



Instituto Politécnico Nacional

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**ELECTRODINAMÓMETRO EXPERIMENTAL
PARA EMULAR CARGAS NO LINEALES
EN EL LABORATORIO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica.

Presenta:

Carlos Alberto Espinoza Arredondo



México, D.F.

Diciembre de 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 7 del mes de Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe **Carlos Alberto Espinoza Arredondo** alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro B091529, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. **Jaime José Rodríguez Rivas** y cede los derechos del trabajo intitulado: **“Electrodinamómetro experimental para emular cargas no lineales en el laboratorio”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección espinoza_carlosalberto@hotmail.com, jjrodriguezr@ipn.mx, Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Carlos Alberto Espinoza Arredondo

Nombre y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de MÉXICO siendo las 19:00 horas del día 07 del mes de DICIEMBRE del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la: E. S. I. M. E. ZAC. para examinar la tesis titulada:

“ELECTRODINAMÓMETRO EXPERIMENTAL PARA EMULAR CARGAS NO LINEALES EN EL LABORATORIO”

Presentada por el alumno:

ESPINOZA ARREDONDO CARLOS ALBERTO
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	5	2	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

DR. JAIME JOSÉ RODRÍGUEZ RIVAS

DR. DANIEL RUIZ VEGA
Presidente

DR. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR
Secretario

DR. LUIS PASTOR SÁNCHEZ FERNÁNDEZ
Segundo vocal

M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES
Tercer vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



Agradecimientos.

A dios por todas las bendiciones que me ha dado en el transcurso de mi vida.

A mi asesor de tesis el Dr. Jaime José Rodríguez Rivas por haberme brindado siempre todo su apoyo y comprensión ya que gracias a esto he logrado culminar este trabajo de tesis y una etapa importante de mi vida.

A los Dres: David Sebastián Baltazar, Daniel Ruiz Vega, Luis Pastor Sánchez Fernández y al M. en C. Tomas Ignacio Asiaín Olivares, por las observaciones hechas durante la revisión de este trabajo de tesis.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) por el apoyo proporcionado para la realización de este trabajo de tesis en el marco del proyecto de investigación: “Supercapacitores para Ahorro de Energía en Transporte Eléctrico” (Número de registro PIC508-50).

Resumen.

En esta tesis se desarrolló la implementación de un electrodinamómetro para emular diferentes tipos de cargas mecánicas dinámicas, las cuales se aplican en la flecha de una máquina de corriente alterna (CA). En esta plataforma se acoplaron mecánicamente dos máquinas síncronas de imanes permanentes (MSIP) de 10 HP, una de ellas, es la máquina motriz, y la otra es la máquina de carga que forma parte del electrodinamómetro. El accionamiento de la máquina motriz fue implementado en el laboratorio en un trabajo anterior, sin embargo en esta tesis se realizó la simulación de todo el sistema en Matlab/Simulink, formado por los accionamientos de las dos máquinas acopladas mecánicamente, pudiéndose evaluar de esta forma su desempeño de realizar la implementación del electrodinamómetro en el laboratorio.

El electrodinamómetro está formado por una MSIP que al estar acoplada mecánicamente con otra MSIP (máquina motriz), puede generar diferentes cargas en la flecha de la máquina motriz. También el electrodinamómetro tiene dos convertidores CD/CA conectados por el lado de corriente directa (CD) que accionan el estator de la máquina de carga, de esta forma se puede regenerar la energía, cuando el electrodinamómetro trabaja como generador síncrono. Para el control del electrodinamómetro se utilizó la tarjeta NI USB 6211 de National Instruments, programada con Labview.

En esta tesis se logró emular diferentes perfiles de par electromagnético incluyendo el perfil de un pequeño vehículo eléctrico. Fueron obtenidos resultados de simulación y resultados experimentales, logrando emular que la máquina motriz se encuentra ensamblada en un vehículo eléctrico.

Abstract.

In this thesis developed the implementation of a electrodynamometer to emulate different types of dynamic mechanical loads, which are applied to the shaft of alternating current machine (AC). In this platform is mechanically coupled two permanent magnet synchronous machines (PMSM) 10 HP, one of them is the drive machine, and the other is the load machine which is part of electrodynamometer. The electronics power Drives of a drive machine was implemented in the laboratory in a previous work, however in this thesis was simulated the complete system in Matlab / Simulink, formed by the drives of both machines mechanically coupled, thus being able to evaluated the feasibility of implementing the electrodynamometer in the laboratory.

The electrodynamometer is formed by a PMSM That is mechanically coupled with another PMSM (driving machine) so can generate different loads on the shaft of the drive machine. Also the electrodynamometer has two converters DC / AC connected by the bus of DC to supply the load machine stator, this way can regenerate the power, when the electrodynamometer works as a synchronous generator. To control electrodynamometer used the NI USB 6211 National Instruments, programmed in Labview.

In this thesis achieved emulated different electromagnetic torque profiles including the profile of a small electric vehicle. Were obtained simulation results and experimental results, achieving emulate that the drive machine is assembled in an electric vehicle.

Glosario de símbolos

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
MSIP	Máquina síncrona de imanes permanentes.
v_q	Voltaje en el eje q del marco del Referencia Rotatorio
v_d	Voltaje en el eje d del marco del Referencia Rotatorio.
i_{qs}	Corriente en el eje q del marco del Referencia Rotatorio.
i_{ds}	Corriente en el eje d del marco del Referencia Rotatorio.
R_q	Resistencia del estator en el eje q del marco de referencia rotatorio.
R_d	Resistencia del estator en el eje d del marco de referencia rotatorio.
L_q	Inductancia en el eje q del marco de Referencia Rotatorio.
L_d	Inductancia en el eje d del marco de Referencia Rotatorio.
λ_{qs}	Flujo magnético en el eje q del marco de Referencia Rotatorio.
λ_{ds}	Flujo magnético en el eje d del marco de Referencia Rotatorio.
λ_{af}	Flujo del imán permanente.
ω_e	Velocidad angular eléctrica.
T_e	Par electromagnético.
P	Numero de par de polos.
ω_m	Velocidad angular mecánica real.
ω_m^*	Velocidad angular mecánica de referencia.
T_L	Par de carga.
J	Inercia.
B	Coefficiente de fricción.
δ	Angulo de carga.
ϕ	Angulo entre el fasor de corriente y el fasor de voltaje.
θ_s	Posición del fasor de corriente del estator.
θ_r	Posición eléctrica del rotor.
φ	Margen de fase.
k_{pwm}	Constante del inversor.
v_{dc}	Voltaje en el bus de corriente directa del inversor.
\hat{v}_{tri}	Voltaje pico de la señal de control.
k_{i_cor}	Constante de integración del lazo de corriente.
k_{p_cor}	Constante proporcional del lazo de corriente.
k_{i_vel}	Constante de integración del lazo de velocidad.
k_{p_vel}	Constante proporcional del lazo de velocidad.
ω_{fc}	Frecuencia de corte del lazo de corriente.
ω_{fv}	Frecuencia de corte del lazo de velocidad.

Contenido

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Glosario de símbolos.....	iv
Contenido.....	v
Listado de figuras.....	viii
Listado de tablas.....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
DESCRIPCION Y OBJETIVOS DE LA TESIS.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos generales.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Estado del arte.....	3
1.5 Aportaciones.....	4
1.6 Contenido de la tesis.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
SIMULACIÓN DEL SISTEMA MÁQUINA MOTRIZ-ELECTRODINAMÓMETRO.....	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Modelado de la máquina síncrona de imanes permanentes.....	6
2.3 Modelo del inversor fuente de voltaje.....	10
2.4 Control vectorial de la MSIP.....	12
2.4.1 Simulación del control vectorial de una MSIP.....	17
2.5 Simulación del sistema máquina motriz-electrodinamómetro.....	18
2.6 Modelo del vehículo eléctrico.....	19
2.7 Resultado de la simulación del control vectorial de una MSIP.....	23
2.8 Resultado de la simulación del electrodinamómetro.....	27
CAPÍTULO 3.....	30
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MÁQUINA MOTRIZ-ELECTRODINAMÓMETRO.....	30
3.1 Introducción.....	30
3.2 Especificaciones de la máquina síncrona de imanes permanentes.....	30
3.3 Especificaciones del accionamiento de CA universal Unidrive SP 3201.....	31
3.3.1 Características de potencia nominal del Unidrive SP 3201.....	32
3.3.2 Modos de funcionamientos del Unidrive SP.....	32

3.3.3 Especificaciones de las terminales de control	33
3.3.4 Configuración del accionamiento motriz	36
3.3.5 Conexiones de CA y control del sistema del electrodinamómetro	37
3.4 Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211	40
CAPÍTULO 4.....	41
DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL.....	41
4.1 Descripción del VI principal	41
4.2 Descripción del subVI Modo manual.....	48
4.3 Descripción del subVI modo automático	54
4.4 Descripción del subVI modo de vehículo	60
4.5 Descripción del subVI Cargar ciclo.vi.....	63
4.6 Descripción del subVI Derivada.vi	64
4.7 Descripción del subVI Escribe datos automat.vi	65
4.8 Descripción del subVI escribe datos.vi	69
4.9 Descripción del subVI escribe archivo binario.vi.....	70
4.10 Descripción del subVI Grafica datos.vi	71
4.11 Descripción del subVI Guarda variables .vi	72
4.12 Descripción del subVI Adquisición.vi.....	73
4.13 Descripción del subVI Lee archivo binario.vi.....	75
4.14 Descripción del subVI Límite de los parámetros_0.vi	76
4.15 Descripción del subVI Límite de los paramatros_1.vi	78
4.16 Descripción del subVI Modelo del vehiculo.vi.....	79
4.17 Descripción del subVI programar ciclo.vi	80
4.18 Variables globales.....	83
CAPÍTULO 5.....	84
RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN.....	84
5.1 Introducción	84
5.2 Comparación de resultados experimentales y simulación en modo automático.....	84
5.3 Comparación de resultados experimentales y simulación en modo vehículo.....	88
CAPÍTULO 6.....	92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1 Introducción	92
6.2 Conclusiones.....	92
6.3 Recomendaciones	93

REFERENCIAS	94
APÉNDICE A	96
A.1 Ecuaciones de la MSIP	96
A.2 Diagrama de bloques de las funciones de transferencia de la MSIP.	96
A.3 Diseño del lazo de control del par electromagnético	97
A.4 Diseño del lazo de control de velocidad	99
A.5 Cálculos numéricos de los controladores	101
A.5.1 Cálculo numérico del lazo de control de corriente	101
A.5.2 Cálculo numérico del lazo de control de velocidad	102

Listado de figuras

Figura 2. 1 Diagrama Fasorial de la MSIP	7
Figura 2. 2 Circuito Equivalente de la MSIP.....	7
Figura 2. 3 Modelo de la MSIP.....	8
Figura 2. 4 Diagrama de la primera etapa del modelo de la MSIP.	9
Figura 2. 5 Diagrama de la segunda etapa del modelo de la MSIP.....	9
Figura 2. 6 Diagrama de la tercera etapa del modelo de la MSIP.....	10
Figura 2. 7 Inversor de fuente de voltaje.	11
Figura 2. 8 Diagrama interno del bloque del inversor.....	11
Figura 2. 9 Función embebida de MATLAB con las ecuaciones del inversor.	12
Figura 2. 10 Diagrama fasorial de la MSIP aplicando el control vectorial a par constante.	13
Figura 2. 11 Diagrama de bloques del control vectorial.....	13
Figura 2. 12 Bloque del sistema control de la MSIP.....	14
Figura 2. 13 Diagrama interno del bloque de control de la MSIP.	14
Figura 2. 14 Controlador AW PI tracking.	15
Figura 2. 15 Bloque de transformaciones de Park.	16
Figura 2. 16 Diagrama interno del bloque de transformaciones de Park.	16
Figura 2. 17 Función embebida de las transformaciones de Park.....	17
Figura 2. 18 Diagrama global de la simulación del control vectorial de una MSIP.	17
Figura 2. 19 Diagrama de bloques del sistema máquina motriz-electrodinómetro.....	18
Figura 2. 20 Bloque del modelo del vehículo.	21
Figura 2. 21 Programación de la ecuación del vehículo.....	21
Figura 2. 22 Diagrama de bloques de la simulación del sistema máquina motriz-electrodinómetro considerando como carga el vehículo eléctrico.	22
Figura 2. 23 Gráfica de los voltajes de fase de alimentación de la MSIP sin anti-windup.	23
Figura 2. 24 Gráfica de los voltajes de alimentación con controlador PI anti-windup.	23
Figura 2. 25 Velocidad de la MSIP con controlador PI sin anti-windup.....	24
Figura 2. 26 Comportamiento de la velocidad con controlador PI con Anti-windup.	24
Figura 2. 27 Corriente en el eje directo en el marco de referencia dq.....	25
Figura 2. 28 Corriente en el eje de cuadratura en el marco de referencia dq.	25
Figura 2. 29 Voltajes en el marco de referencia dq.....	26
Figura 2. 30 Comportamiento del sistema de control de velocidad de la MSIP.....	26
Figura 2. 31 Par electromagnético de la MSIP.	27
Figura 2. 32 Comportamiento del par de la máquina de carga.	27
Figura 2. 33 Voltajes de alimentación de MSIP en el marco de referencia abc.	28
Figura 2. 34 Voltajes de alimentación de la MSIP en el marco de referencia dq.	28
Figura 2. 35 Comportamiento de la velocidad de la máquina motriz.	29
Figura 3. 1 Fotografía del Unimotor FM modelo: 190E2D200BACAA215320.....	31
Figura 3. 2 Fotografía de los Unidrive SP 3201 montados en el gabinete.	31
Figura 3. 3 Terminales de control del Unidrive SP 3201 del accionamiento regen.....	33
Figura 3. 4 Terminales del módulo SM Encoder Output Plus.	36
Figura 3. 5 Diagrama de alimentación y control del sistema regenerativo.	38

Figura 3. 7 Implementación del sistema regenerativo.....	39
Figura 3. 8 Fotografía y asignación de terminales de la NI USB 6211.....	40
Figura 4. 1 Panel frontal del VI principal.....	42
Figura 4. 2 Diagrama de bloques del VI principal.....	42
Figura 4. 3 Diagrama de bloques dentro de la secuencia uno.....	43
Figura 4. 4 Secuencia cero del caso de evento modo manual.....	44
Figura 4. 5 Secuencia uno del caso de evento modo manual.....	44
Figura 4. 6 Secuencia cero del caso de evento modo vehículo.....	45
Figura 4. 7 Secuencia uno del caso de evento modo vehículo.....	45
Figura 4. 8 Secuencia cero del caso de evento modo automático.....	46
Figura 4. 9 Secuencia uno del caso de evento modo automático.....	46
Figura 4. 10 Caso de evento del botón parar.....	47
Figura 4. 11 Estructura de secuencia numero dos (Fin).....	47
Figura 4. 12 Icono del subVI modo manual.....	48
Figura 4. 13 Panel frontal del subVI modo manual.....	48
Figura 4. 14 Diagrama de bloques del subVI modo manual.....	49
Figura 4. 15 Caso de evento velocidad máxima.....	49
Figura 4. 16 Caso de evento Parar.....	50
Figura 4. 17 caso de evento paro.....	50
Figura 4. 18 Estructura de secuencia-Secuencia cero (inicio).....	51
Figura 4. 19 Estructura de secuencia- secuencia uno (ejecución).....	51
Figura 4. 20 Ciclo While uno.....	52
Figura 4. 21 Ciclo While dos.....	52
Figura 4. 22 Ciclo While tres.....	53
Figura 4. 23 Secuencia dos (fin del subVI).....	53
Figura 4. 24 Panel frontal del subVI Modo automatico.vi.....	54
Figura 4. 25 Secuencia cero (Inicio).....	55
Figura 4. 26 Secuencia uno (configuración del modo).....	55
Figura 4. 27 Cuadro de dialogo del subVI modo automático.....	56
Figura 4. 28 Secuencia dos (Ejecución).....	56
Figura 4. 29 Caso de evento uno (parar).....	57
Figura 4. 30 caso de evento dos (Paro).....	57
Figura 4. 31 Caso de evento tres (Programar Ciclo).....	58
Figura 4. 32 Caso de evento cuatro (cargar ciclo).....	58
Figura 4. 33 Caso de evento cinco (modo de par).....	58
Figura 4. 34 Caso de evento seis (Selector de modo de velocidad nula).....	59
Figura 4. 35 Caso de evento siete (Modo de velocidad).....	59
Figura 4. 36 Secuencia tres (fin).....	60
Figura 4. 37 Panel frontal del subVI modo de Vehículo en la pestaña uno.....	61
Figura 4. 38 Panel frontal del subVI modo de vehículo.vi en la pestaña dos.....	61
Figura 4. 39 Estructura de secuencia número cero (inicio).....	62
Figura 4. 40 Estructura de secuencia uno (Ejecución).....	62
Figura 4. 41 Estructura de secuencia dos (Fin).....	63
Figura 4. 42 Panel frontal del subVI Cargar ciclo.vi.....	63

Figura 4. 43 Diagrama de bloques del subVI Cargar ciclo en el caso verdadero.	64
Figura 4. 44 Diagrama de bloques del subVI Cargar ciclo en el caso falso.	64
Figura 4. 45 Panel frontal del subVI Derivada.vi.	65
Figura 4. 46 Diagrama de bloques del subVI derivada.vi.	65
Figura 4. 47 Panel frontal del subVI Escribe datos automat.vi	66
Figura 4. 48 Diagrama de bloques del subVI escribe datos automat.vi.	66
Figura 4. 49 Caso cero, secuencia cero, caso falso (generación de referencia constante).	67
Figura 4. 50 Caso cero, secuencia cero, caso verdadero.	67
Figura 4. 51 Secuencia uno del subVI escribe datos automat.vi.....	68
Figura 4. 52 Secuencia uno utilizando referencia como señal de velocidad.	68
Figura 4. 53 Secuencia uno utilizando referencia como señal de par.	69
Figura 4. 54 Panel frontal del subVI escribe datos .vi	69
Figura 4. 55 Diagrama de bloques del subVI escribe datos.vi.....	70
Figura 4. 56 Panel frontal del subVI escribe Archivo binario.vi.	70
Figura 4. 57 Diagrama de bloques del subVI escribe archivo binario.vi.	71
Figura 4. 58 Panel frontal del subVI Grafica datos.vi.....	71
Figura 4. 59 Diagrama de bloques del subVI Grafica datos.vi.	72
Figura 4. 60 Diagrama de bloques del subVI Guarda variables .vi	72
Figura 4. 61 Panel frontal del subVI Adquisicion.vi.....	73
Figura 4. 62 Secuencia cero del diagrama de bloques del subVI Adquisicion.vi.....	73
Figura 4. 63 Secuencia uno del diagrama de bloques del subVI Adquisición.....	74
Figura 4. 64 Secuencia dos del diagrama de bloques del subVI Adquisición	74
Figura 4. 65 Panel frontal del subVI Lee archivo binario.vi.	75
Figura 4. 66 Diagrama de bloques del subVI Leer archivo binario.vi.	75
Figura 4. 67 Caso verdadero (Configuración cancelada).	76
Figura 4. 68 Panel frontal del subVI Límite de los parámetros_0.vi.	76
Figura 4. 69 Diagrama de bloques del subVI limite de los parámetros_0.vi.....	77
Figura 4. 70 Diagrama de bloques del subVI limites de los parametros_0.vi	77
Figura 4. 71 Panel frontal del subVI Limite de los parametros_1.vi.	78
Figura 4. 72 Diagrama de bloques del subVI Límite de los parametros_1.vi.	78
Figura 4. 73 Panel frontal del SubVI modelo del vehiculo.vi.	79
Figura 4. 74 Secuencia cero del diagrama de bloques del subVI modelo del vehiculo.vi.	79
Figura 4. 75 Secuencia uno del diagrama de bloques del subVI modelo del vehículo.	80
Figura 4. 76 Panel frontal del subVI programar ciclo.vi.....	80
Figura 4. 77 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.	81
Figura 4. 78 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.....	81
Figura 4. 79 Diagrama de bloques del subVI cargar ciclo.vi.....	82
Figura 4. 80 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.	82
Figura 4. 81 Variables globales utilizadas en la ejecución del VI programa principal.vi.	83
Figura 5. 1 Velocidad de la máquina motriz en la implementación.....	84
Figura 5. 2 Pares del sistema máquina motriz-electrodinómetro (Resultados experimentales).	85
Figura 5. 3 Pares del sistema máquina motriz-electrodinómetro (Resultado de simulación)..	85
Figura 5. 4 Potencia en la flecha de la máquina de carga (Resultado experimental).....	86

