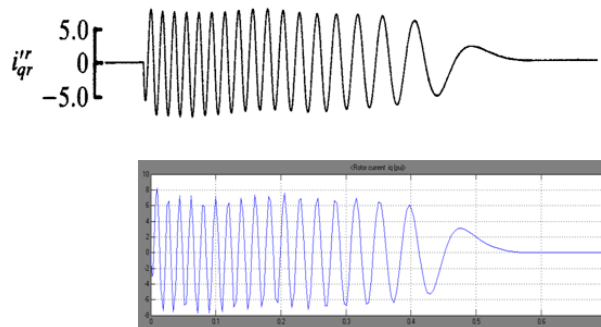


Figura 86: I_{qr} en por unidad del rotor [13].

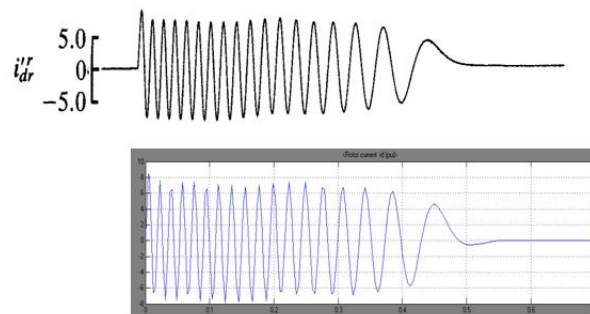


Figura 87: I_{dr} en por unidad del rotor [13].

Simulaciones adicionales marco de referencia rotor

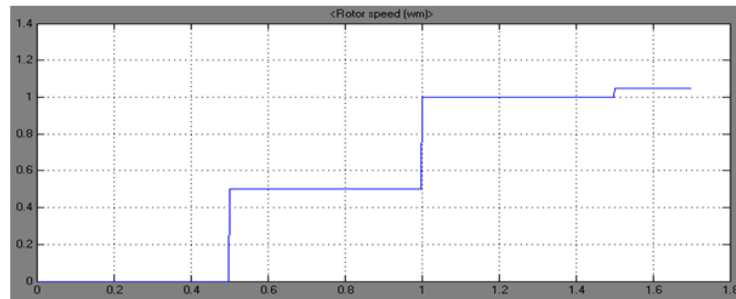


Figura 88: Entrada de Torque mecánico en por unidad del motor

Escalón inicial de magnitud 0 hasta 0.5 segundos, en 0.5 segundos sube a 0.5, en 1 segundo sube a 1 y en 1.5 segundos supera en un 5% la velocidad.

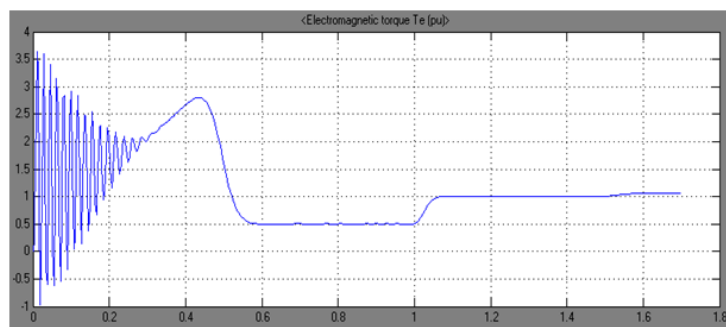


Figura 89: Torque electromagnético en por unidad

El torque electromagnético tiende a 1 desde 1 segundo, en 1.5 segundos crece levemente.

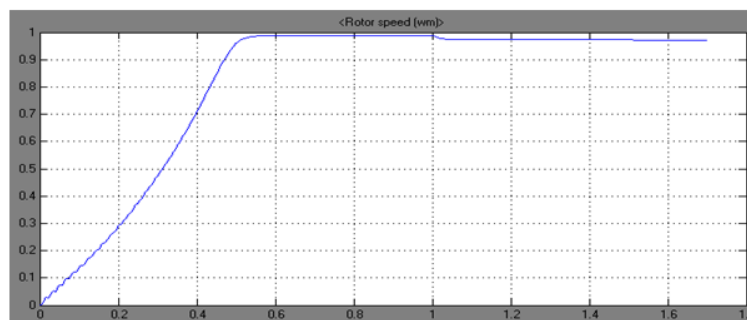


Figura 90: Velocidad del rotor en por unidad del motor

En 0.5 segundos sube a 1, en 1 segundo baja levemente 1 y en 1.5 segundos vuelve a bajar levemente.

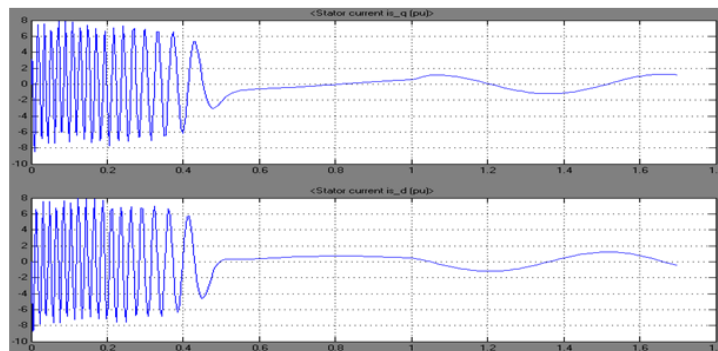


Figura 91: i_{qs} e i_{ds} respectivamente en por unidad en el estator

Las corrientes tienden a cero desde 0.5 segundo.