Figura 5. 5 Potencia en la flecha de la máquina de carga (Resultado de simulación).	86
Figura 5. 6 Mediciones de potencias en las terminales del electrodinamómetro con un AEMC instruments 3945-B.	87
Figura 5. 7 Medición de potencia activa en la flecha del electrodinamómetro.	87
Figura 5. 8 Velocidad del vehículo en <i>Km/h</i> (Resultado experimental).....	88
Figura 5. 9 Velocidad del vehículo en Km/h (Resultados de simulación).	88
Figura 5. 10 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultados experimentales).	89
Figura 5. 11 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultado de simulación).	89
Figura 5. 12 Potencia en el electrodinamómetro (Resultado experimental).....	90
Figura 5. 13 Potencia en el electrodinamómetro (Resultado de simulación).	90
Figura 5. 14 Comportamiento del voltaje en el bus de CD (Resultado experimental).....	91
Figura 5. 15 Comportamiento del voltaje en el bus de CD (Resultado de simulación).	91
Figura A. 1 Diagrama de bloques de la Función de Transferencia de <i>idvd</i>	96
Figura A. 2 Diagrama de bloques de la Función de Transferencia de la MSIP.....	96
Figura A. 3 Diagrama de bloques utilizando la función de transferencia de la planta.....	97
Figura A. 4 Diagrama de bloques reducido.	97
Figura A. 5 Diagrama de bloques del lazo de control de corriente <i>i_q</i>	97
Figura A. 6 Lazo de control de corriente <i>i_d</i>	99

Listado de tablas

Tabla 2. 1 Unidades de medida de los parámetros del vehículo.	20
Tabla 3. 1 Especificaciones de la MSIP.	30
Tabla 3. 2 Potencias nominales del SP 3201.	32
Tabla 3. 3 Funciones de las terminales de control.	33
Tabla 3. 4 Funcionamiento y descripción de la terminal de control cinco y seis.	34
Tabla 3. 5 Funcionamiento y descripción de la terminal de control siete.	34
Tabla 3. 6 Funcionamiento y descripción de la terminal de control diez.	35
Tabla 3. 7 Descripción de las terminales del modulo SM Encoder Output Plus.	36
Tabla 3. 8 Modificaciones de la configuración del modo servo que trae por defecto.	37
Tabla 3. 9 Valores de elementos del sistema del electrodinamómetro.	37
Tabla 3. 10 Claves de los elementos del sistema de la figura 3.3	39
Tabla 3. 11 Características de entradas y salidas analógicas.	40
Tabla 3. 12 Características de entradas y salidas digitales.	40
Tabla A. 1 Parámetros de la MSIP y el convertidor.	101

CAPÍTULO 1

DESCRIPCION Y OBJETIVOS DE LA TESIS

1.1 Introducción

Las plataformas de pruebas que se utilizan para emular diferentes tipos de cargas mecánicas son muy diversas, debido a que se pueden utilizar diferentes dispositivos o incluso diferentes tipos de máquinas eléctricas, como puede ser la máquina de corriente directa, la máquina síncrona o la máquina asíncrona. Estas plataformas de pruebas también son comúnmente llamadas electrodinamómetros y tienen la capacidad de emular diferentes tipos de cargas mecánicas.

Las máquinas rotatorias son frecuentemente puestas a prueba en los laboratorios utilizando electrodinamómetros que dependen de un mecanismo de frenado y/o un embrague. El freno puede ser tan simple como un dispositivo de fricción o un generador eléctrico, donde la carga es ajustada modificando la fuerza de fricción, la salida eléctrica del generador o el deslizamiento de un embrague. En estos casos la carga es pasiva y la máquina bajo prueba solo experimenta condiciones de carga que tienen un comportamiento prácticamente estable [3].

La mayoría de los electrodinamómetros comerciales son operados a través del control de par, el cual no está en función de la dinámica de la velocidad de la máquina. Estos electrodinamómetros son utilizados para obtener información de las características del accionamiento bajo condiciones de prueba en estado estable. Sin embargo las cargas mecánicas industriales generalmente tienen un comportamiento dinámico siendo éstas la principal fuente de problemas en los accionamientos cuando son sometidos a prueba, por ejemplo: la regeneración, impactos periódicos de par o arranques con un alto par de carga [13].

Las cargas activas producen una regeneración en el sistema y son provocadas por la inercia del sistema y la fuerza de la carga que impone un comportamiento dinámico, por lo que un electrodinamómetro que utiliza un simple embrague no puede emular este tipo de cargas. Un electrodinamómetro que pueda emular cargas con características dinámicas, requiere un control de par, este control es necesario mientras se está emulando una carga dinámica ya sea en estado transitorio o en estado estacionario [3].

En este trabajo se presenta una propuesta de un electrodinamómetro, el cual se implementó en el laboratorio. Esta plataforma de prueba está constituida por una máquina síncrona de imanes permanentes de 7.5 kW, un sistema de regeneración comercial compuesto por dos inversores de 7.5 kW, filtros de conmutación y tarjeta de adquisición de datos entre otras cosas. Con esta plataforma de prueba se obtuvieron resultados satisfactorios en la emulación de cargas mecánicas dinámicas. En los capítulos dos y cinco se muestran los resultados de simulación e implementación.

1.2 Objetivos generales

1. Desarrollar la simulación del sistema máquina motriz-electrodinámometro utilizando el modelo de la máquina síncrona de imanes permanentes, el modelo promedio del inversor fuente de voltaje y el control vectorial. Para estudiar el comportamiento del sistema por medio de los resultados obtenidos en la simulación.
2. Implementar en el laboratorio un electrodinámometro que emule diferentes tipos de cargas mecánicas, utilizando una máquina síncrona de imanes permanentes accionada por dos convertidores CA/CD de la marca **Control Techniques**.
3. Dotar al laboratorio de una plataforma de pruebas que sea capaz de emular cargas mecánicas dinámicas, como el comportamiento de un vehículo, una carga tipo ventilación, etc, y que sea capaz de cambiar el tipo de carga cuando el usuario del sistema lo decida.
4. Utilizar una interfaz hombre máquina de fácil manejo para controlar el modo de funcionamiento del electrodinámometro.
5. Comparar los resultados obtenidos en la simulación con los resultados de la implementación.

En la figura 1.1 se ilustra el diagrama del sistema de pruebas que es implementado en este trabajo.

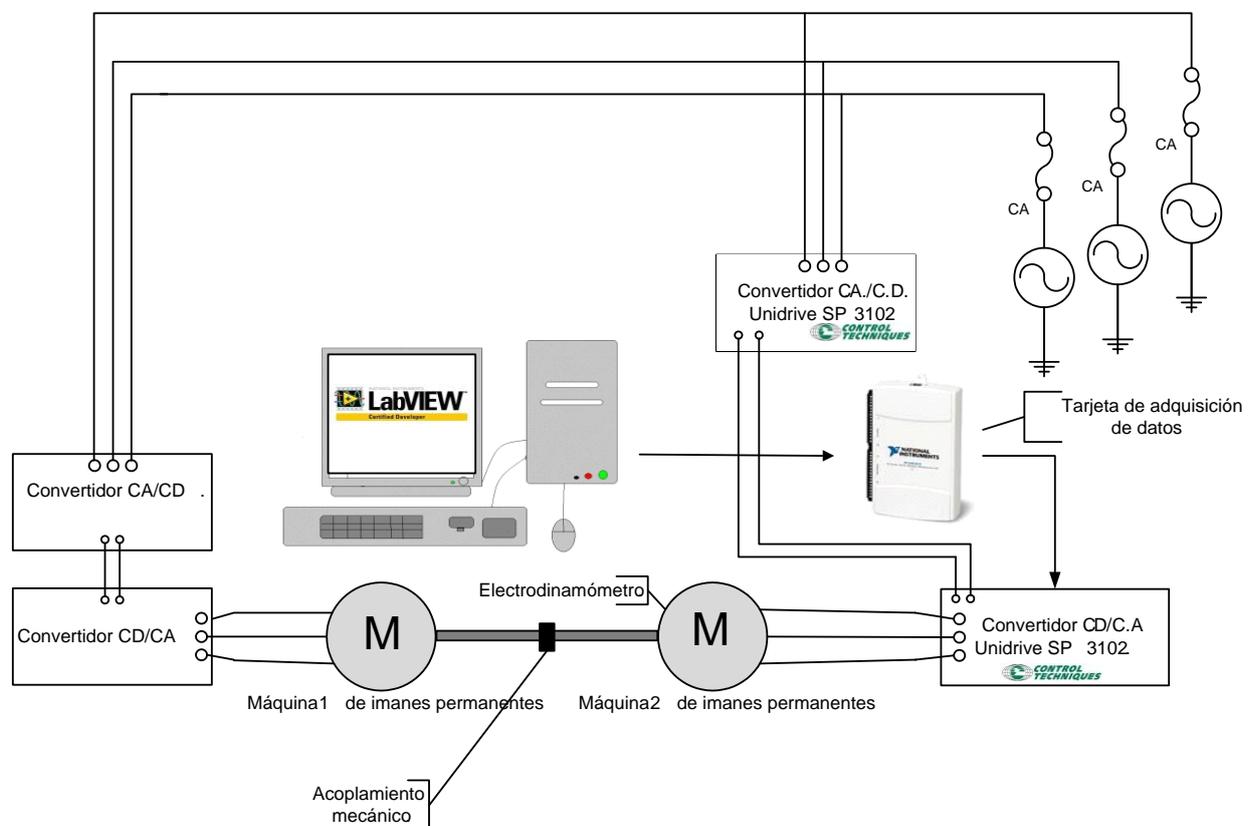


Figura 1.1 Diagrama general de la implementación del electrodinámometro.

1.3 Justificación

- Este trabajo está vinculado al proyecto de investigación financiado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) titulado: “ Supercapacitores para Ahorro de Energía en Transporte Eléctrico” (clave: PICS 08-50).
- Existe la necesidad de contar con una plataforma de pruebas que sea capaz de emular diferentes tipos de cargas, para evaluar el comportamiento de los algoritmos de control de máquinas eléctricas de C.A.
- El laboratorio de electrónica de potencia contará con un electrodinamómetro para emular cargas mecánicas dinámicas.
- El sistema propuesto es eficiente comparado con los electrodinamómetros convencionales debido a que este sistema puede devolver la energía a las líneas de alimentación de CA cuando el electrodinamómetro esté trabajando como generador.
- El sistema del electrodinamómetro es una plataforma flexible en la cual se le permite al usuario programar diferentes ciclos de trabajo pudiéndose configurar como ciclos de paro de velocidad.

1.4 Estado del arte

En 1994 E. R. Collins, Jr. y Y. Huang [14] propusieron un electrodinamómetro para realizar pruebas a máquinas eléctricas rotatorias utilizando una máquina asíncrona trifásica, en donde el usuario podía definir el comportamiento y las características de la carga, por medio de la selección de los coeficientes de la ecuación 1.1.

$$T_L = T_0 + a\omega_m + b\omega_m^2 + c\omega_m^3 + J\frac{d\omega_m}{dt} \quad (1.1)$$

También en 1994 R. E. Betz, H .B. Penfold y R.W. Newton [15] presentaron un simulador de cargas físicas el cual consiste en controlar por medio de una computadora una máquina de corriente directa en donde los resultados presentados argumentan que con un control apropiado la máquina de corriente directa puede emular cargas dinámicas.

En 1998 C. R. Hewson, G. M. Asher, M. Sumner [16], desarrollaron una plataforma de pruebas para emular cargas mecánicas lineales y no lineales, en la cual utilizan una máquina de corriente directa de 11 kW como generador y se le conecta una carga variable; esta carga varía por medio de un convertidor CD/CD y es de esta forma como logran emular diferentes tipos de cargas.

En 1999 Z.H. Akpolant, G.M. Asher and J. C. Clare [17] presentan un trabajo en el cual utilizan un compensador para retroalimentar la velocidad para calcular el par de referencia del electrodinamómetro. Esta implementación preserva el comportamiento dinámico real de la carga y permite la emulación de una gran cantidad de cargas no lineales.

En el 2006 M. Rodic, K. Jezernik y M. Trlep [18] presentaron una plataforma de pruebas que puede ser utilizada para la emulación de cargas dinámicas lineales y no lineales. Esta plataforma es utilizada para validar algoritmos de control de par y velocidad de accionamientos usados en

aplicaciones mecatrónicas. Esta plataforma utiliza un accionamiento Unidrive SP 3201 para el control de la máquina de carga. Para el cálculo del par de referencia se emplea un método de control no lineal [19, 20] el cual consta de un compensador y un controlador PI obteniendo un resultado favorable en la emulación de cargas dinámicas complejas como la inercia en sistemas mecánicos. El principio básico de la aproximación de la emulación de cargas mecánicas dinámicas se presenta en la figura 1.2 en donde G_{em} es el modelo de la carga emulada, G_{com} es el compensador, G representa al modelo mecánico del electrodinamómetro, G_t es el controlador, ω_{em} es la velocidad del sistema emulado y ω_r es la velocidad del electrodinamómetro.

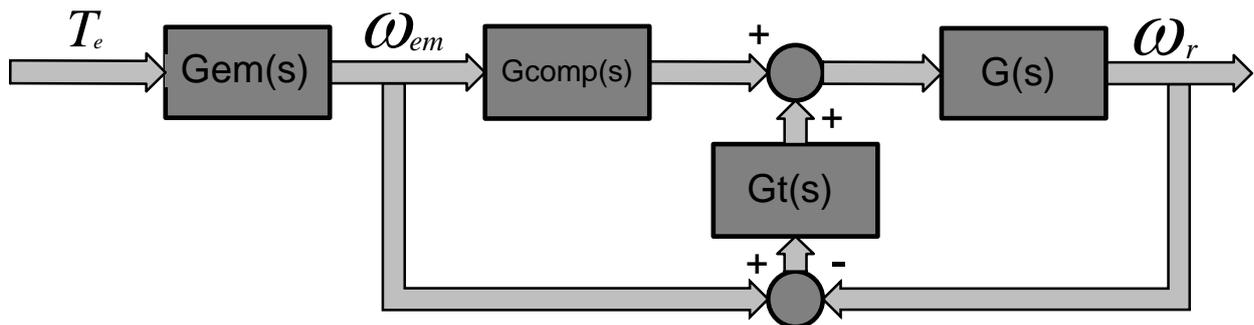


Figura 1. 2 Diagrama de bloques del principio de aproximación para emular cargas mecánicas.

En el 2008 I. Alcalá, A. Claudio, G. Guerrero [21] proponen una plataforma experimental que reproduce el comportamiento de un vehículo eléctrico, a través de los equivalentes entre el vehículo y la plataforma de pruebas. El sistema de pruebas está constituido por una máquina de corriente directa (electrodinamómetro), una máquina asíncrona (máquina bajo prueba), dos llantas de un vehículo unidas por medio de ejes y bandas (inercia del vehículo). Y presentan los resultados obtenidos en simulación e implementación los cuales muestran un buen desempeño en la emulación del vehículo eléctrico.

1.5 Aportaciones

- El laboratorio cuenta con una plataforma de pruebas experimentales la cual tiene la capacidad de emular diferentes tipos de cargas mecánicas.
- Como resultado de este trabajo se realizaron dos publicaciones en congresos internacionales que son:
 1. **Simulación de un electrodinamómetro para la emulación de cargas mecánicas dinámicas.** IEEE Sección México, presentado en la Vigésima Cuarta Reunión Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial RVP- AI/ del 10 al 16 de julio del 2011.
 2. **Control de dos máquinas síncronas de imanes permanentes acopladas mecánicamente.** Presentado en la VI Conferencia Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas CIIES, celebrada del 7 al 11 de Noviembre del 2011, Ciudad de México, México.

1.6 Contenido de la tesis

Capítulo I: Descripción y objetivos del trabajo de tesis.

Se mencionan diferentes plataformas de pruebas que se han implementado y que se encuentran en la literatura, se describen los objetivos generales de la tesis y se muestra un diagrama general de la implementación del electrodinamómetro.

Capítulo II: Simulación del sistema máquina motriz-electrodinamómetro.

Se presenta la simulación del sistema del electrodinamómetro y de la máquina motriz y se describe el modelo matemático de cada uno de los elementos que forman parte de la simulación como son: la MSIP, el inversor fuente de voltaje, el sistema de control etc.

Capítulo III: Descripción del sistema máquina motriz- electrodinamómetro.

Se mencionan las características de los elementos más relevantes que se utilizaron en la implementación del electrodinamómetro, se muestra la configuración de los Unidrive para que puedan ser utilizados en esta plataforma y se presentan los diagramas de las conexiones de control y de potencia del sistema de pruebas experimentales.

Capítulo IV: Descripción del software de control.

Se muestran los algoritmos de control que se utilizan para manejar la plataforma de pruebas experimentales del electrodinamómetro haciendo una breve explicación del funcionamiento de cada algoritmo, se explican los tres diferentes modos de trabajo del electrodinamómetro el VI principal y los dieciocho subVI que son utilizados por el programa principal.

Capítulo V: Resultados de implementación y simulación.

Se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas y son comparados con los resultados de la simulación.

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.

Se realiza la valoración de los resultados obtenidos, se analiza el cumplimiento de los objetivos de la tesis y se hacen recomendaciones de cómo mejorar plataforma de pruebas del electrodinamómetro para su valoración en trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

SIMULACIÓN DEL SISTEMA MÁQUINA MOTRIZ-ELECTRODINAMÓMETRO

2.1 Introducción

En este capítulo se hará una descripción de cada uno de los elementos del programa de simulación en Matlab/Simulink del sistema máquina motriz-electrodinamómetro. Esta descripción se realiza por secciones, iniciando con el modelo matemático de la máquina síncrona de imanes permanentes en el marco de referencia dq . Después se continúa con el inversor, en el cual se hace referencia a las ecuaciones del modelo promedio de un inversor fuente de voltaje (VSI). De ahí se prosigue con el sistema de control de la máquina motriz, el cual está integrado por tres lazos de control, uno de velocidad y dos de corriente. Y por último el sistema de control de la máquina de carga el cual solamente contiene dos lazos de control de corriente ya que no se controla la velocidad de la máquina de carga, únicamente se controla el par electromagnético de dicha máquina.