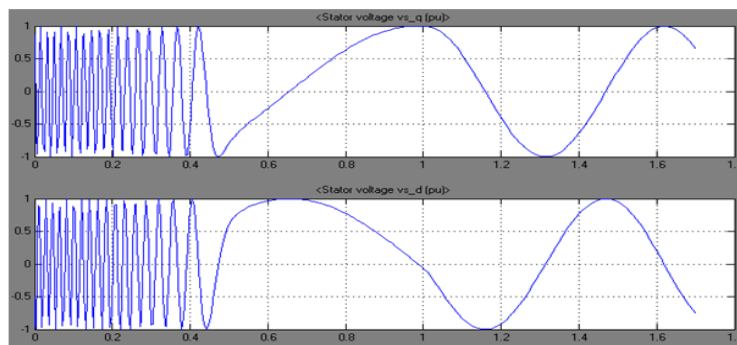


Figura 92: v_{qs} e v_{ds} respectivamente en por unidad en el estator

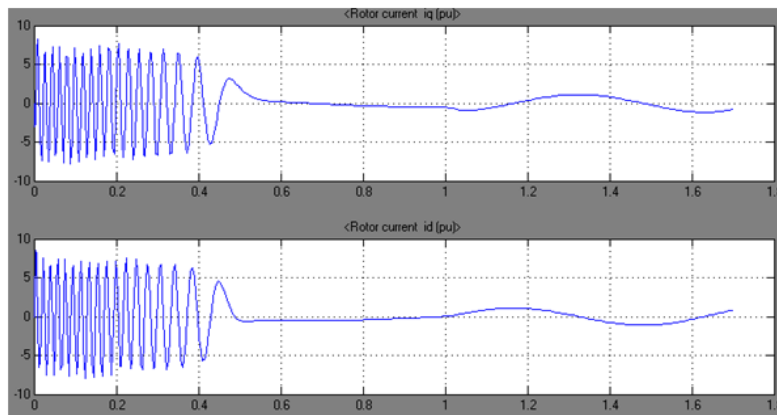


Figura 93: i_{qr} e i_{dr} respectivamente en por unidad en el rotor

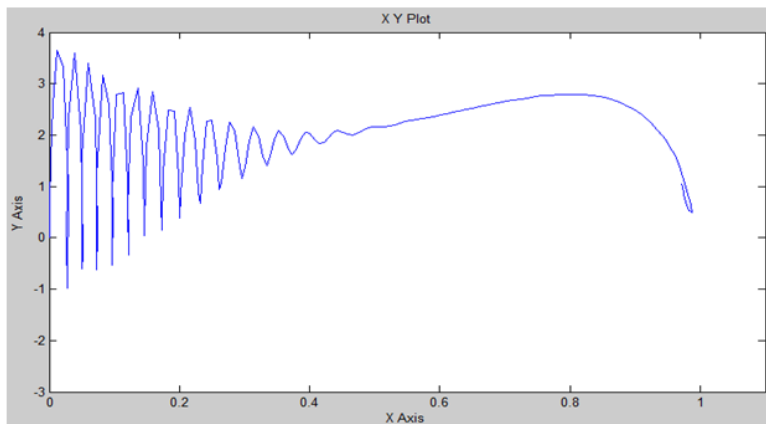


Figura 94: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor



Figura 95: Entrada de velocidad del rotor en por unidad del motor

Escalón inicial de 0 hasta 0.5 segundos, en 0.5 segundos sube a 0.5, en 1 segundo sube a 1 y en 1.5 segundos supera en un 5% la velocidad síncrona.

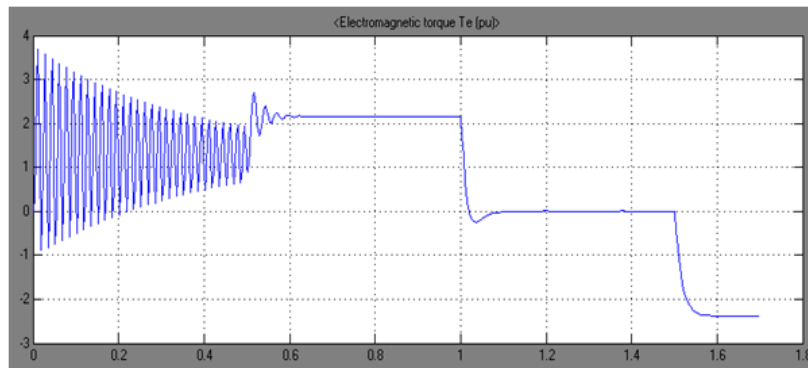


Figura 96: Torque electromagnético en por unidad

El torque electromagnético tiende a cero desde 1 segundo, en 1.5 segundos empieza a ser negativo.

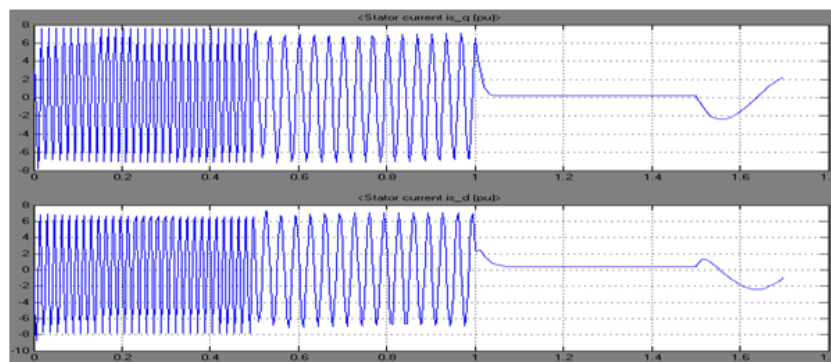


Figura 97: i_{qs} e i_{ds} respectivamente en por unidad en el estator

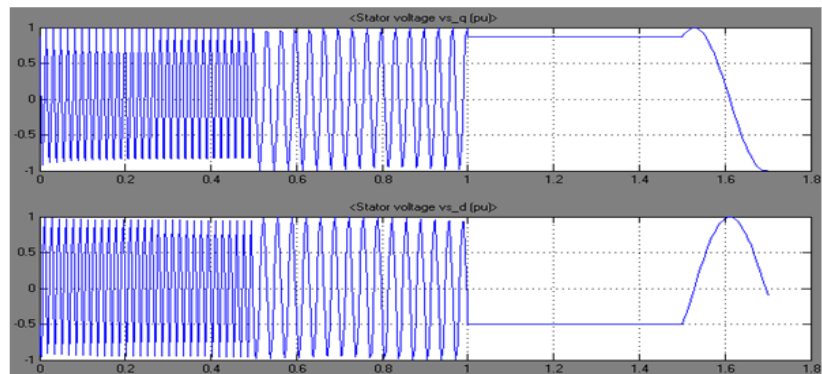


Figura 98: V_{qs} e V_{ds} respectivamente en por unidad en el estator

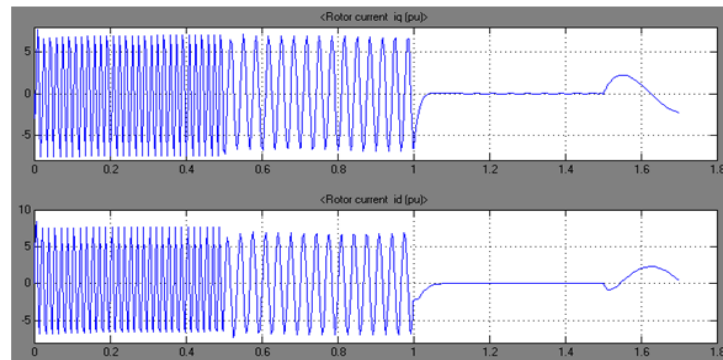


Figura 99: I_{qr} e I_{dr} respectivamente en por unidad en el rotor

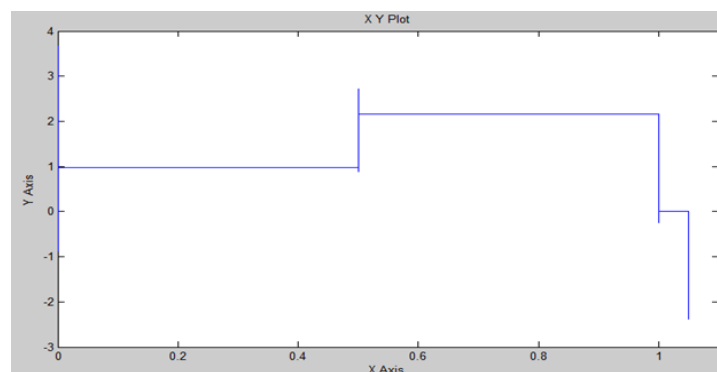


Figura 100: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor

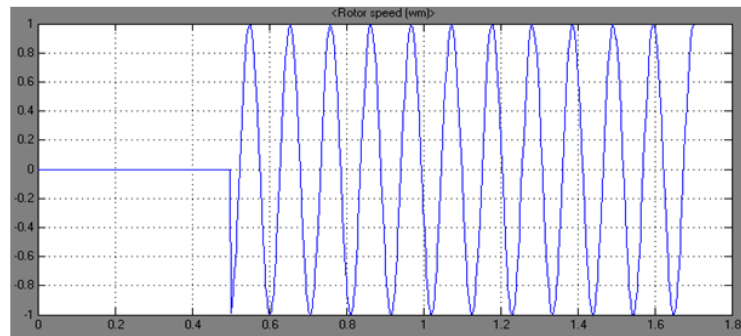


Figura 101: Entrada de torque mecánico en por unidad del rotor en el motor.

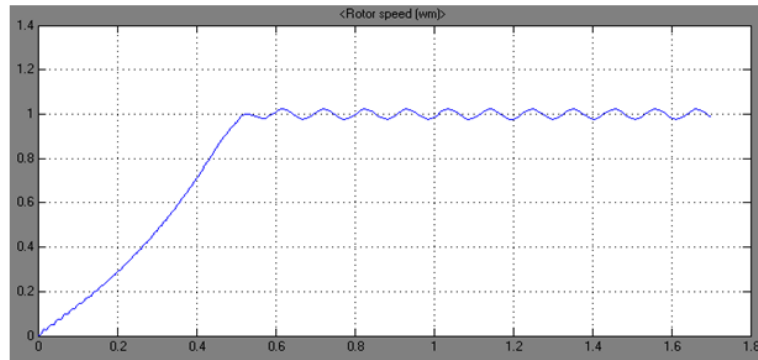


Figura 102: Velocidad del rotor en por unidad del motor

En 0.5 segundos alcanza la velocidad nominal.