2.2 Modelado de la máquina síncrona de imanes permanentes

En el modelado matemático de la MSIP se toman en cuenta las siguientes consideraciones [1]:

- 1.- Los devanados del estator tienen el mismo número de vueltas por fase.
- 2.- El flujo magnético del rotor se encuentra alineado con el eje d y el flujo en el eje q es igual a cero.
- 3.- El flujo magnético del rotor es constante, se desprecian los cambios por la temperatura.

Las ecuaciones de voltaje del estator de la MSIP en el marco de referencia rotatorio dq son:

$$v_q = R_q i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2.1)$$

$$v_d = R_d i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (2.2)$$

Asumiendo que el flujo del rotor está alineado en el eje d las ecuaciones del flujo magnético del estator en el marco de referencia rotatorio dq son:

$$\lambda_{qs} = L_q i_{qs} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_{af} \quad (2.4)$$

La ecuación del par electromagnético de la máquina:

$$T_e = \frac{3}{2} P \{ \lambda_{af} i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds} \} \quad (2.5)$$

Para una MSIP de imanes permanentes superficiales $L_d = L_q$.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_{af} i_{qs} \quad (2.6)$$

La ecuación mecánica de la MSIP es:

$$T_e = J \frac{d}{dt} \omega_m + B \omega_m + T_L \quad (2.7)$$

Por lo tanto el modelo de la MSIP es:

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = (v_d - R_d i_{ds} + \omega_e L_q i_{qs}) / L_d \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = (v_q - R_q i_{qs} + \omega_e L_d i_{ds} - \omega_e \lambda_{af}) / L_q \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = (T_e - B \omega_m - T_L) / J \quad (2.10)$$

En la figura 2.1 se muestra el diagrama fasorial de la MSIP [2]:

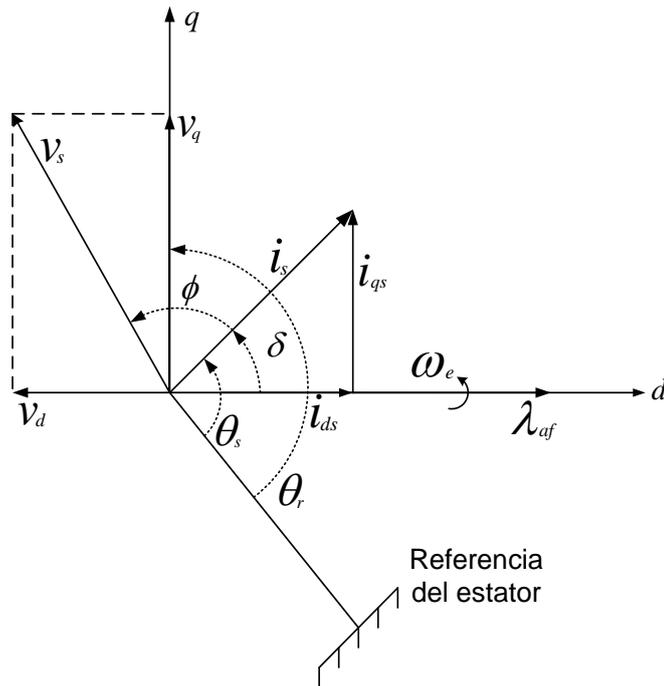


Figura 2. 1 Diagrama Fasorial de la MSIP

El circuito equivalente de la MSIP en el marco de referencia dq se muestra en la figura 2.2.

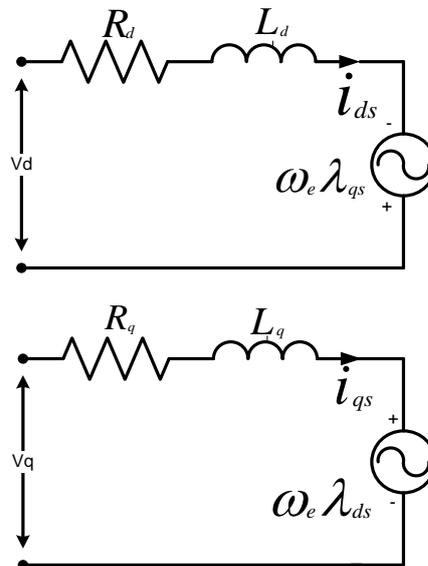


Figura 2. 2 Circuito Equivalente de la MSIP.

Las corrientes i_{ds} , i_{qs} son obtenidas a través de la matriz de transformación clásica de Park donde θ_r es la posición eléctrica del rotor [2]:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Las corrientes en un marco de referencia trifásico se obtienen de la matriz inversa de transformación de Park.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La simulación de la MSIP se realizó en MATLAB/Simulink. Este modelo cuenta con tres etapas las cuales son:

1. Primera etapa: Cambio del tipo de variables.
2. Segunda etapa: Obtención e ingreso de variables.
3. Tercera etapa: Ejecución del modelo.

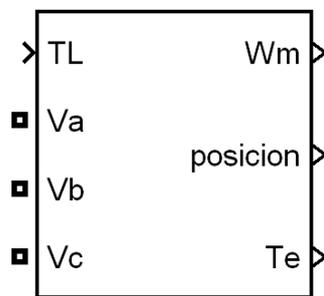


Figura 2. 3 Modelo de la MSIP.

En la figura 2.3 se muestra el bloque de la MSIP, este bloque cuenta con cuatro terminales de entrada de las cuales tres (V_a , V_b , V_c) son los voltajes de fase y una de las cuatro terminales de entrada (TL) es el par de carga. Y las tres terminales restantes W_m , velocidad mecánica de la máquina, posición, posición del rotor en radianes y T_e , par electromagnético. Dentro de este bloque de la MSIP se encuentran tres etapas en las cuales se logra simular la MSIP. A continuación se describe cada una de las tres etapas.

Primera Etapa: En esta etapa, las señales de voltaje que ingresan al bloque de la MSIP por medio de las terminales (V_a , V_b , V_c) se convierten en variables de control, para hacer el cambio de variable se utilizan los medidores de voltaje, la terminal de entrada TL es utilizada para ingresar el par de carga de la MSIP la cual será utilizada en el subsistema uno de la MSIP para la simulación de la máquina, también son utilizadas tres fuentes de corriente controlada, para simular los flujos de corrientes trifásicos en las terminales de alimentación de la MSIP,

estas tres fuentes de corriente son controladas por las tres terminales de salida (Ia, Ib, Ic) del subsistema uno de la MSIP. Las tres terminales de salida restantes (Wm, posición, Te) son calculadas en las siguientes dos etapas pero salen a través de la etapa uno. La primera etapa se puede observar en la figura 2.4.

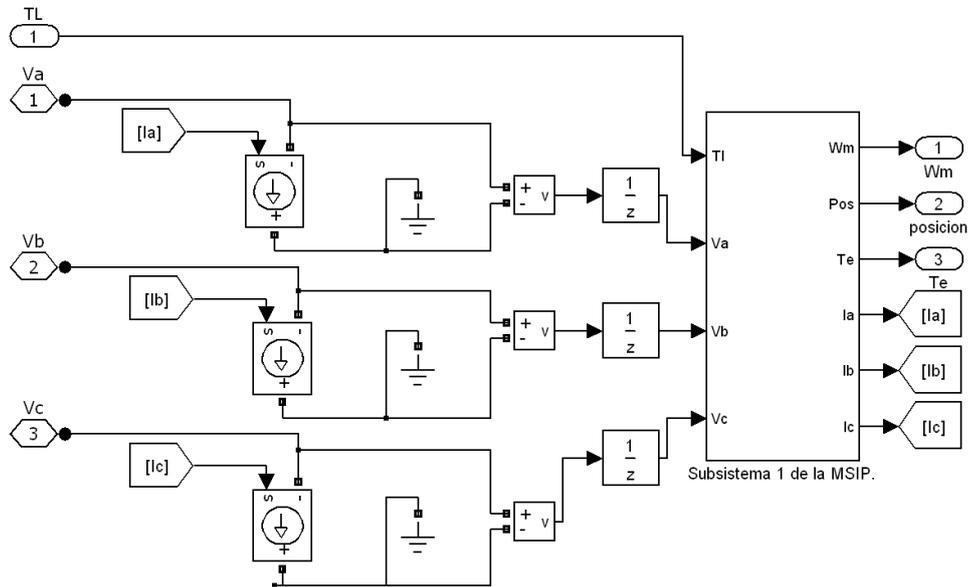


Figura 2. 4 Diagrama de la primera etapa del modelo de la MSIP.

Segunda etapa: En esta etapa ingresan los valores que forman parte del modelo de la MSIP como lo son variables y constantes, aquí ya todas son variables de control y de esta manera ingresan a la función embebida donde se encuentra programado el modelo dinámico de la MSIP en el marco de referencia *dq*. La segunda etapa se muestra en la figura 2.5.

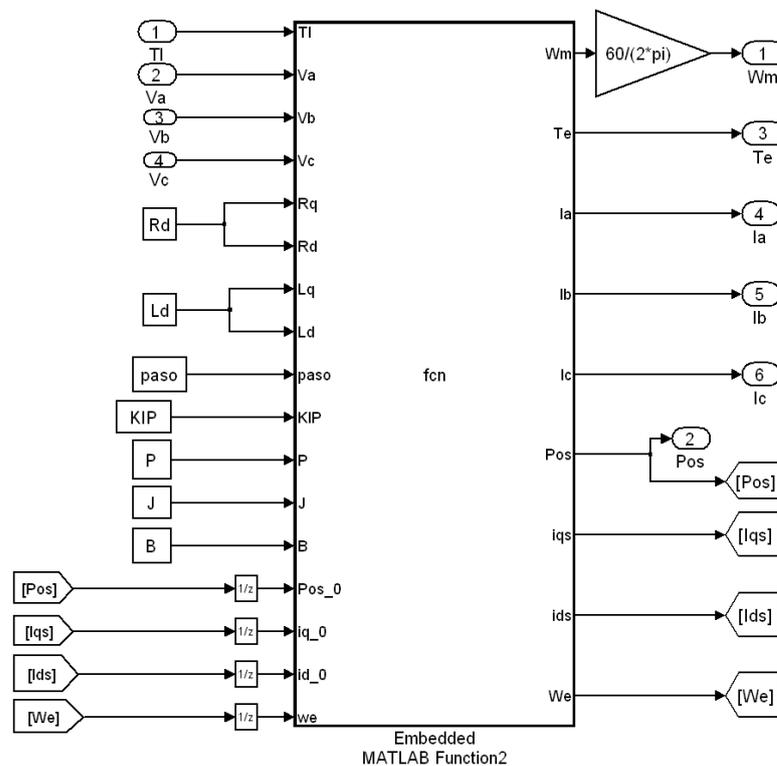


Figura 2. 5 Diagrama de la segunda etapa del modelo de la MSIP.

Tercera etapa: En esta etapa se encuentran las ecuaciones de la MSIP y es aquí donde se realizan los cálculos de las variables que describen el comportamiento de la máquina. Estos cálculos se realizan tomando los valores de voltaje en el marco de referencia (*abc*) y los transforma al marco de referencia *dq* utilizando la matriz de transformación de Park. Una vez que se tienen las componentes V_d , V_q se calculan las componentes de corrientes I_d , I_q , utilizando I_q para obtener el valor del par electromagnético de la MSIP a partir de la ecuación (2.6). De aquí se procede a calcular la velocidad utilizando la ecuación (2.7) para que después de hacer los cálculos en el marco de referencia *dq* regrese al marco de referencia (*abc*) con la matriz inversa de transformación de Park. Esto se repite en cada una de la iteraciones que realiza MATLAB/SIMULINK. La tercera etapa se observa en la figura 2.6.

```

1 function [Wm, Te, Ia, Ib, Ic, Pos, iqs, ids, We] = fcn(Tl, Va, Vb, Vc, Rq, Rd, Lq, Ld, paso, KIP, P, J, B, Pos_0, iq_0, id_0, we)
2 %#eml
3
4
5 Vd = 2/3*[Va*cos(Pos_0)-Vb/2*cos(Pos_0)+Vb*sqrt(3)/2*sin(Pos_0)-Vc/2*cos(Pos_0)-Vc*sqrt(3)/2*sin(Pos_0)];
6 Vq = 2/3*[-Va*sin(Pos_0)+Vb/2*sin(Pos_0)+Vb*sqrt(3)/2*cos(Pos_0)+Vc/2*sin(Pos_0)-Vc*sqrt(3)/2*cos(Pos_0)];
7
8
9 ids = (Vd-Rd*id_0+Lq*iq_0*we)/Ld*paso+id_0;
10 iqs = (Vq-Rq*iq_0+(Ld*id_0*we-KIP*we))/Lq*paso+iq_0;
11 Te = (3*P*iqs*KIP)/2;
12 We = (P/J)*(Te-Tl)-(B/J)*we*paso+we;
13
14 Pos = We*paso+Pos_0;
15 Wm = We/P;
16
17 Ia = ids*cos(Pos_0)-iqs*sin(Pos_0);
18 Ib = ids*cos(Pos_0-2*pi/3)-iqs*sin(Pos_0-2*pi/3);
19 Ic = ids*cos(Pos_0+2*pi/3)-iqs*sin(Pos_0+2*pi/3);

```

Figura 2. 6 Diagrama de la tercera etapa del modelo de la MSIP.

2.3 Modelo del inversor fuente de voltaje

Las simulaciones de accionamientos electrónicos de potencia como lo son inversores y convertidores son utilizadas frecuentemente para predecir con exactitud el comportamiento real de estos accionamientos. Los modelos de los inversores utilizados con fines de modelado y análisis son tres: modelo conmutado, modelo promedio y el modelo de pequeña señal.

En este trabajo se utiliza el modelo promedio del inversor de fuente de voltaje, debido a que en este modelo los efectos de altas frecuencias no son considerados, con lo que las componentes de alta frecuencia son remplazadas únicamente por su componente fundamental y sus componentes parásitas no son incluidas. El modelo promedio del inversor nos permite hacer el análisis estacionario y transitorio considerando solamente la componente fundamental [5].

El modelo promedio del inversor fuente de voltaje en el marco de referencia (abc) se muestra en la figura 2.7 donde las señales de control (d_a, d_b, d_c) tienen un valor máximo de $1/\sqrt{3}$ para que el valor pico de (d_{ab}, d_{ac}, d_{bc}) sea unitario, y de esta manera el valor pico del voltaje de línea del inversor sea igual a v_{cd} como lo se muestra en las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16.

$$i_{cd} = d_a i_a + d_b i_b + d_c i_c \quad (2.13)$$

$$v_{ab} = (d_a - d_b) * v_{cd} \quad (2.14)$$

$$v_{bc} = (d_b - d_c) * v_{cd} \quad (2.15)$$

$$v_{ac} = v_{ab} + v_{bc} \quad (2.16)$$

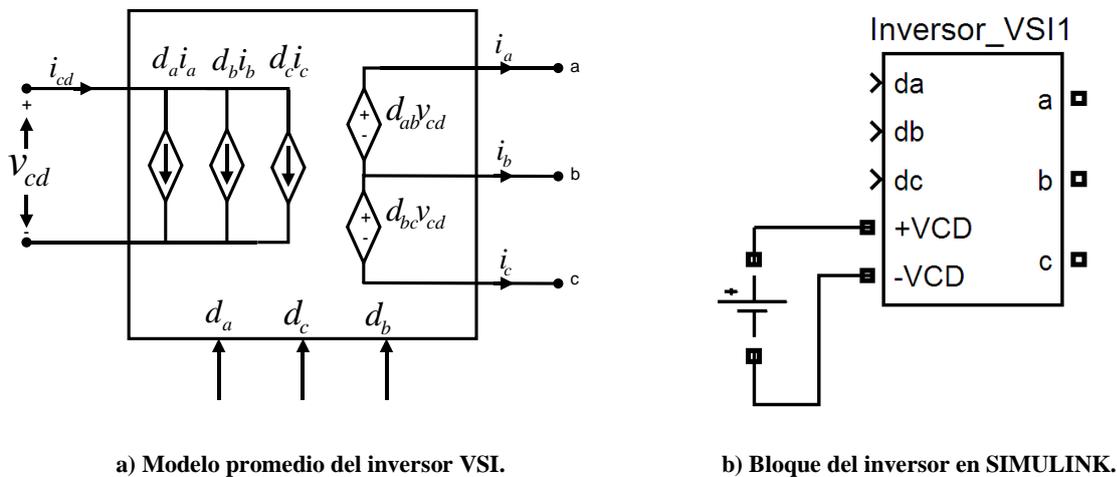


Figura 2. 7 Inversor de fuente de voltaje.

En la figura 2.8 se muestra cómo el inversor fuente de voltaje que se utilizó en la simulación obtiene las corrientes de cada fase, a través de medidores de corriente, los cuales convierten una variable eléctrica en una variable de control y se utilizan estas variables para calcular la corriente en el bus de CD a través de la ecuación (2.13). Estos cálculos se hacen en la función embebida de MATLAB.

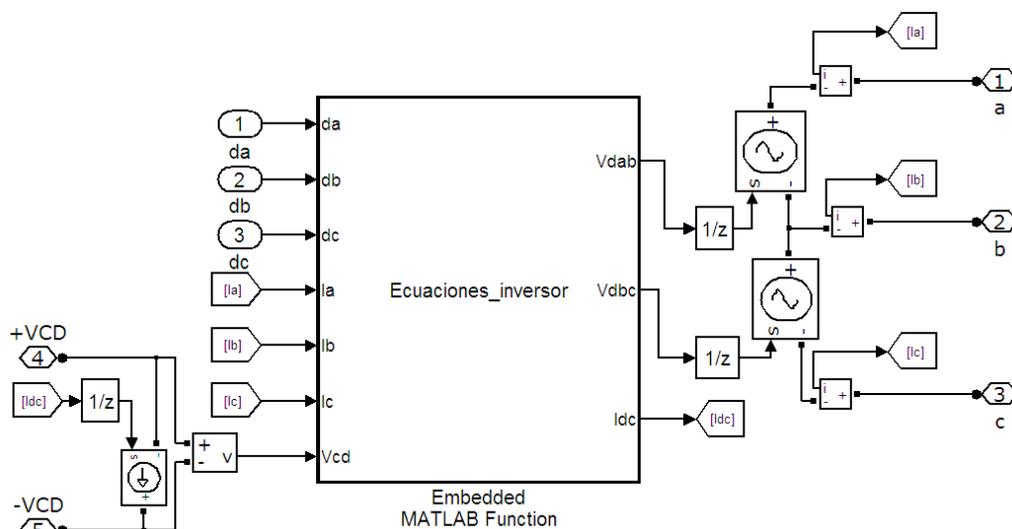


Figura 2. 8 Diagrama interno del bloque del inversor.