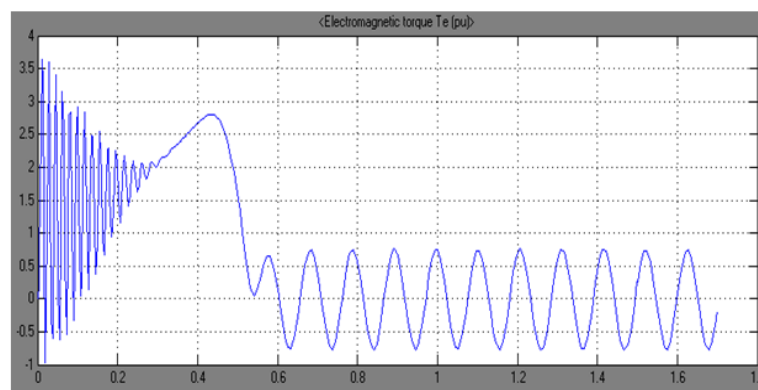


Figura 103: Torque electromagnético en por unidad

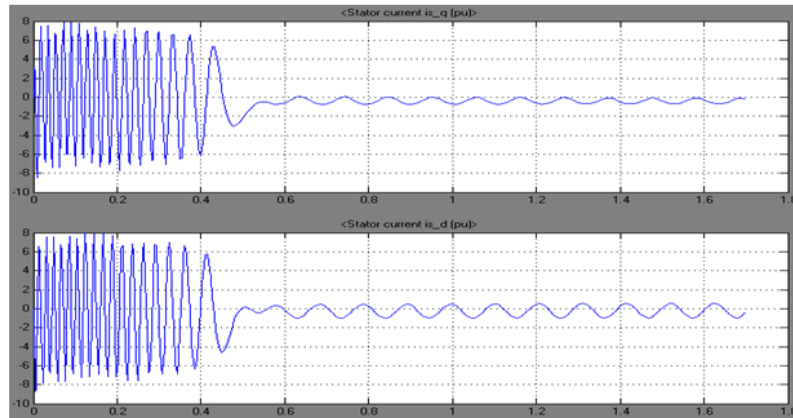


Figura 104: i_{qs} e i_{ds} respectivamente en por unidad del estator

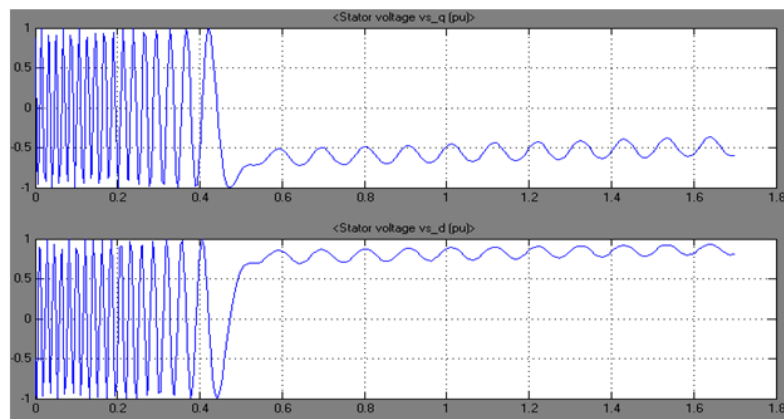


Figura 105: V_{qs} e V_{ds} respectivamente en por unidad del estator

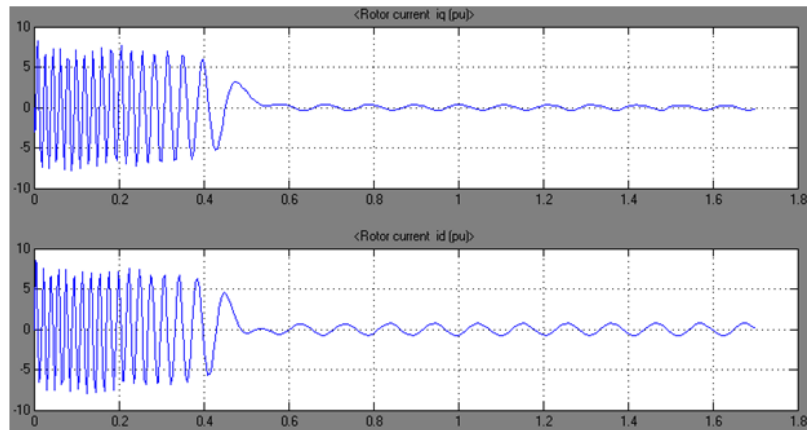


Figura 106: i_q y i_d respectivamente en por unidad del rotor

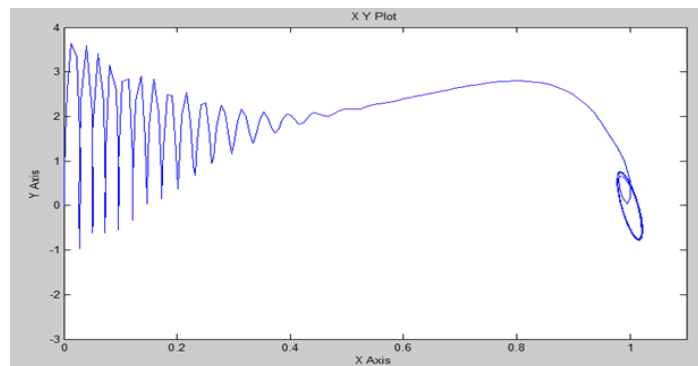


Figura 107: Torque electromagnético vs Velocidad del rotor

ANEXO B

CIRCUITOS IMPRESOS DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Se presentan las capas utilizadas en cada sección del dispositivo implementado, para su posterior fabricación.

Silkscreen: Es la capa de ubicación de componentes y de texto.

Top: Es una capa superior donde se localizan las pistas en cobre.

Bottom: Es una capa inferior donde se localizan las pistas en cobre.

Soldermask Top: Es una capa superior donde se establece la posición y el tamaño de los agujeros para el taladro de perforación.

Soldermask Bottom: Es una capa inferior donde se establece la posición y el tamaño de los agujeros para el taladro de perforación.

Consideraciones:

- Circuitos impresos fabricado con antisolder para evitar que la soldadura llegue a ciertas pistas e impedir que se oxiden y oscurezcan.
- Distancia entre conectores de entrada de tensiones 2.5 cm.
- Ancho de las pistas de 2mm.
- Diámetro de los huecos de pastes 3 mm.
- Diámetro de los huecos de tornillos pasantes 5mm.

Primera sección

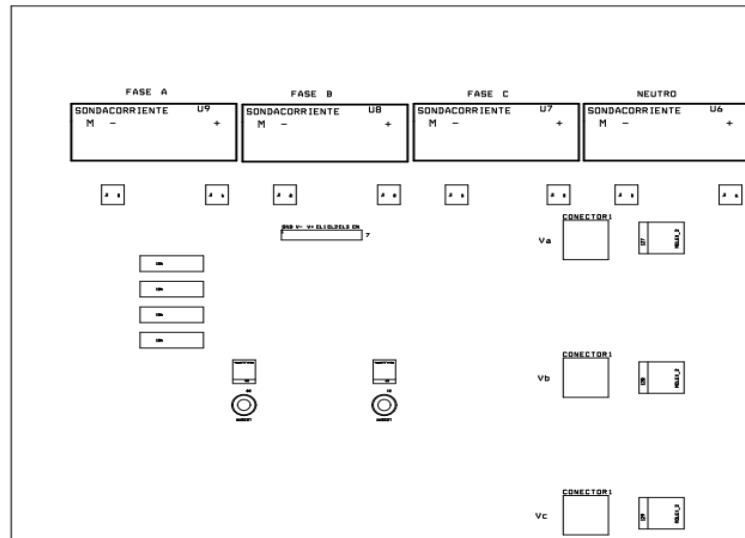


Figura 108: Capa Silkscreen Top

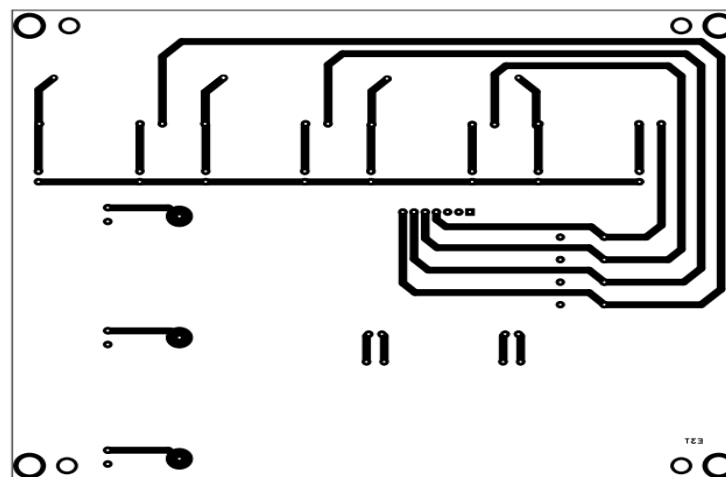


Figura 109: Capa Bottom

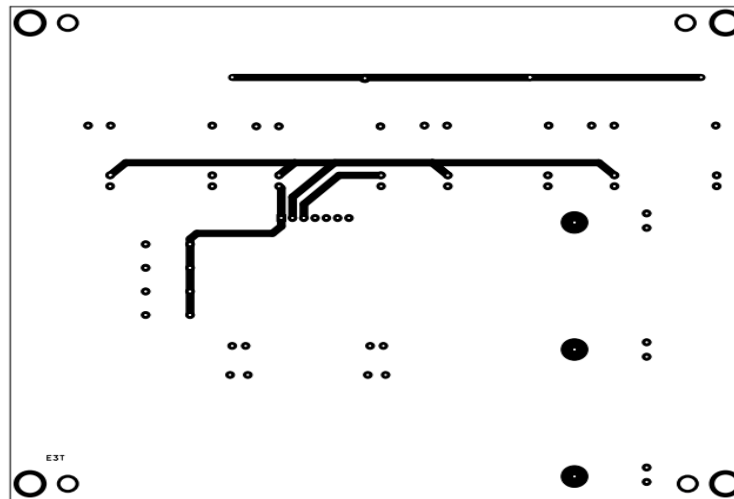


Figura 110: Capa Top

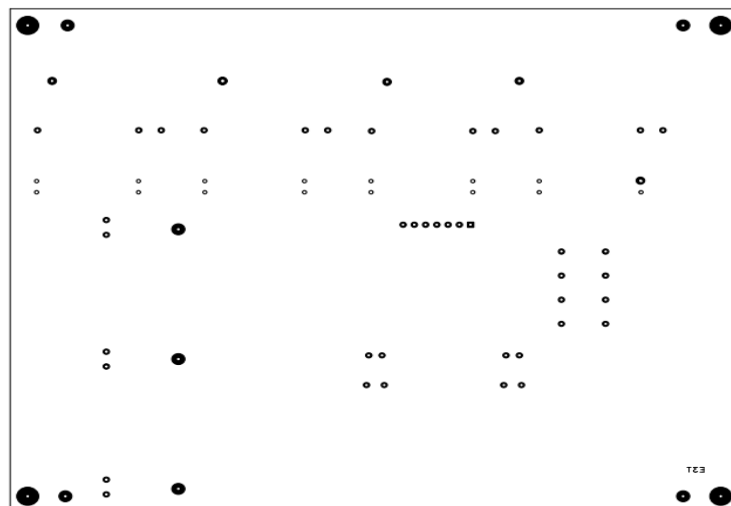


Figura 111: Capa Soldermask Bottom

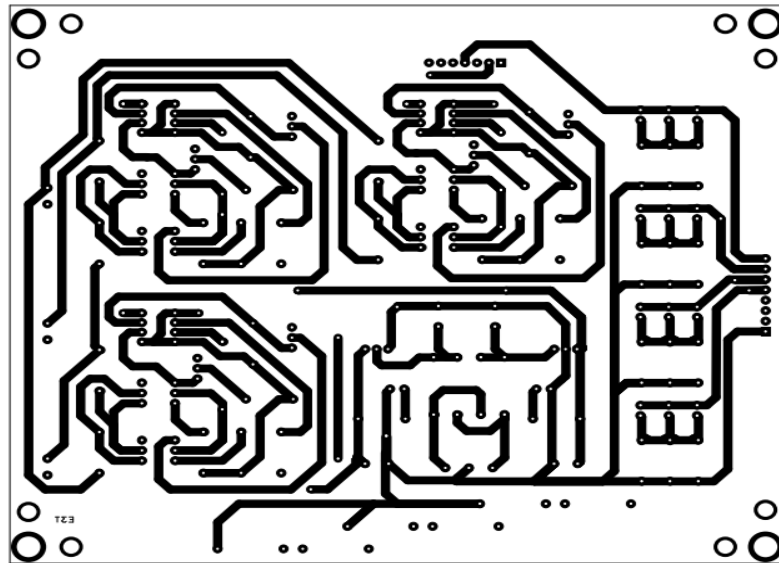


Figura 114: Capa Bottom