En la figura 2.9 se observa la función embebida de MATLAB donde se encuentran las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.15) las cuales determinan el valor de voltaje en las terminales de la MSIP y la corriente del bus de CD.

```

1 function [Vdab,Vdbc,Idc] = Ecuaciones_inversor(da,db,dc,Ia,Ib,Ic,Vcd)
2 %#eml
3
4 - Vdab=(da-db)*Vcd;
5 - Vdbc=(db-dc)*Vcd;
6 - Idc=Ia*da+Ib*db+Ic*dc;

```

Figura 2.9 Función embebida de MATLAB con las ecuaciones del inversor.

2.4 Control vectorial de la MSIP

El control vectorial surgió a principio de los setentas demostrando que el par y el flujo de una máquina eléctrica rotatoria trifásica de corriente alterna, pueden ser controlados por separado, como una máquina de corriente directa, y esto trae como consecuencia incremento en el desempeño del control de los accionamientos electrónicos de máquinas eléctricas de inducción y síncronas. El control vectorial también es conocido como control de campo orientado [3].

Para entender el principio del control vectorial es necesario asumir que la posición del fasor del flujo de rotor θ_r es conocida y que las corrientes del estator pueden ser transformadas al marco de referencia dq utilizando la matriz de transformación de Park de la ecuación (2.11), donde el fasor de corriente del estator es obtenido de la ecuación (2.17).

$$i_s = \sqrt{i_{qs}^2 + i_{ds}^2} \quad (2.17)$$

Y el ángulo del fasor de la corriente del estator está definido por la siguiente ecuación:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \right\} \quad (2.18)$$

siendo evidente que el fasor de corriente del estator produce el flujo magnético y el par electromagnético de la máquina, de tal manera que el par electromagnético de la MSIP es proporcional a la corriente i_q como lo muestra la siguiente ecuación.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_{af} i_{qs} \quad (2.6)$$

El principio del control vectorial se basa en desacoplar el par electromagnético de la máquina y el flujo magnético por medio de un algoritmo de control a través de las mediciones de las corrientes del estator y de la posición del rotor [2].

Este trabajo se enfoca en el control vectorial de la máquina, a par constante, mismo que se caracteriza por mantener el ángulo de par δ constante a 90° . Esto quiere decir que la componente de flujo (i_{ds}) y la componente de par (i_{qs}) son ortogonales entre sí, de manera que $i_s = i_{qs}$ y por consecuencia la corriente en el eje directo es igual a cero. En la figura 2.10 se muestra el diagrama fasorial de una MSIP utilizando el control vectorial a par constante.

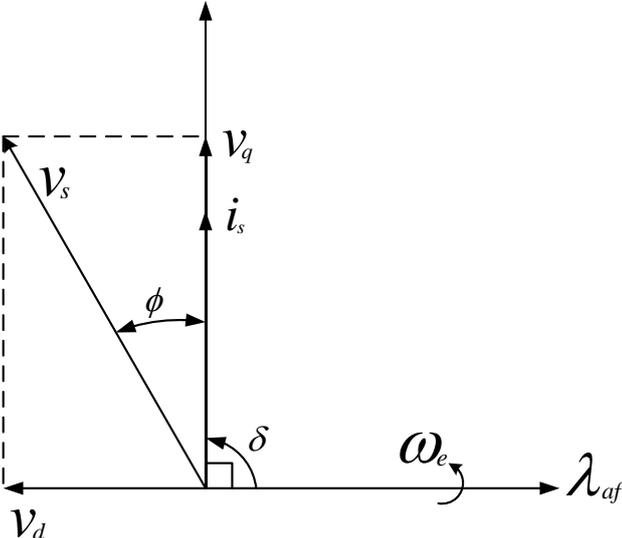


Figura 2. 10 Diagrama fasorial de la MSIP aplicando el control vectorial a par constante.

La implementación del control vectorial está compuesto por dos lazos internos para el control de las corrientes (i_{qs}, i_{ds}) y un lazo externo para el control de velocidad. Los lazos de corriente son controlados por dos controladores PI idénticos y el lazo de velocidad es conectado en cascada con el lazo de control de corriente de i_{qs} [2], el cual es retroalimentado por un sensor de velocidad. En la figura 2.11 se ilustra el diagrama de bloques del control de campo orientado.

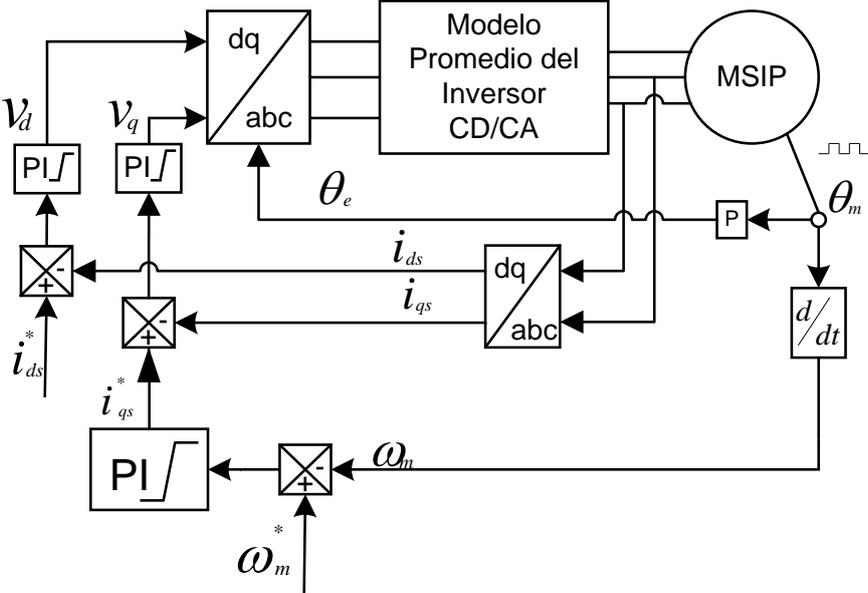


Figura 2. 11 Diagrama de bloques del control vectorial.

En la figura 2.12 se muestra el bloque del sistema de control de la MSIP que se utiliza en la simulación en MATLAB/SIMULINK. Este bloque tiene cinco terminales de entrada: la velocidad de referencia vel_ref , velocidad real vel_real , corriente id estimada id_est , corriente iq estimada iq_est y la posición del rotor $posicion$.

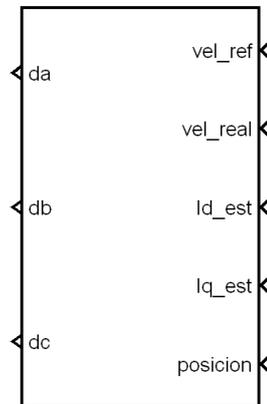


Figura 2. 12 Bloque del sistema control de la MSIP.

Las otras tres terminales restantes son de salida y son las terminales de control (da , db , dc). Estas terminales controlan el ciclo de trabajo del inversor y son generadas por el bloque de transformaciones de Park que se encuentra dentro del bloque de control. También dentro del bloque de control se encuentran tres controladores PI, uno de velocidad y dos de corriente. El controlador de velocidad se encuentra conectado en cascada con el controlador de corriente i_q . El controlador PI de velocidad recibe una señal de referencia la cual es comparada con la velocidad real de la máquina, dentro del bloque del controlador se realiza esta diferencia que da como resultado el error. Este error es afectado por las constantes proporcional e integral y la suma de las dos acciones es la señal de control que sale del controlador de velocidad y sirve como referencia del controlador de corriente i_d . El controlador PI de corriente i_d tiene una señal de referencia la cual permanece constante en cero y de esta manera es como el controlador logra mantener a la máquina trabajando a par constante. El diagrama de bloques del control de la MSIP se muestra en la figura 2.13.

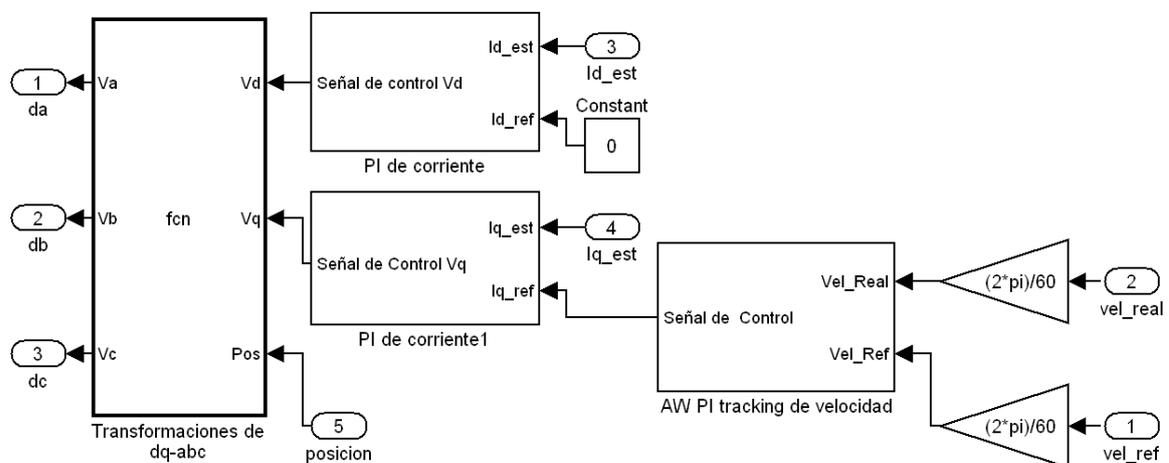


Figura 2. 13 Diagrama interno del bloque de control de la MSIP.

Dentro del sistema de control de la máquina síncrona son utilizados normalmente limitadores, para resguardar la máquina y los dispositivos electrónicos de potencia. Un ejemplo de esta implementación pueden ser los limitadores de corriente y de voltaje. La implementación de estos limitadores en el sistema de control introducen una no linealidad en la planta. Esta saturación puede causar problemas de sobretiro en el controlador, cuando este intenta exceder los límites de la saturación particularmente en aplicaciones de alto desempeño, lo cual ocurre frecuentemente cuando se lleva a cabo la implementación [10].

El principal objetivo del controlador AW PI tracking es eliminar el indeseable fenómeno del sobretiro, el principio de funcionamiento del PI se basa en utilizar la diferencia entre la entrada y la salida del bloque de saturación, para reducir el valor de la acción integral. Esta diferencia existe únicamente cuando la señal de control es mayor que los límites de la saturación [10]. La saturación es igual a la corriente nominal de la máquina. En la figura 2.14 se muestra el controlador AW PI tracking utilizado en la simulación.

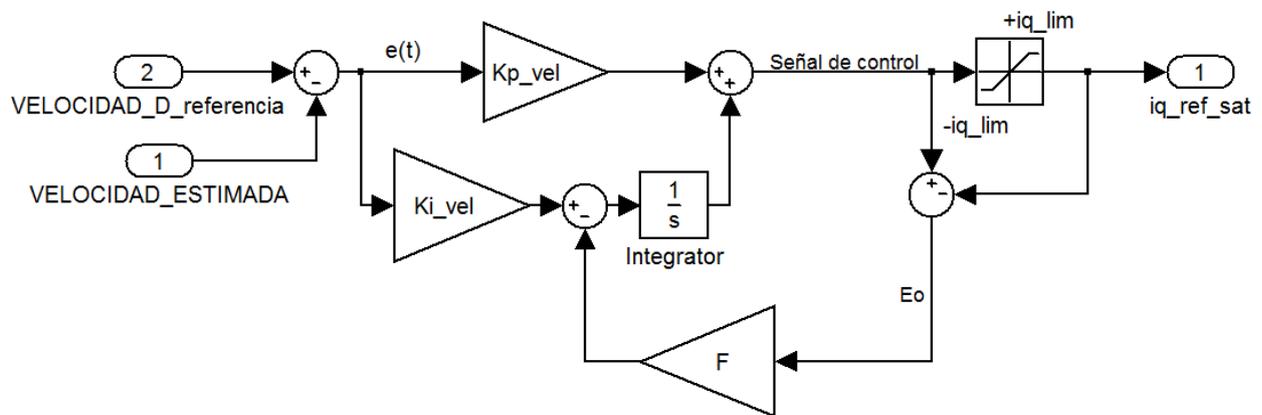


Figura 2. 14 Controlador AW PI tracking.

Este controlador se puede expresar por la ecuación 2.19 [10].

$$i_{qref}(t) = \begin{cases} k_p e(t) + k_i \int e(t)dt, & E_o = 0 \\ \text{sign}(E_o)|i_{q_lim}|, & E_o \neq 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Donde:

k_{i_vel} = Ganancia integral del controlador.

k_{p_vel} =Ganancia proporcional del controlador.

E_o = Diferencia entre la señal de control y la señal $i_{q_ref_sat}$.

i_{q_lim} = Límite de la corriente i_{qs} .

$e(t)$ = Error de velocidad.

F = Ganancia de la retroalimentación.

En la figura 2.14 se ilustra el controlador AW PI tracking, el cálculo de las variables del controlador k_{i_vel} y k_{p_vel} se encuentran en el apéndice A. La ganancia de retroalimentación F también es llamada constante de tiempo seguidor, y una regla probada para asignar el valor de la ganancia de retroalimentación es frecuentemente $F= k_{i_vel}$, pero en algunos casos valores menores puede dar mayores mejoras en el desempeño [11].

Las señales (i_{qs} , i_{ds}) son obtenidas a través del bloque de transformaciones de Park que se ilustra en la figura 2.15 este bloque se encuentra entre el inversor y la MSIP, de esta manera ese bloque mide las corrientes trifásicas de la máquina (abc) para hacer la transformación al marco de referencia dq .

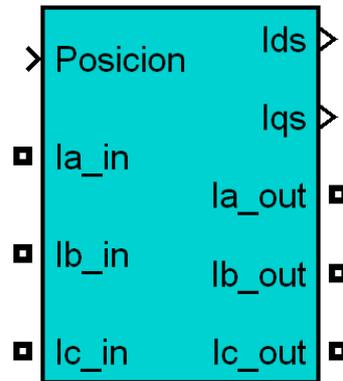


Figura 2. 15 Bloque de transformaciones de Park.

En la figura 2.16 se muestra el diagrama interno del bloque de transformaciones de Park donde se encuentran tres medidores de corriente los cuales hacen un cambio en el tipo de variable, convirtiendo una señal eléctrica en una señal de control. Después de hacer el cambio de variable entran a una función embebida de MATLAB la cual se encarga de hacer las transformaciones de Park. Para llevar a cabo las transformaciones es necesario conocer la posición del rotor por lo tanto este bloque cuenta con una entrada por medio de la cual es introducido el valor de la posición. La ecuación matricial utilizada para la transformación es la (2.11), una vez que se tengan las corrientes en el marco de referencia dq , éstas salen por las terminales i_{qs} y i_{ds} .

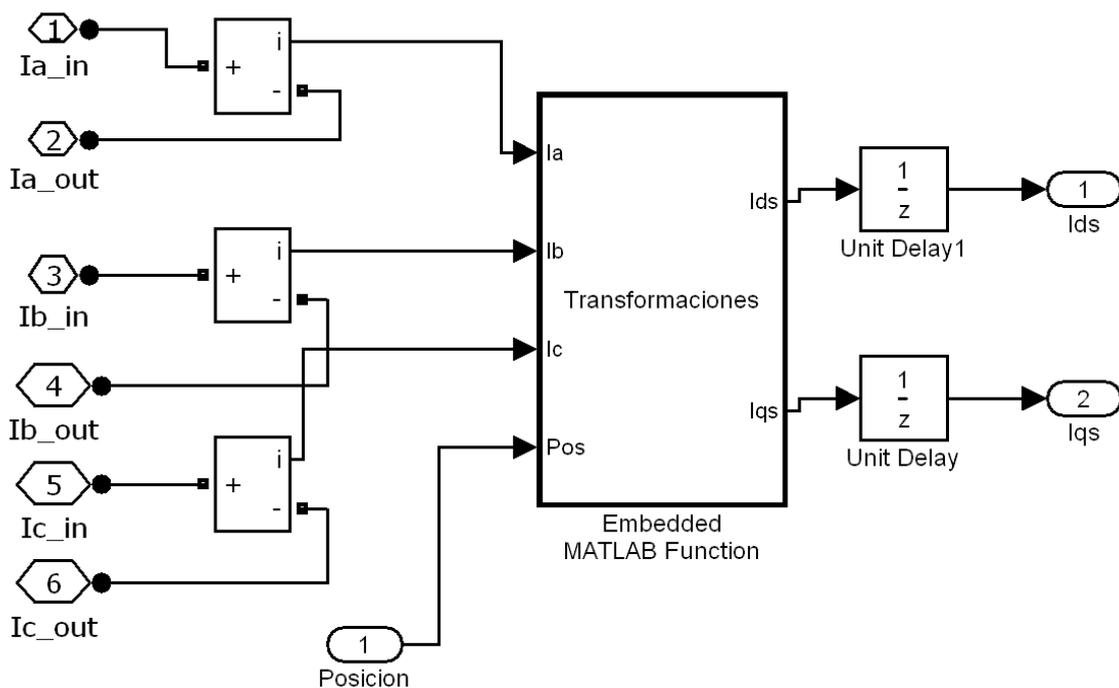


Figura 2. 16 Diagrama interno del bloque de transformaciones de Park.

En la figura 2.17 se observa la función embebida de MATLAB donde se programa la ecuación matricial (2.11) sin embargo cabe hacer mención que es necesario tener las corrientes de fase (Ia, Ib, Ic,) y la posición del rotor en cada iteración para realizar las transformaciones de Park.

```

1 function [Ids, Iqs] = Transformaciones (Ia, Ib, Ic, Pos)
2 %#eml
3
4 Ids = 2/3*[Ia*cos(Pos)-Ib/2*cos(Pos)+Ib*sqrt(3)/2*sin(Pos)-Ic/2*cos(Pos)-Ic*sqrt(3)/2*sin(Pos)];
5
6 Iqs = 2/3*[-Ia*sin(Pos)+Ib/2*sin(Pos)+Ib*sqrt(3)/2*cos(Pos)+Ic/2*sin(Pos)-Ic*sqrt(3)/2*cos(Pos)];

```

Figura 2. 17 Función embebida de las transformaciones de Park.

2.4.1 Simulación del control vectorial de una MSIP

El diagrama de bloques que se muestra en la figura 2.18 es el que se utilizó en la simulación del control vectorial a par constante de una MSIP la cual tiene un paso de integración de $10\mu s$. En esta simulación se programa la velocidad de referencia la cual va cambiando con el tiempo al igual que la señal del par de carga de la máquina siendo el sistema de control el encargado de aproximar la velocidad real a la velocidad de referencia a pesar de que existan cambios drásticos en el par de carga de la máquina.

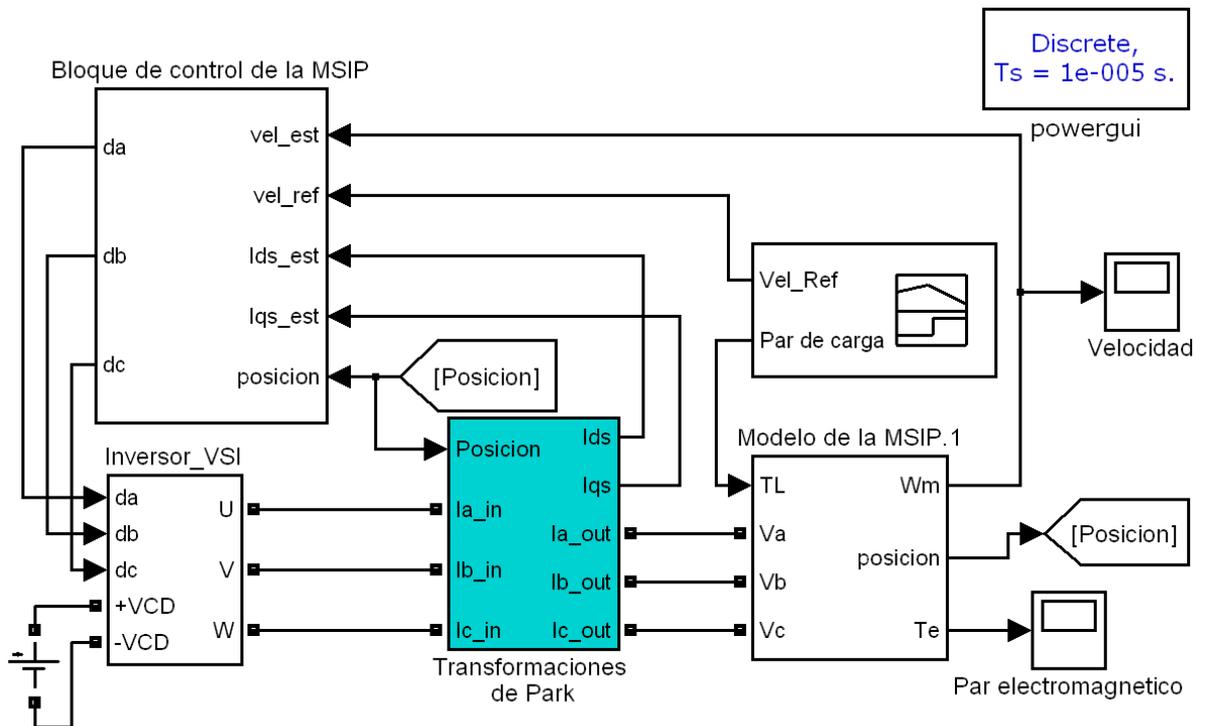


Figura 2. 18 Diagrama global de la simulación del control vectorial de una MSIP.

2.5 Simulación del sistema máquina motriz-electrodinómetro.

Una vez que se obtuvo en la simulación el sistema de control de una MSIP, se incluyó el acoplamiento mecánico de la máquina de carga, sin embargo el sistema de control del electrodinómetro no incluye el lazo de control de velocidad ya que esta máquina solo tiene control de par electromagnético esto quiere decir que el control de la máquina de carga solo tiene dos controladores PI uno para el control de la corriente i_d y otro para el control de la corriente i_q . En el control de la máquina de carga se envía una señal de referencia de par al controlador PI de corriente i_q y el controlador PI de corriente i_d tiene como señal de referencia un valor constante de cero. La diferencia entre el modelo de la máquina de carga y la máquina motriz es que la velocidad de la máquina de carga es retroalimentada de la máquina motriz debido a que las velocidades en ambas máquinas son iguales pero con signos opuestos. El diagrama de bloques de la simulación del control vectorial de la MSIP y del sistema máquina motriz-electrodinómetro se puede observar en la figura 2.19.

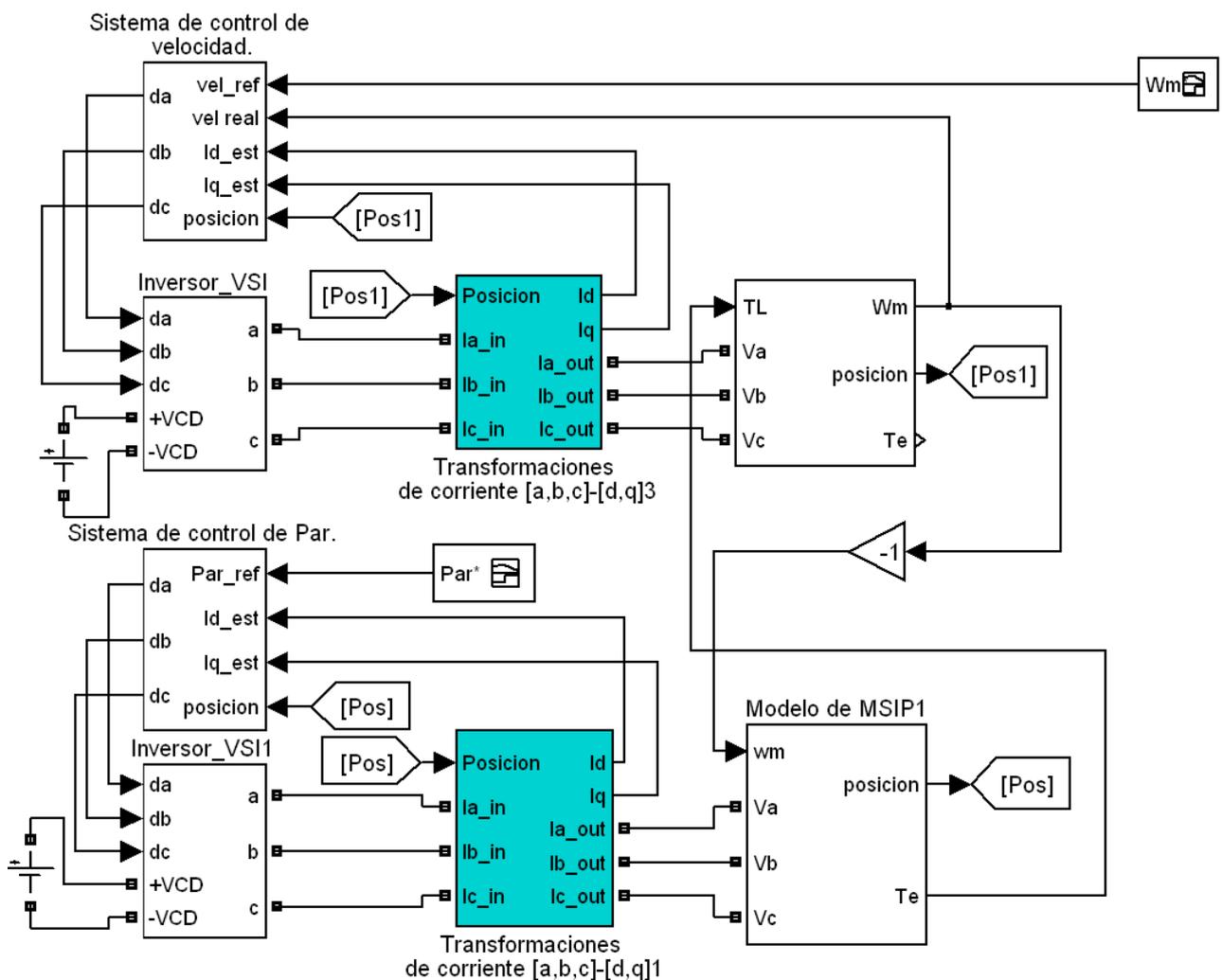


Figura 2. 19 Diagrama de bloques del sistema máquina motriz-electrodinómetro.

2.6 Modelo del vehículo eléctrico

Los fundamentos matemáticos de operación del vehículo describen su comportamiento, basado principalmente en principios mecánicos. Un vehículo, consiste en cientos de componentes, por lo tanto es un sistema complejo. Para describir completamente este comportamiento es necesario un conocimiento matemático y mecánico complejo [12]. Las fuerzas actuantes en el vehículo, que se toman en cuenta para el modelado del vehículo son: la fuerza de fricción, la resistencia aerodinámica del vehículo, la componente de fuerza de gravedad en caso de tener un plano inclinado y la fuerza de aceleración las cuales se describirán a continuación.

La fuerza de fricción se define como la fuerza de rozamiento entre dos superficies de contacto y se opone al movimiento entre estas superficies y es generada principalmente por las imperfecciones que existen entre las superficies de contacto. La fuerza de fricción que existe en el centro de los baleros de la llanta está en función del peso del vehículo mg , el coeficiente de fricción k_r y el ángulo de inclinación de la calle α y se describe por la ecuación 2.20 [12].

$$F_r = mgk_r \cos\alpha \quad (2.20)$$

Cuando el automóvil se mueve a una determinada velocidad, el aire opone una resistencia a este movimiento. Esta fuerza es conocida como resistencia aerodinámica F_a , y está en función de la velocidad lineal del vehículo V , el área frontal del vehículo A_f , la densidad del aire ρ , y el coeficiente aerodinámico de arrastre C_D , esta fuerza se puede expresar como lo indica la ecuación (2.21). Cabe mencionar que en esta ecuación no se considera la velocidad del viento [12]. Las unidades de los parámetros que modelan al vehículo se encuentran en la tabla 2.1.

$$F_a = \frac{1}{2}\rho A_f C_D V^2 \quad (2.21)$$

Otra fuerza que actúa sobre el vehículo es la componente de la fuerza de gravedad F_p , la cual aparece cuando el automóvil se encuentra en un plano inclinado, en ese momento el peso del vehículo produce una componente de fuerza, paralela a la cuesta y siempre con dirección hacia abajo. Esta componente se opone al movimiento cuando la cuesta es hacia arriba o favorece al movimiento cuando la cuesta es hacia abajo. Esta fuerza está en función de la masa del vehículo m , la aceleración de la gravedad g , y el ángulo de inclinación de la superficie α . La fuerza pendiente se define por la ecuación (2.22) [12].

$$F_p = mg \cdot \text{sen}\alpha \quad (2.22)$$

La fuerza de aceleración F_{ac} , está en función de la masa del vehículo m , y la aceleración $\frac{dV}{dt}$. La cual se puede expresar como lo muestra la ecuación (2.23).

$$F_{ac} = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2.23)$$

La sumatoria de fuerzas que actúan sobre el vehículo, se puede expresar con la ecuación (2.24).

$$F_d = F_r + F_a + F_p + F_{ac} \quad (2.24)$$

Habiendo determinado las fuerzas que actúan sobre el vehículo, se puede calcular el par en el eje de las llantas con la ecuación (2.25), esta ecuación está en función de la inercia de las llantas j_w , velocidad angular de las llantas ω_w , factor de distribución d_f , radio de la llanta r_w , y la fuerza resultante de las fuerzas que actúan en el vehículo F_d .

$$T_w = J_w \cdot \frac{d\omega_w}{dt} + d_f \cdot r_w \cdot F_d \quad (2.25)$$

El par en la flecha de la máquina eléctrica, que tracciona al vehículo está en función de, la inercia del rotor j_m , la velocidad angular del rotor ω_m , el par en el eje de las llantas T_w , relación de engranaje de la transmisión r_t , y la eficiencia de la transmisión e_f y se expresa en la ecuación (2.26).

$$T_m = j_m \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{1}{r_t \cdot e_f} T_w \quad (2.26)$$

Cabe señalar que las ecuaciones que definen velocidad angular de la llanta ω_w y la velocidad angular del rotor de la máquina eléctrica ω_m están en función de la velocidad lineal V , radio de la llanta r_w y la relación de engranaje r_t , y se definen por las ecuaciones (2.27) y (2.29).

$$\omega_w = \frac{V}{r_w} \quad (2.27)$$

$$\omega_m = r_t \frac{V}{r_w} \quad (2.28)$$

Después de obtener estas ecuaciones en la literatura, se hacen las sustituciones de las ecuaciones correspondientes en la ecuación (2.26) y se obtiene la ecuación del par en la flecha de la máquina eléctrica y queda expresada en la ecuación (2.28).

$$T_m = \left[\left(\frac{r_t \cdot j_m}{r_w} \right) + \left(\frac{j_w}{r_t \cdot e_f \cdot r_w} \right) + \left(\frac{d_f \cdot r_w \cdot m}{r_t \cdot e_f} \right) \right] \frac{dV}{dt} + \frac{d_f \cdot r_w}{r_t \cdot e_f} \left[(K_r \cdot \cos\alpha + \text{sen}\alpha) \cdot mg + \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 \right] \quad (2.29)$$

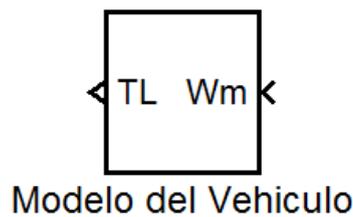
La ecuación 2.28 es utilizada en la simulación e implementación para emular la carga de un vehículo. La ecuación 2.28 está en función de la aceleración y velocidad lineal del vehículo, por lo tanto los demás parámetros de la ecuación permanecen constantes cuando se está realizando la emulación del vehículo, sin embargo se pueden modificar estos parámetros para configurar diferentes tipos de vehículos o diferentes condiciones de manejo. Las unidades de medición de los parámetros que definen al modelo del vehículo se describen en la tabla 2.1.

Aceleración	m/s ²
Inercia	kgm ²
Radio de llantas	m
Densidad del aire	kg/m ³
Área frontal del vehiculó	m ²
Masa	kg
Angulo de inclinación	rad.

Tabla 2. 1 Unidades de medida de los parámetros del vehiculó.

En la figura 2.20 A se muestra el bloque del modelo del vehículo que se encuentra en la Simulación. Dentro de este bloque se encuentra una función embebida de MATLAB a la cual le ingresan todos los parámetros que aparecen en la ecuación 2.29 esto se puede observar en la figura 2.20 B.

A) Bloque del modelo del Vehículo



B) Parte interna del bloque del modelo del Vehículo

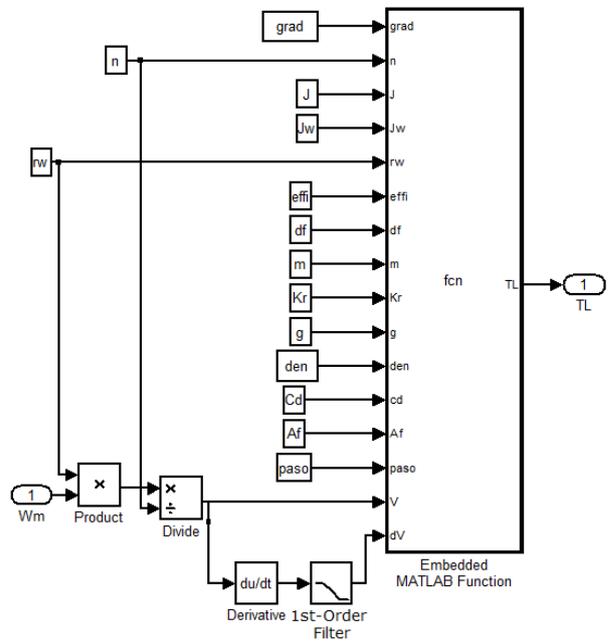


Figura 2. 20 Bloque del modelo del vehículo.

En la figura 2.21 se ilustra la función embebida donde se encuentra la ecuación (2.29) que modela al vehículo, la ecuación 2.29 se encuentra dividida en cinco términos (T1, T2, T3, T4 y T5) pero posteriormente en el renglón ocho de la función embebida se hace la sumatoria de estos términos para obtener el par de referencia de la máquina de carga.

```

1 function TL = fcn(grad,n,J,Jw,rw,effi,df,m,Kr,g,den,cd,Af,paso,V,dV)
2
3 - T1 = (n*J)/rw + (Jw/(n*effi*rw)) + ((df*rw*m)/(n*effi));
4 - T2=T1*dV;
5 - T3=(df*rw)/(n*effi);
6 - T4=(Kr*cos(grad)+sin(grad))*(m*g);
7 - T5=.5*den*cd*Af*(V^2);
8 - TL=T2+T3*T4+T3*T5;
9

```

Figura 2. 21 Programación de la ecuación del vehículo.

En la figura 2.22 se muestra que el modelo del vehículo es utilizado para generar la señal de referencia de par de la máquina de carga. El modelo del vehículo requiere la retroalimentación de la velocidad de la máquina motriz, para posteriormente utilizar la ecuación 2.28 y convertir la velocidad de la maquina, en velocidad lineal del vehículo esto se puede observar en la figura 2.20 B. El cálculo obtenido en el modelo del vehículo ingresa al sistema de control de par del electrodinamómetro para convertirse en la carga de la máquina motriz, emulando de esta manera el comportamiento del vehículo.

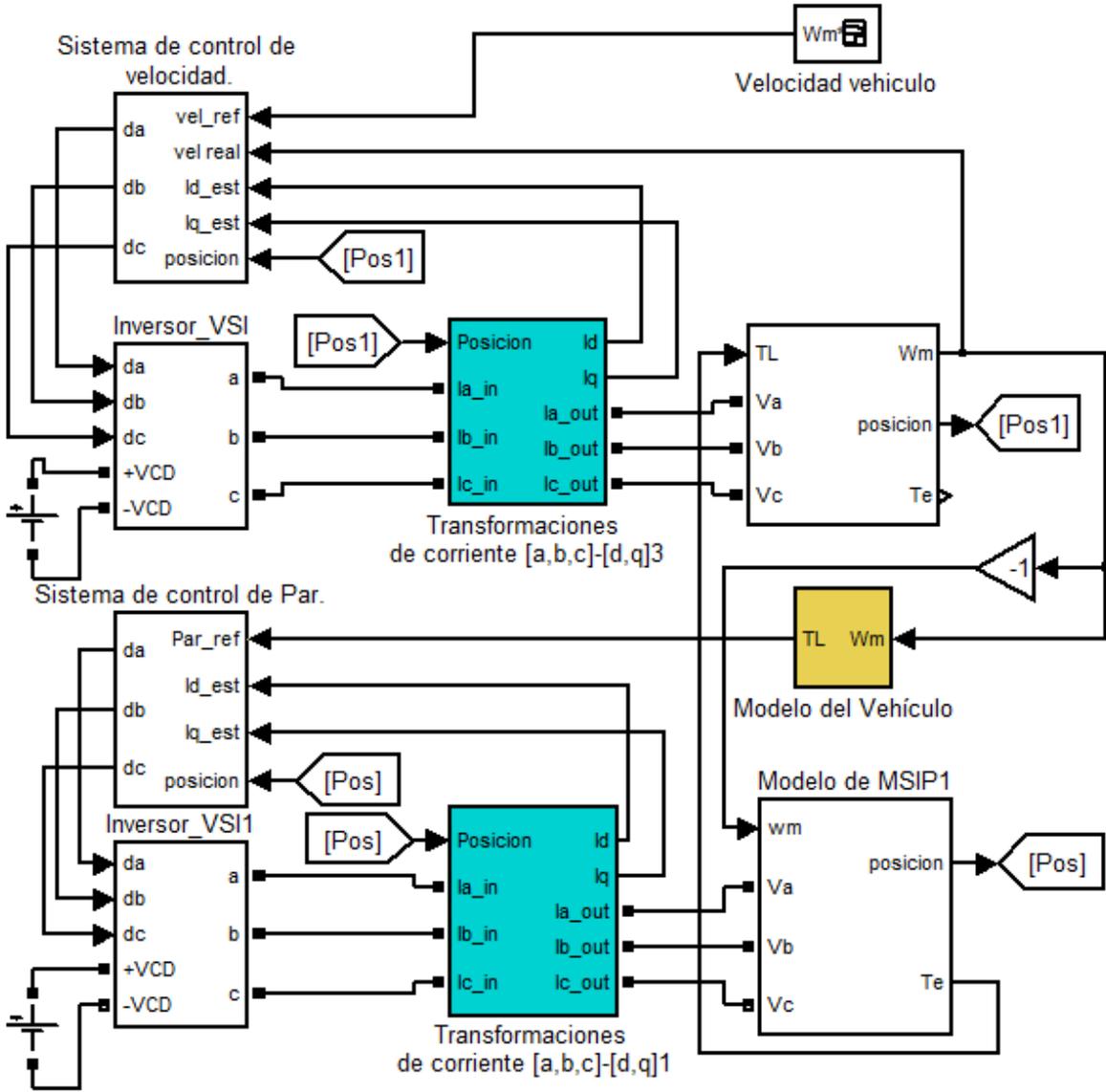


Figura 2. 22 Diagrama de bloques de la simulación del sistema máquina motriz-electrodinamómetro considerando como carga el vehículo eléctrico.