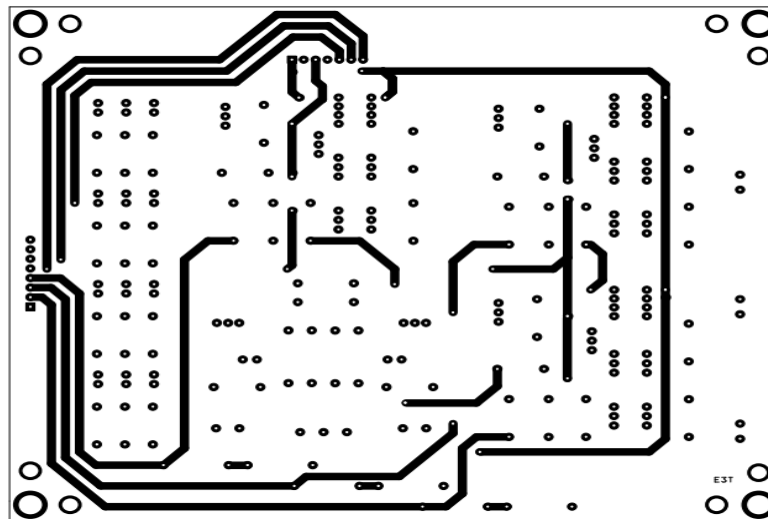


Figura 115: Capa Top

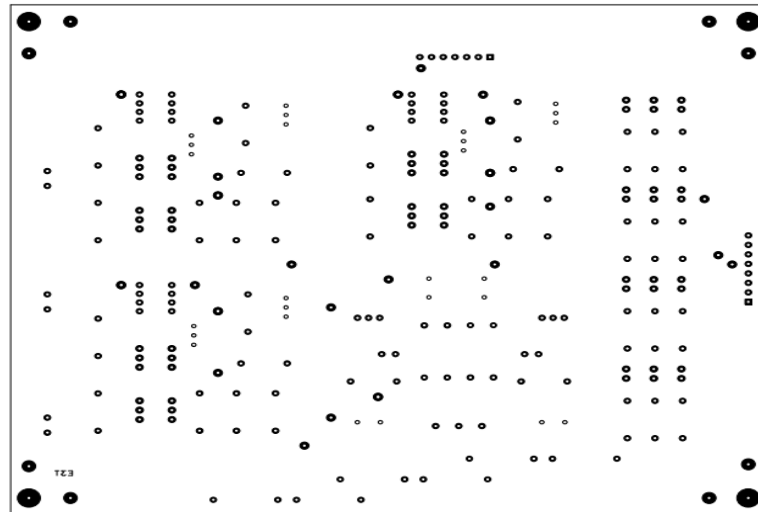


Figura 116: Capa Soldermask Bottom

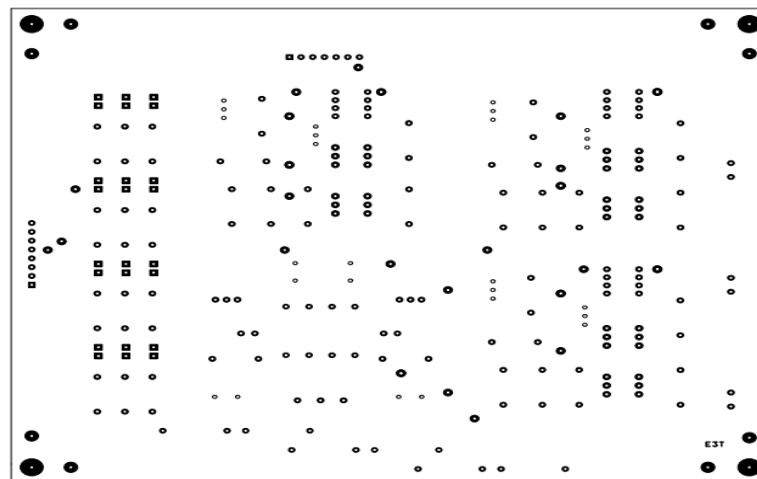


Figura 117: Capa Soldermask Top

Tercera sección

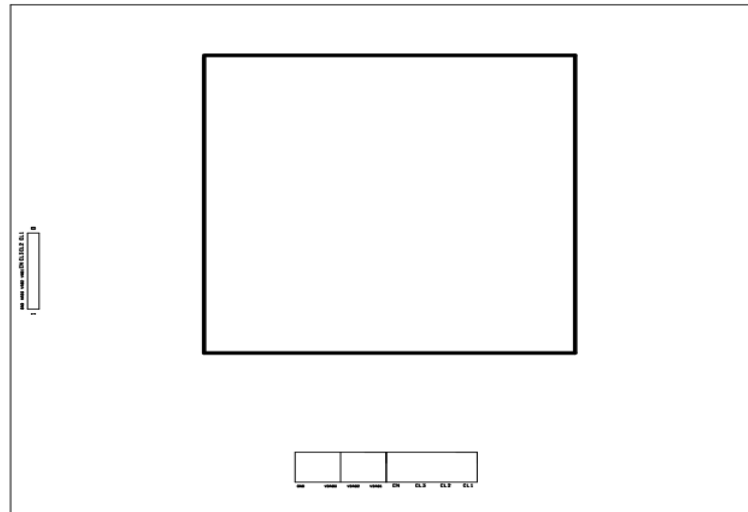


Figura 118: Capa Silkscreen Top

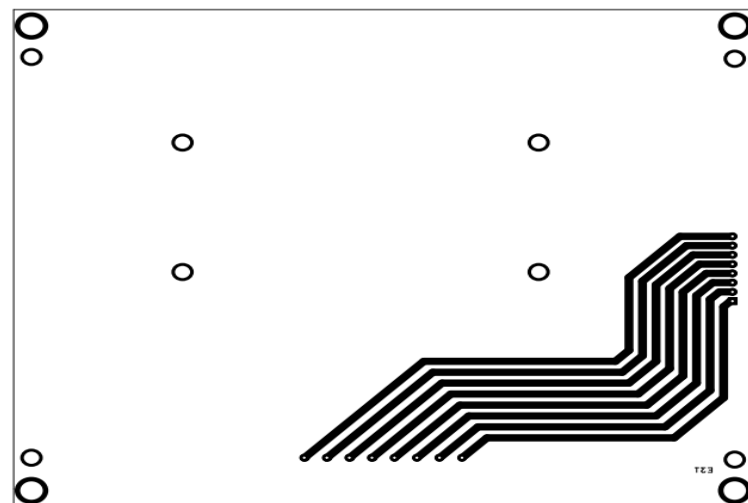


Figura 119: Capa Bottom

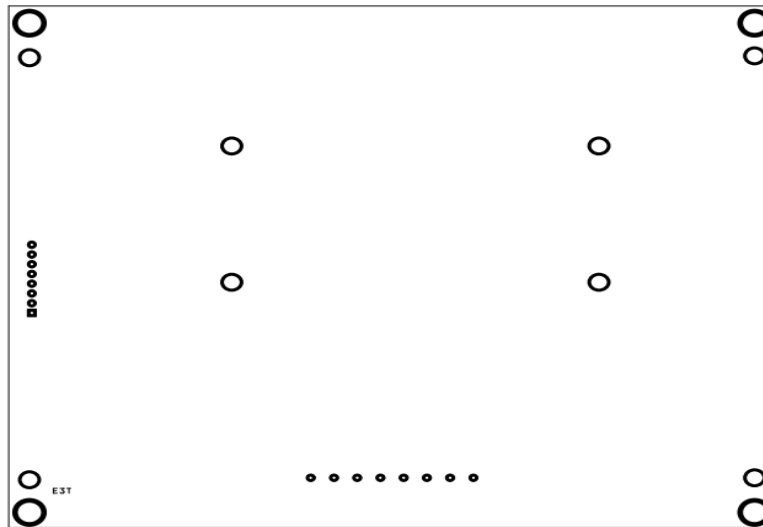