Si se compara la figura 2.22 con la figura 2.19 se puede observar que la diferencia es básicamente la manera en que se genera la señal de referencia de par de la máquina de carga ya que en la figura 2.19 el par de referencia es generado por una señal configurada previamente y en la figura 2.22 la señal de referencia va depender del comportamiento de la velocidad de la máquina motriz y de los parámetros de configuración del vehículo.

2.7 Resultado de la simulación del control vectorial de una MSIP

En la figura 2.23 se muestran los voltajes de fase que alimentan la MSIP durante un arranque. Al inicio de la simulación se pueden apreciar que los valores de voltajes son relativamente altos, esto se debe a que los controladores PI que se están utilizando en la simulación no incluyen la saturación, y como consecuencia estos valores pudieran dañar al sistema de control. En una implementación por lo tanto con la intención de limitar los valores de sobre voltaje y obtener un mejor desempeño en el control de la máquina se limita el valor máximo de salida del controlador PI [6].

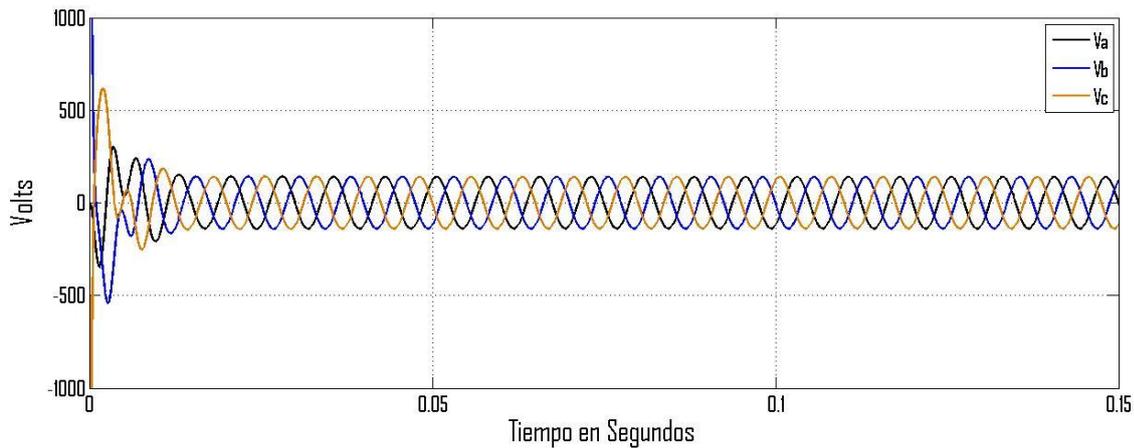


Figura 2. 23 Gráfica de los voltajes de fase de alimentación de la MSIP sin anti-windup.

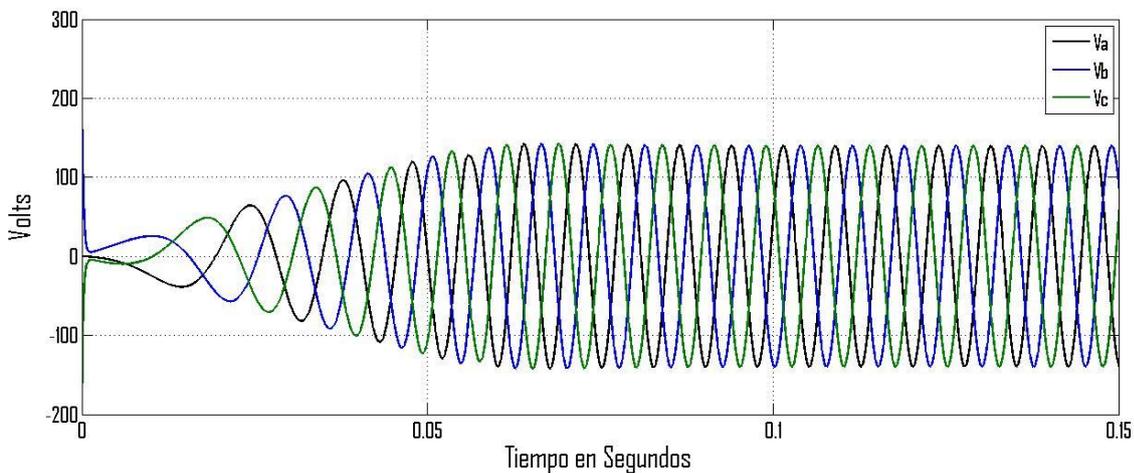


Figura 2. 24 Gráfica de los voltajes de alimentación con controlador PI anti-windup.

En la figura 2.24 se puede observar que los valores picos de los voltajes de alimentación de la MSIP no rebasa el valor máximo que puede suministrar un inversor fuente de voltaje utilizando la modulación con vectores espaciales, la cual está definida por la siguiente ecuación [5]:

$$v_{smax} = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{cd} \quad (2.20)$$

El comportamiento de la velocidad de la MSIP también es afectada por la respuesta de los controladores PI cuando no cuentan con una saturación en la salida lo cual se puede ver en la figura 2.25 en la cual se muestra un sobretiro en la velocidad como respuesta a una señal de referencia de tipo escalón.

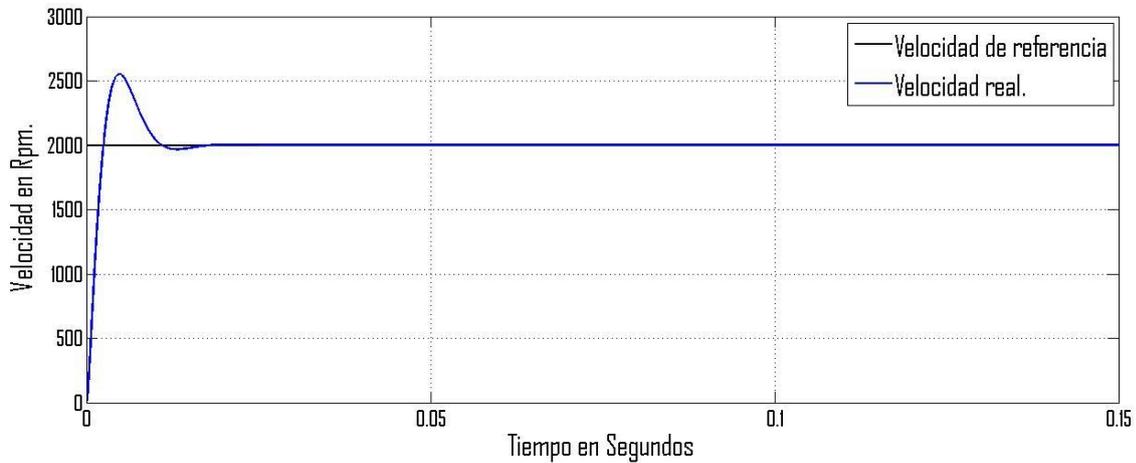


Figura 2. 25 Velocidad de la MSIP con controlador PI sin anti-windup.

Después de implementar el controlador PI con anti-windup el sistema de control muestra una mejora considerable en cuanto la reducción del sobretiro de la velocidad y los voltajes de la máquina, sin embargo se sacrifica el tiempo de respuesta ya que el tiempo en el que alcanza la velocidad de referencia es mayor, este comportamiento se ilustra en la figura 2.26.

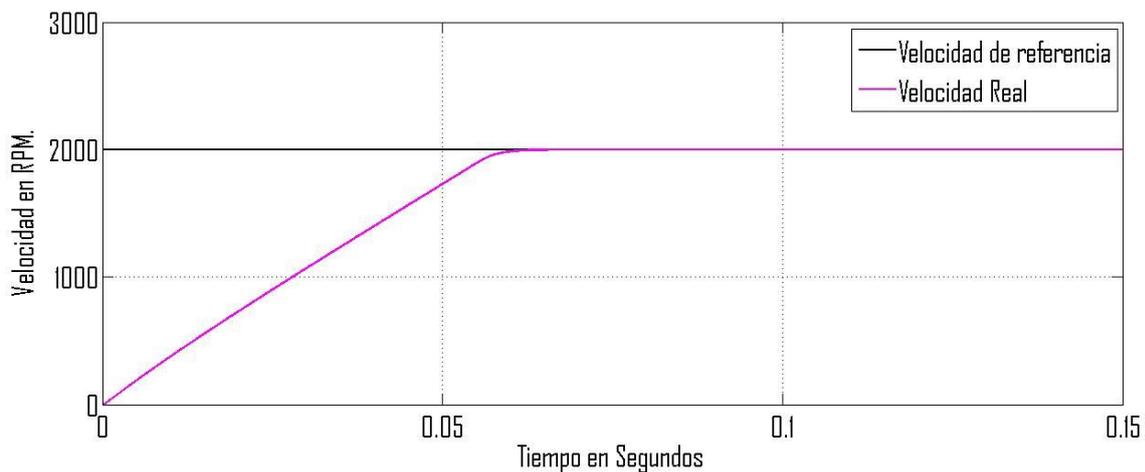


Figura 2. 26 Comportamiento de la velocidad con controlador PI con Anti-windup.

La función principal del controlador PI con anti-windup es la de evitar que el valor que proviene del integrador sea un valor muy alto, lo que hace el anti-windup es limitar el rango de ese valor a través de un bloque de saturación mismo que se encuentran dentro de las librerías de MATLAB/SIMULINK [6].

La utilización del marco referencia dq en el control vectorial es esencial, esta transformaciones se realizan utilizando el bloque de transformaciones de Park a continuación se muestran las corrientes y voltajes en el marco de referencia qd utilizando un sistema de control con anti-windup.

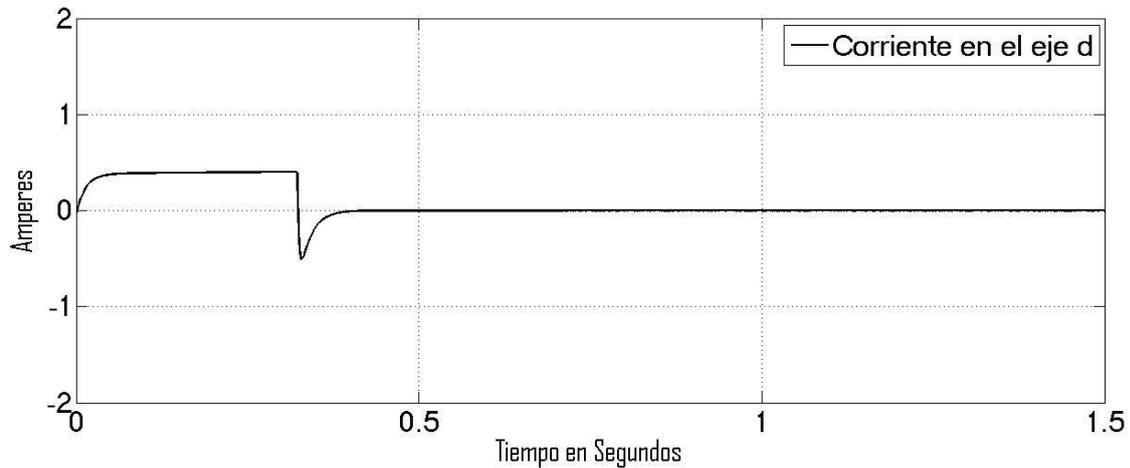


Figura 2. 27 Corriente en el eje directo en el marco de referencia dq.

En la figura 2.27 se muestra que los valores de la corriente i_d son diferentes a cero, esto quiere decir que en los transitorios de la máquina los vectores de corriente i_d e i_q no se encuentran a 90° uno con respecto a otro, sin embargo el sistema de control actúa para mantenerlos los vectores de corriente ortogonales, lo cual ocurre cuando el valor de la corriente i_d es igual a cero.

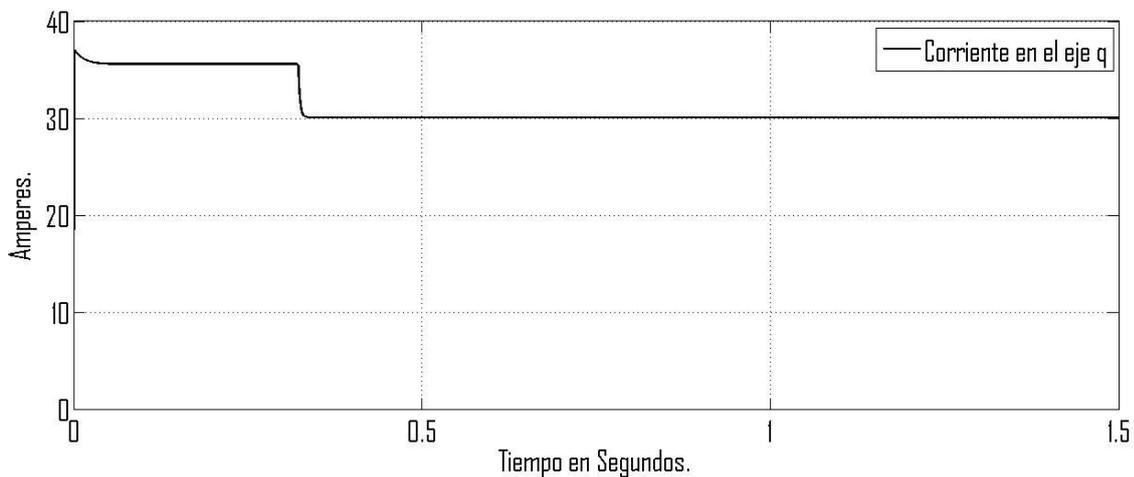


Figura 2. 28 Corriente en el eje de cuadratura en al marco de referencia dq.

En la figura 2.28 se puede observar un comportamiento transitorio en los primeros 0.33 segundos aproximadamente, después de ese lapso de tiempo, la máquina tiene un comportamiento en estado estable. Esto se debe a que en los primeros 0.33 segundos el sistema de control actúa sobre la máquina para alcanzar la velocidad de referencia, una vez que alcanza la velocidad de referencia la maquina se estabiliza y ahí permanece sin cambio alguno ya que el par de carga tampoco tiene cambios.

En la figura 2.29 se muestran los voltajes en el marco de referencia dq , la respuesta de estos voltajes se obtiene después de haber implementado los controladores PI con anti-windup.

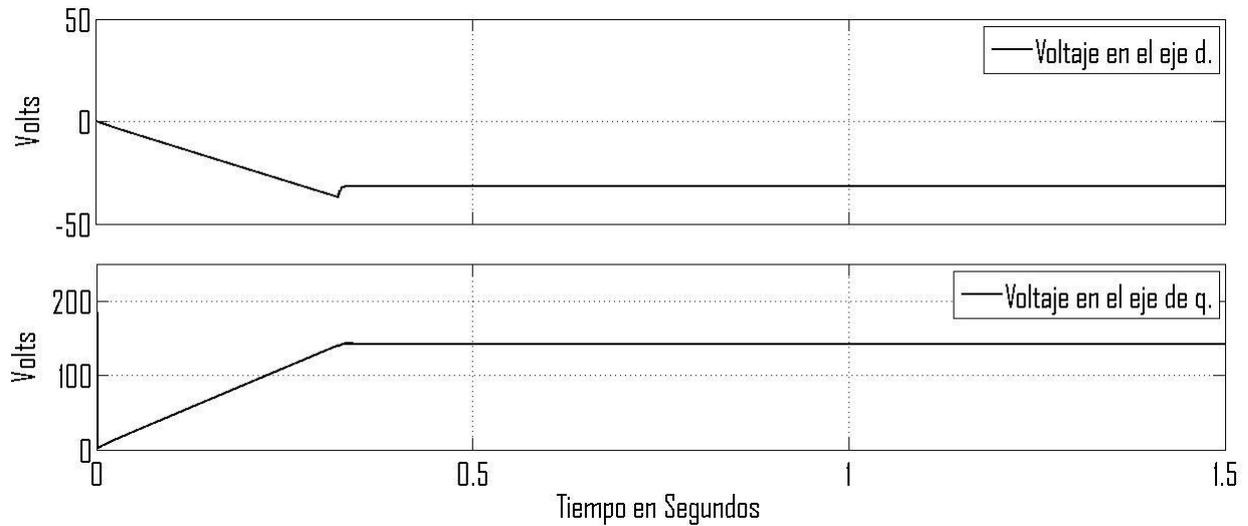


Figura 2. 29 Voltajes en el marco de referencia dq.

Hasta este momento solo se ha analizado el comportamiento del sistema de control con una velocidad de referencia constante incluyendo un arranque y con un par de carga constante a continuación se analizara el desempeño del sistema de control con una velocidad de referencia variante en el tiempo y par de carga constante de tal manera que se podrá hacer una mejor evaluación del sistema de control.

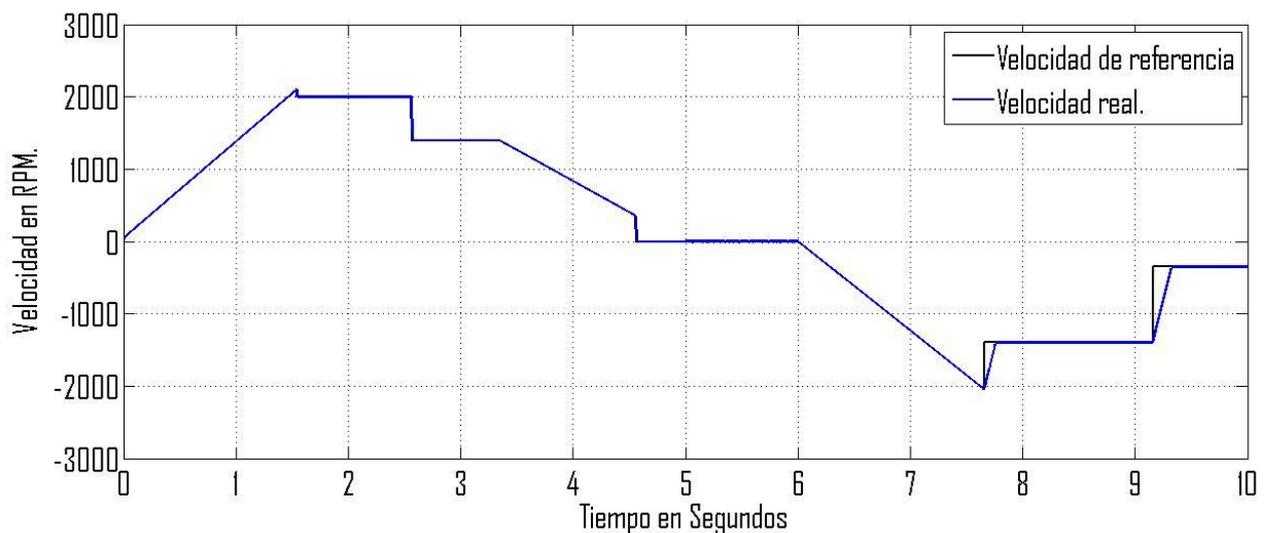


Figura 2. 30 Comportamiento del sistema de control de velocidad de la MSIP.