Figura 120: Capa Top

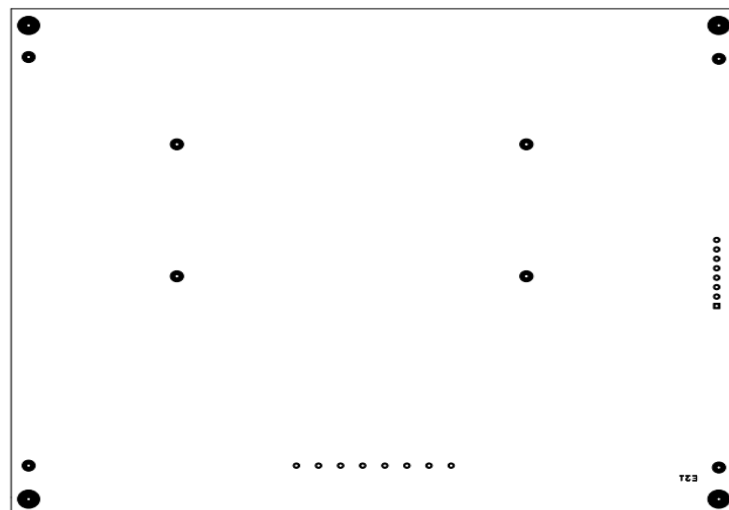


Figura 121: Capa Soldermask Bottom

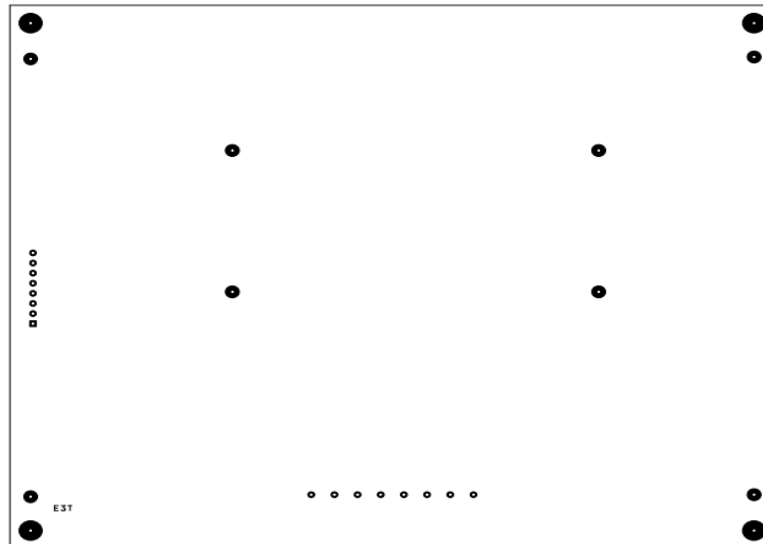


Figura 122: Capa Soldermask Top

ANEXO C

DIAGRAMA DE BLOQUES PARA DETERMINAR EL DINAGRAMA DE SUPERFICIE A PARTIR DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL MOTOR DE INDUCCIÓN

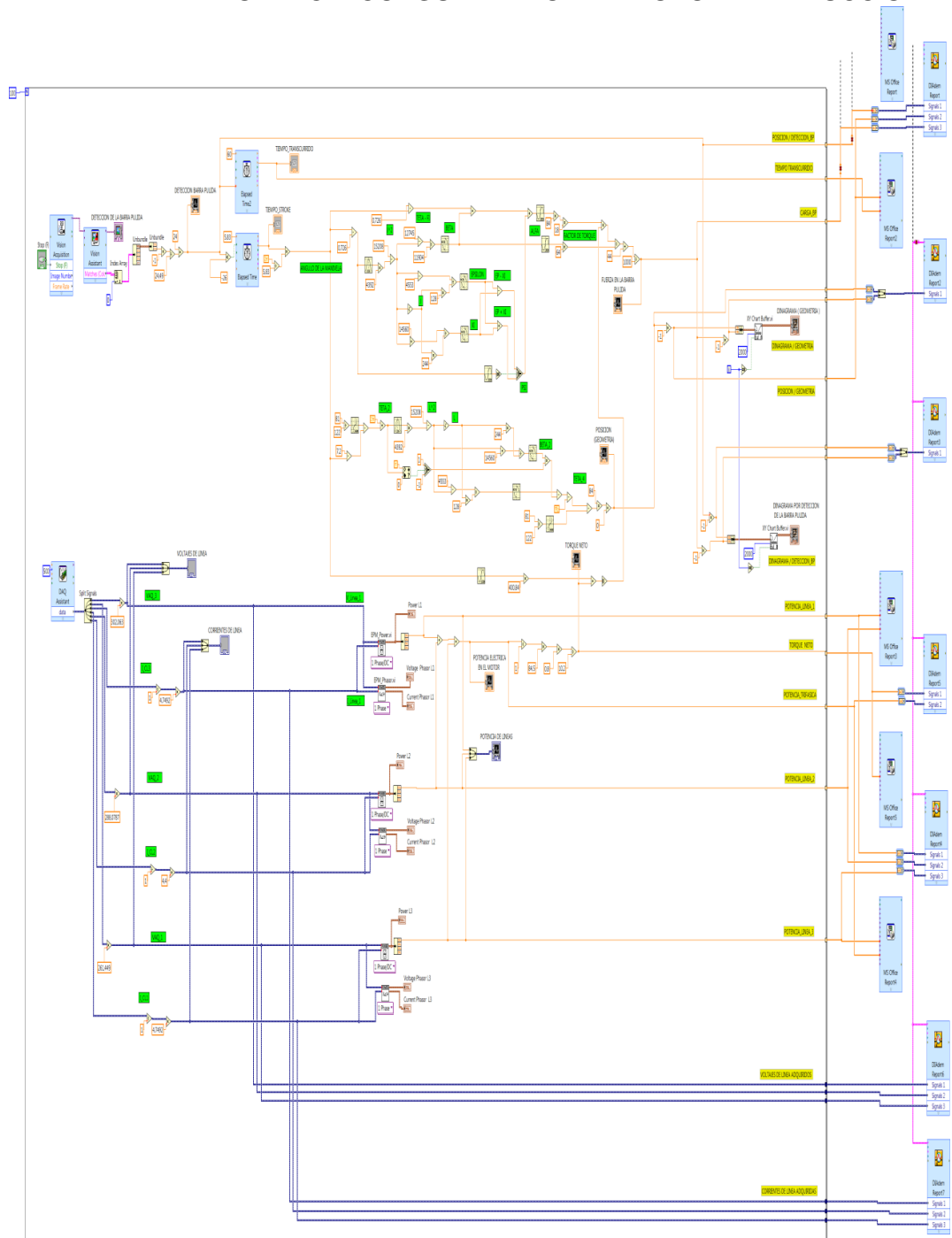


Figura 123: Diagrama de flujo completo