En la figura 2.30 se observa un comportamiento aceptable en el control de la máquina cuando la velocidad de referencia cambia en forma de rampa, y cuando se tiene una señal tipo escalón se puede apreciar que desaparecen los sobretiros en la velocidad que aparecerían en la figura 2.25 pero, existe un tiempo de retardo para alcanzar la velocidad de referencia, lo cual significa que la implementación del anti-windup en los controladores tiene una respuesta satisfactoria.

En la figura 2.31 se muestra el par electromagnético de la MSIP, el par de carga de la máquina es constante e igual a 30 Nm. Sin embargo hay momentos en los cuales existen transitorios esto se debe a que el par electromagnético debe ser mayor que el par de carga cuando requiere acelerar o menor que el par de carga cuando requiere desacelerar la maquina, observando claramente que la máquina no supera su pico máximo de par 123Nm.

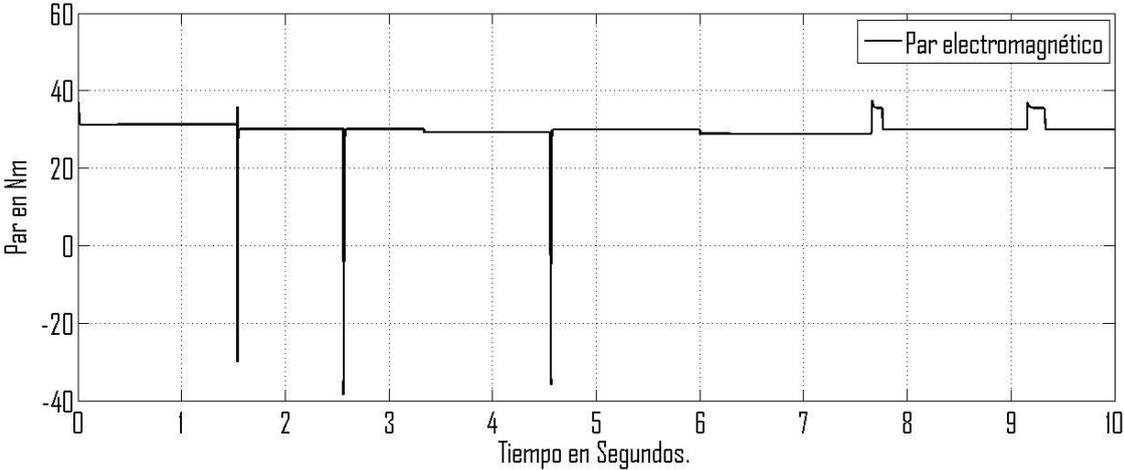


Figura 2. 31 Par electromagnético de la MSIP.

2.8 Resultado de la simulación del electrodinamómetro.

En esta parte del capítulo se analizará el comportamiento del sistema de control de la máquina de carga, en la figura 2.32 se puede ver que al iniciar la simulación el par electromagnético de la máquina de carga se aproxima al par de referencia para posteriormente alcanzar la referencia, indicando que la sintonización de los controladores PI con anti-windup es correcta, ya que presenta un buen comportamiento en estado estable y en estado transitorio. El par electromagnético que se muestra en la figura 2.28 se puede ver como el par de referencia cambia súbitamente de positivo a negativo y no tiene efectos negativos en el sistema de control de par.

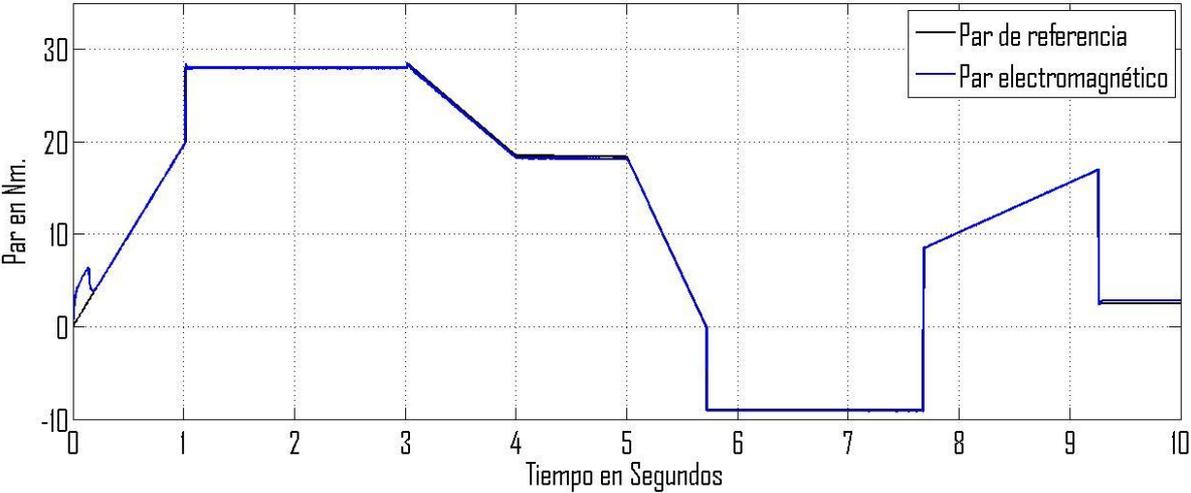


Figura 2. 32 Comportamiento del par de la máquina de carga.

En la figura 2.33 se muestran los voltajes trifásicos de alimentación de la máquina de carga (electrodinómetro) esta figura muestra que los valores de voltajes que alimentan la máquina de carga no exceden los valores nominales de la máquina, de esta manera se puede concluir que los valores de saturación limitan correctamente el voltaje de la MSIP.

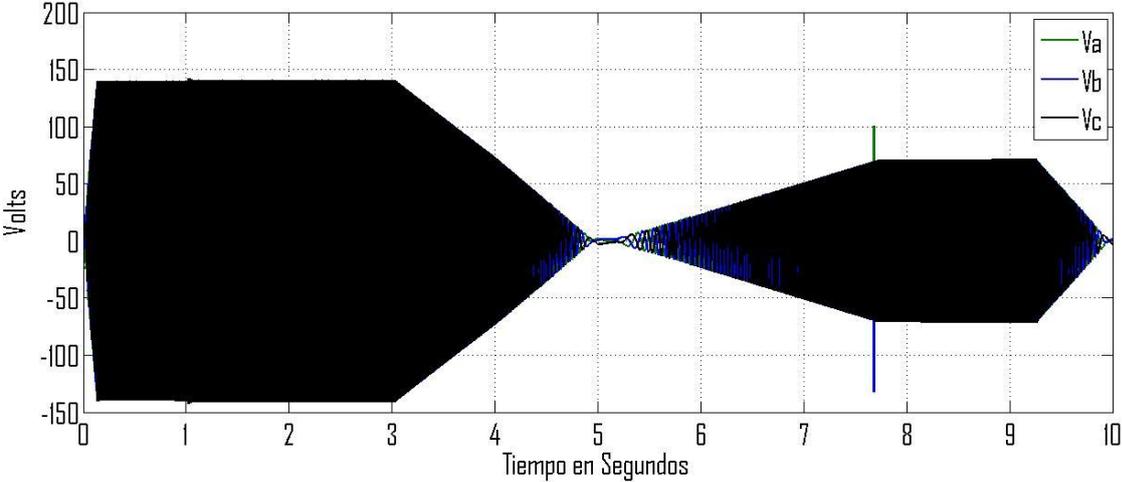


Figura 2. 33 Voltajes de alimentación de MSIP en el marco de referencia abc.

En la figura 2.34 se muestran los voltajes de alimentación de la máquina de carga en el marco de referencia dq. Los cambios que sufren los voltajes de alimentación es la respuesta del sistema de control para alcanzar el par de referencia.

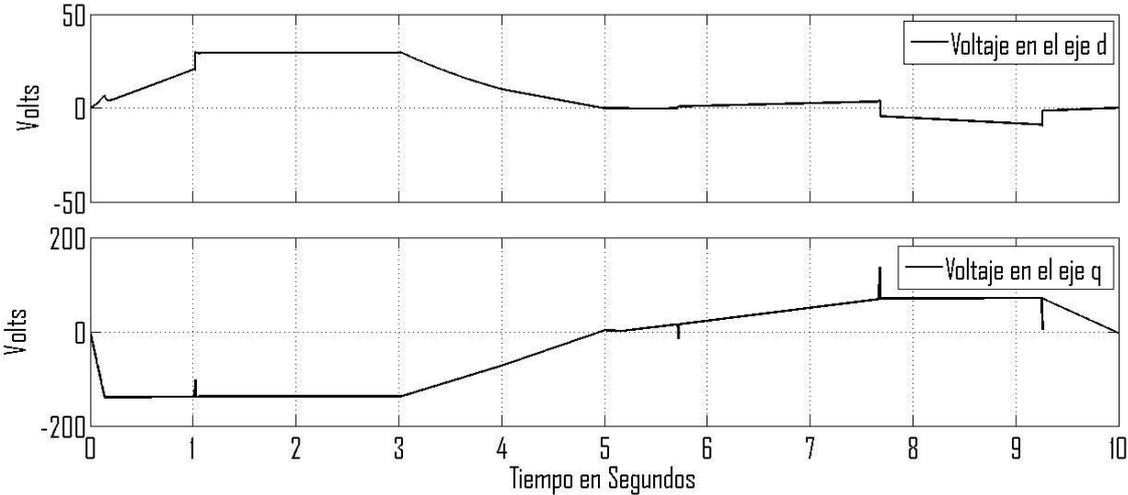


Figura 2. 34 Voltajes de alimentación de la MSIP en el marco de referencia dq.

Para realizar las transformaciones de los voltajes de alimentación del marco de referencia abc al marco de referencia dq se habilitó una salida en el modelo de la MSIP ya que dentro del modelo de dicha máquina se realiza el cálculo los voltajes v_d y v_q .

En la figura 2.35 se muestra el comportamiento de la velocidad de la máquina motriz pudiendo demostrar que el desempeño del control es adecuado para una implementación.

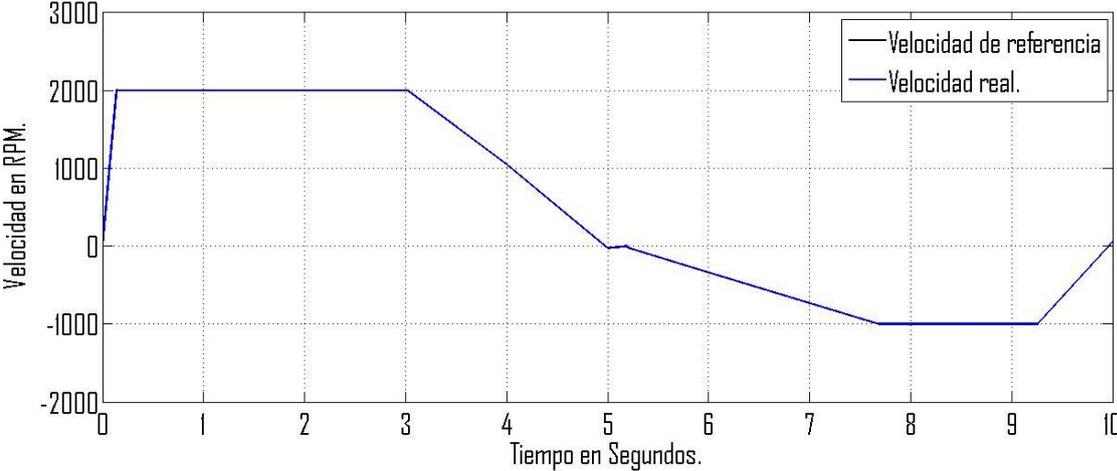


Figura 2. 35 Comportamiento de la velocidad de la máquina motriz.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MÁQUINA MOTRIZ-ELECTRODINAMÓMETRO

3.1 Introducción

En este capítulo se hace una descripción breve de cada uno de los componentes que forman parte del sistema máquina motriz-electrodinamómetro, se inicia describiendo las características, datos de placa y dimensiones de la máquina síncrona de imanes permanentes, después se continua con las especificaciones y configuración de los accionamientos electrónicos o mejor conocidos como variadores de velocidad y por último se concluirá describiendo las características de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211.

Este capítulo no tiene la intención de sustituir los manuales de usuarios de estos elementos, sino de resaltar los aspectos más relevantes que caracterizan a estos como: configuración que se utilizó específicamente para esta aplicación, diagramas de conexión, especificaciones de placa etc.

3.2 Especificaciones de la máquina síncrona de imanes permanentes

La máquina síncrona de imanes permanentes que se utilizó en la implementación del electrodinamómetro tiene las siguientes características que se ilustran en la tabla 3.1.

Modelo:	190E2D200BACAA215320
Tamaño:	190
Tensión nominal:	220 V
Par nominal:	36.9 Nm.
Pico máximo de par:	123 Nm.
Par a rotor bloqueado:	41.1 Nm.
Velocidad nominal:	2000 r/min.
Conector:	90° fijo.
Retroalimentación:	Encoder incremental de 4096 ppr.
Inercia:	86.4 kgcm ² .
Peso del motor:	33.9 kg.
Potencia nominal:	7.73 kW.
Resistencia del estator:	.15 Ω.
Inductancia del estator:	2.5 mH.
Constante de par <i>kt</i> :	1.4 Nm/A.
Constante de voltaje:	85.5 V/krpm.

Tabla 3. 1 Especificaciones de la MSIP.

La MSIP es de la marca Control Techniques de la familia Unimotor FM, la cual es apropiada para un amplio rango de aplicaciones industriales, esto se debe principalmente a sus características, como:

- Rango de par: 0.72 Nm a 136 Nm.
- Diferentes conectores: ejemplo vertical, de 90° fijo, 90° giratorio.
- Diferentes diámetros de flechas.

- Baja inercia para un mejor desempeño dinámico.
- Opciones de motores con un alto pico de par (5 veces el par nominal).
- Tensiones de 220V-400V.
- Incluye velocidades nominales de 1500 rpm, 2000 rpm, 4000 rpm, 6000 rpm.
- Múltiples opciones en dispositivos de retroalimentación.

En la figura 3.1 se ilustra la MSIP que se utilizó en la implementación, misma que se encuentra montada en su base lista para ser acoplada con la otra máquina.

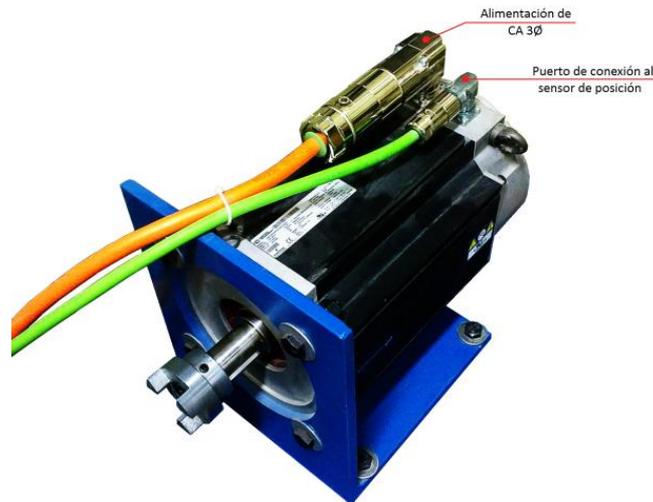


Figura 3. 1 Fotografía del Unimotor FM modelo: 190E2D200BACAA215320.

3.3 Especificaciones del accionamiento de CA universal Unidrive SP 3201

El Unidrive SP 3201 es un inversor de modo conmutado que puede trabajar como inversor y como rectificador lo cual significa que puede operar en los cuatro cuadrantes. En la figura 3.2 se ilustra el Unidrive SP tamaño tres que se utilizó en la implementación en el sistema de control del electrodinamómetro.



Figura 3. 2 Fotografía de los Unidrive SP 3201 montados en el gabinete.

3.3.1 Características de potencia nominal del Unidrive SP 3201

Los parámetros nominales que se muestra en la tabla 3.2 es bajo las siguientes condiciones, temperatura ambiente máxima de 40°C, una altitud de 1000 metros y con una frecuencia de conmutación de 3 kHz. Para frecuencias de conmutaciones mayores, una altitud mayor de 1000 metros y temperaturas superiores a 40°C se requiere una disminución de la potencia [7].

Modelo	Amperaje Normal.				Gran Amperaje.				
	Intensidad de salida continua máxima.	Potencia nominal a 220 V	Potencia del motor a 230 V.	Corriente de pico.	Intensidad de salida continua máxima.	Corriente de pico en bucle abierto.	Corriente de pico en bucle cerrado.	Potencia nominal a 220 V.	Potencia del motor a 230 v.
	A.	kW.	CV.	A	A	A	A	kW.	CV.
SP 3201	42	11	15	46	31	46.5	54.2	7.5	10

Tabla 3. 2 Potencias nominales del SP 3201.

3.3.2 Modos de funcionamientos del Unidrive SP

El Unidrive SP está diseñado para funcionar en cinco diferentes modos de funcionamiento los cuales son:

- Lazo abierto.
- Modo RFC.
- Vectorial de lazo cerrado.
- Servo.
- Regen.

Cada modo de funcionamiento tienen diferentes aplicaciones sin embargo solo se consideran los modos de funcionamiento que fueron utilizados en esta implementación los cuales son el modo Servo y el modo Regen, si se desea conocer los otros modos de funcionamiento se recomienda consultar la guía de usuario [7].

Servo.

Para uso con motores sin escobillas de imán permanente equipados con dispositivo de retroalimentación. El accionamiento controla directamente la velocidad del motor mediante un dispositivo de retroalimentación para garantizar el ajuste preciso de la velocidad del rotor a las exigencias del usuario. El dispositivo de retroalimentación debe proporcionar información de posición absoluta para asegurarse de que la tensión de salida se adecua perfectamente a los campos electromagnéticos del motor. El par total se encuentra disponible hasta la velocidad de cero [7].

Regen.

Para uso como unidad inicial regenerativa en operación de cuatro cuadrantes. La regeneración hace posible el flujo de potencia bidireccional, lo que garantiza un mayor nivel de eficiencia en aplicaciones en las que la resistencia de frenado disiparía una gran cantidad de energía en forma de calor. [7].

En este proyecto se utilizaron dos Unidrive SP 3201 uno configurado en el modo Regen y otro configurado en el modo Servo el que se encuentra configurado como modo Servo es utilizado para controlar el par y la velocidad de la MSIP y el que se configura en modo Regen funciona como un rectificador controlado el cual alimenta el bus de CD con un voltaje de 300 voltios.

3.3.3 Especificaciones de las terminales de control

Cada Unidrive SP 3201 consta de veinticuatro terminales de control que se utilizan para manipular y supervisar el funcionamiento del sistema regenerativo, las veinticuatro terminales de control se encuentran divididas en dos conectores de once terminales y un conector más de dos terminales como se ilustra en la figura 3.3.

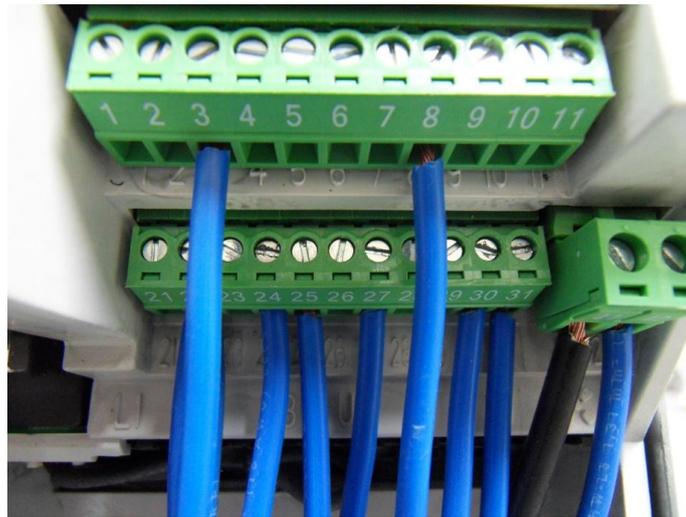


Figura 3. 3 Terminales de control del Unidrive SP 3201 del accionamiento regen.

En la tabla 3.3 se describe la cantidad de terminales que se tienen disponibles, de acuerdo a la función que desempeña cada una de ellas y los parámetros de control para cada terminal.

Función de la Terminal	Cant.	Parámetros de control disponibles.	Numero de terminal.
Entrada analógica diferencial.	1	Destino, desfase, compensación de desfase, inversión, escala.	5,6
Entrada analógica de un extremo.	2	Modo, desfase, escala, inversión, destino.	7,8
Salida analógica.	2	Origen, modo, escala	9, 10
Entrada digital.	3	Destino, inversión, seleccionar lógica.	27,28,29
Entrada/salida digital.	3	Seleccionar modo de entrada/salida, destino/origen, inversión, seleccionar lógica	24,25,26
Relé.	1	Origen, inversión.	41,42
Activar accionamiento.	1		31
Salida de usuario +10V.	1		4
Salida de usuario +24V.	1	Origen, inversión.	22
Común a 0V.	6		1, 3, 11, 21, 23, 30
Entrada externa +24 V.	1		2

Tabla 3. 3 Funciones de las terminales de control.

Las terminales cinco y seis del accionamiento motriz son utilizadas para controlar la velocidad del electrodinamómetro, estas terminales se encuentran configuradas en modo de tensión, de tipo diferencial, la diferencia en las terminales determina el valor de la velocidad de referencia por ejemplo, si se tiene la tensión máxima positiva +10V, significa que la velocidad de referencia sería la velocidad máxima que el usuario establece en la configuración del Unidrive específicamente en el menú Pr. 0.02, en este menú el usuario establece la velocidad máxima de la máquina, en caso de que la diferencia en las terminales cinco y seis fuese el voltaje máximo negativo -10V significaría que la velocidad de referencia es el mismo valor del menú Pr. 0.02 pero con signo negativo. En la tabla 3.4 se describen las características y las configuraciones que el usuario puede aplicar en las terminales cinco y seis.

Referencia de precisión Entrada analógica 1	
Terminal 5	Entrada no invertida
Terminal 6	Entrada invertida
Función por defecto.	Referencia de frecuencia/velocidad.
Tipo de entrada	Analógica diferencial bipolar (Para entrada asimétrica, conecte la terminal 6 al 3.)
Rango de tensión máximo	$\pm 9,8 \text{ V} \pm 1\%$
Rango de tensión máxima absoluta	$\pm 36 \text{ V}$ respecto de 0 V
Rango de tensión en modo común	$\pm 13 \text{ V}$ respecto de 0 V
Resistencia de entrada	100 k Ω $\pm 1\%$
Resolución	16 bits más señal (como referencia de velocidad)

Tabla 3. 4 Funcionamiento y descripción de la terminal de control cinco y seis.

La terminal número siete del accionamiento motriz es configurada para utilizarse como referencia de par del electrodinamómetro esto significa que se puede manipular el valor del par en la máquina en función de la tensión de alimentación de la terminal, esta terminal es una entrada analógica asimétrica configurada para trabajar de manera bipolar de tal manera que se puede obtener valores de par positivo y negativo con el simple hecho de invertir la polaridad de la tensión de dicha terminal es decir si se tiene el valor máximo positivo de voltaje, en la flecha de la máquina se tendrá el 100% del par nominal en sentido positivo. En la tabla 3.5 se muestran las características de configuración de parámetros de la terminal siete.

Terminal 7	Entrada analógica 2
Función por defecto.	Referencia de frecuencia/velocidad.
Tipo de entrada	Tensión analógica asimétrica bipolar o intensidad unipolar
Modo controlado por...	Pr 7.11
Funcionamiento en modo de tensión	
Rango de tensión máximo	$\pm 9,8 \text{ V} \pm 3\%$
Desfase máximo	$\pm 30 \text{ mV}$
Rango de tensión máxima absoluta	$\pm 36 \text{ V}$ respecto de 0 V
Resistencia de entrada	>100 k Ω
Funcionamiento en modo de intensidad	
Rangos de intensidad	0 a 20 mA , 20 a 0 mA ,4 a 20 mA, 20 a 4 mA.
Desfase máximo	250 μA
Tensión inversa máxima absoluta	-36 V máx.
Intensidad máxima absoluta	+70 mA
Resistencia de entrada equivalente	$\leq 200\Omega$ a 20 mA

Tabla 3. 5 Funcionamiento y descripción de la terminal de control siete.

El sistema de control del electrodinamómetro necesita conocer la corriente activa de la máquina de carga para calcular el par del electrodinamómetro, por lo tanto es necesario retroalimentarla a través de la terminal diez del accionamiento motriz ya que esta terminal es una salida analógica la cual se configura como la salida de la corriente activa de la máquina, la terminal diez del accionamiento motriz tiene los siguientes parámetros de configuración los cuales se muestran en la tabla 3.6.

Terminal 10	Salida analógica 2
Función por defecto de terminal 9	OL> Señal de salida de FRECUENCIA del motor CL> Señal de salida de VELOCIDAD
Función por defecto de la terminal 10	Corriente activa de motor
Tipo de salida	Tensión analógica asimétrica bipolar o intensidad unipolar asimétrica
Modo controlado por...	Pr 7.21 y Pr 7.24
Funcionamiento en modo de tensión (por defecto)	
Rango de tensión	$\pm 9,6 \text{ V} \pm 1\%$
Desfase máximo	100 mV
Intensidad de salida máxima	$\pm 10 \text{ mA}$
Impedancia de carga	1 k Ω mín.
Protección	35 mA máx. Protección contra cortocircuito.
Resolución	16 bits más señal.
Funcionamiento en modo de intensidad	
Rangos de intensidad	0 a 20 mA $\pm 10\%$ 4 a 20 mA $\pm 10\%$
Desfase máximo	600 mA
Tensión máxima sin carga	+15 V
Impedancia de carga máxima	500 Ω
Común a todos los modos	
Resolución	10 bits (más señal en modo de tensión)

Tabla 3. 6 Funcionamiento y descripción de la terminal de control diez.

Un parámetro más que necesita el sistema de control del electrodinamómetro es la velocidad del electrodinamómetro, la cual podría ser tomada directamente del codificador, sin embargo como el accionamiento motriz demanda la necesidad de la retroalimentación de velocidad, fue necesario implementar un modulo de resolución en el accionamiento motriz, el cual sea capaz de simular las salidas (A,B,Z) del encoder que entran al accionamiento y de esta manera exista una derivación de estas señales y puedan ser utilizadas por el sistema de control del electrodinamómetro.

El módulo que se utiliza para simular las señales del encoder, es el SM Encoder Output Plus, los parámetros de configuración de este módulo se pueden configurar en los menús 15, 16 y 17 dependiendo en el slot en el que se encuentre instalado el módulo, en este caso se configura en el menú diecisiete ya que el módulo se encuentra en el slot tres.

El módulo SM Encoder Output Plus cuenta con diecisiete terminales, las cuales se dividen en dos conectores (PL1, PL2) las terminales de la sección PL1 son terminales de entrada y las terminales de PL2 son terminales de salida. En la figura 3.3 se muestran las terminales del módulo.

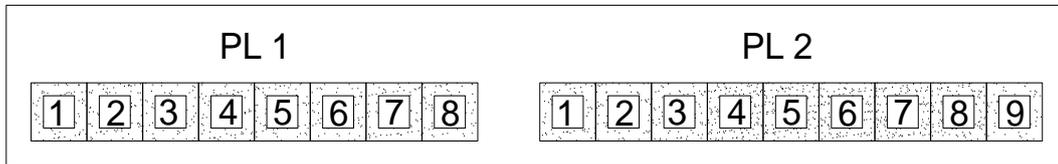


Figura 3. 4 Terminales del módulo SM Encoder Output Plus.

En la tabla 3.7 se describe la asignación de terminales del módulo SM encoder Output Plus.

Descripción de terminales de PL1				Descripción de terminales de PL2					
Terminal	Entradas del encoder			Terminal	Salidas del encoder				
	Ab	Fb	Fr		Ab	Fb	Fr	Ab.L	Fb.L
1	A	F	F	1	0V				
2	A\	F\	F\	2	0V				
3	B	B	R	3	A	F	F	A	F
4	B\	B\	R\	4	A\	F\	F\	A\	F\
5	Z			5	B	B	R	B	B
6	Z\			6	B\	B\	R\	B\	B\
7	0V			7	0V				
8	+V			8	Z				
				9	Z\				

Tabla 3. 7 Descripción de las terminales del modulo SM Encoder Output Plus.

3.3.4 Configuración del accionamiento motriz

Al accionamiento motriz es necesario hacerle modificaciones, con la intención de adecuarlo a la aplicación del electrodinamómetro. Se inicia cambiando la configuración que trae por defecto el menú P.r. 11.31 y modificarla para que trabaje en modo servo.

Después de que el accionamiento motriz se encuentra trabajando en modo servo se procede a realizar los pasos de puesta en servicio rápida, que se indica el menú siete de la guía de usuario en los cuales se introducen los valores nominales de placa de la MSIP, características del encoder de la máquina de carga, después se realiza un autoajuste el cual tiene la función de sintonizar los controladores de corriente y velocidad en función de los valores de inductancia y resistencia que son calculados en el autoajuste.

Una vez realizado el autoajuste ya casi se encuentra configurado por completo el accionamiento motriz solo faltaría modificar algunos parámetros como los del menú diecisiete en el cual se configura el módulo de resolución SM Encoder Output Plus.

Una vez que se configura por completo el accionamiento son dieciocho los parámetros que fueron modificados los cuales se muestran en la tabla 3.8. Los demás parámetros que no se encuentran en esta tabla permanecen como vienen configurados por defecto.

Parámetro	Descripción	Valor por defecto	Valor en memoria	Unidades
1.06	Bloqueo de referencia máxima	3000	2500	RPM
1.10	Activar referencia bipolar	Off	On	
2.11	Velocidad de aceleración	0.20	1.00	s/1000 RPM
2.21	Velocidad de desaceleración	0.20	1.00	s/1000 RPM
3.25	Angulo de fase del codificador	0	357.3	
3.40	Nivel de detección de errores de codificador de accionamiento	1	0	
4.11	Selector de modo de par	Speed	Speed ovd	
4.13	Ganancia Kp de controlador de intensidad	75	91	
4.14	Ganancia Ki de controlador de intensidad	1000	356	
5.07	Intensidad nominal del motor	31	29.5	
5.11	Número de polos del motor	6	8	polos
5.17	Resistencia de estator	0.00	0.116	Ohm
5.24	Inductancia transitoria	0.00	1.257	mH
6.30	Bit de secuencia: Marcha adelante	Off	On	
7.14	Destino de entrada analógica T7 2	1.37	4.08	Menú
11.44	Estado de seguridad	L1	L2	
17.24	Fuente de simulación de encoder	0.00	3.29	
17.25	Número promedio de simulación del encoder	0.25	1.00	

Tabla 3. 8 Modificaciones de la configuración del modo servo que trae por defecto.

3.3.5 Conexiones de CA y control del sistema del electrodinamómetro

En el diagrama de control que se muestra en la figura 3.3 se encuentran los elementos principales que constituyen al sistema del electrodinamómetro. Los valores de los inductores, capacitores y resistencias que aparecen en la figura 3.3 se localizan en la tabla 3.9, el valor de estos elementos fueron seleccionados de las tablas de la guía de instalación del Unidrive SP, la selección se hace de acuerdo con el tamaño del accionamiento que se está utilizando [8].

Los elementos que se utilizan como entradas de control, como interruptores de habilitación, paro e interruptores selectores se encuentran en la parte frontal del gabinete, para que el usuario pueda acceder rápidamente a ellos. Un ejemplo de estos elementos son S1, S2, S3, S4, S5.

Elemento	Valor	Unidades
Inductor de regeneración.	.4	mH.
Inductor de filtro de frecuencia de conmutación.	1.2	mH.
Varistores de línea a línea	550	Vrms.
Varistores de línea a fase.	680	Vrms.
Condensador de filtro de frecuencia de conmutación.	17	μF.
Resistencia de descarga del condensador de FFC	390	kΩ

Tabla 3. 9 Valores de elementos del sistema del electrodinamómetro.

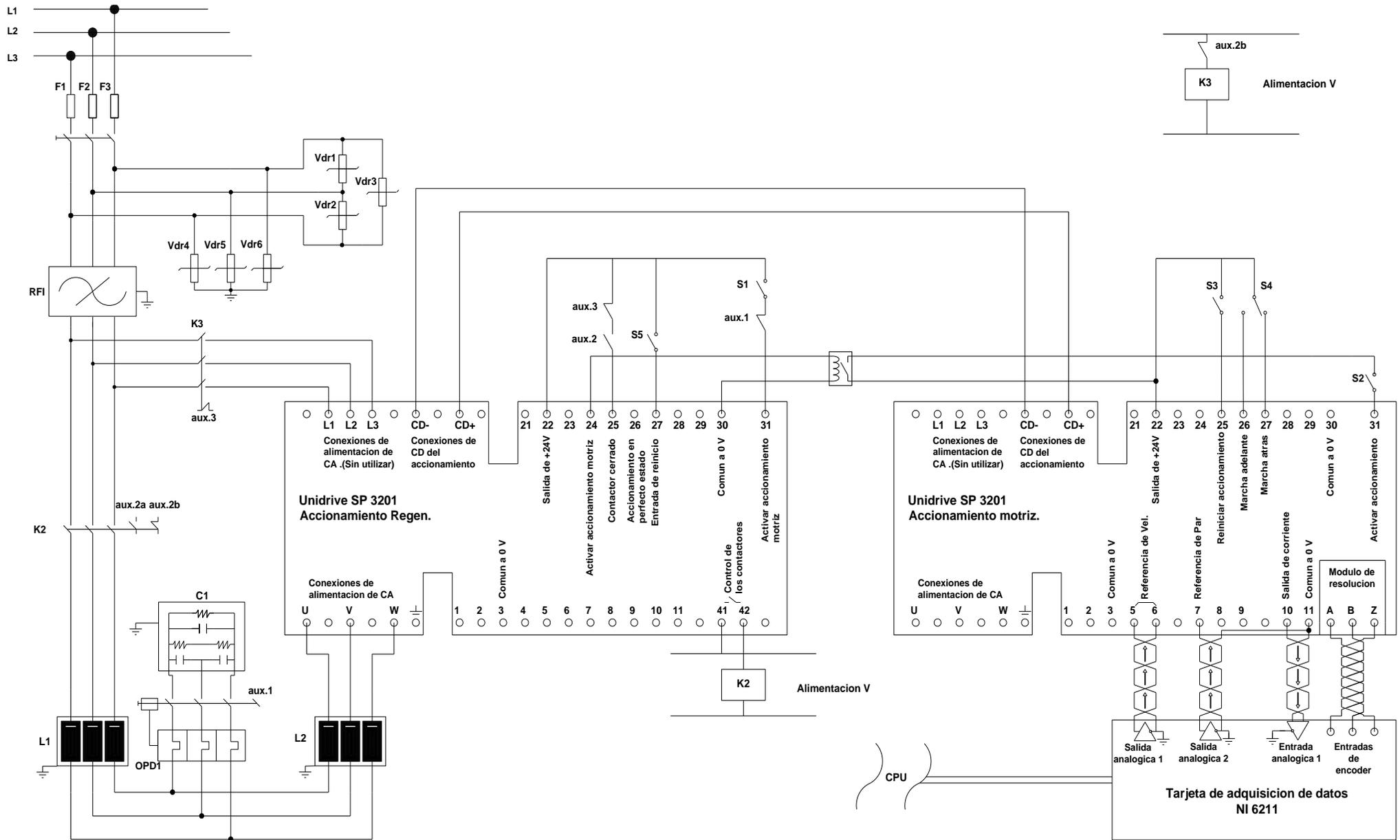


Figura 3. 5 Diagrama de alimentación y control del sistema regenerativo.

En la tabla 3.10 se describe cada una de las claves utilizadas en la figura 3.3.

Clave	Descripción
L1, L2, L3	Alimentación trifásica
F1, F2, F3	Fusibles de alimentación principal del sistema Regen
VDR1, VDR2, VDR3	Red de varistores línea a línea
VDR4, VDR5, VDR6	Red de varistores línea a tierra
RFI	Filtro RFI opcional
C1	Condensador de filtro de frecuencias de conmutación
L1	Inductor de filtro de frecuencias de conmutación
L2	Inductor de regeneración
K1	Interruptor o contactor de alimentación principal
K2	Contactor principal del accionamiento Regen
K3	Contactor de carga
OPD1	Dispositivo de protección contra sobrecargas para C1
Aux.3	Contacto auxiliar NC K3
Aux.2a	Contacto auxiliar NO K2
Aux.2b	Contacto auxiliar NC K2
Aux.1	Contacto auxiliar NO OPD1
Rly.1	Aislamiento opcional para la activación entre el accionamiento Regen y el accionamiento motriz
Alimentación V	Alimentación de control del sistema
+CC, -CC	Terminales del bus de corriente directa.
S1	Activación del accionamiento Regen
S2	Activación de los accionamiento motriz
S3	Reinicio de los accionamientos motrices
S4	Selector de Marcha adelante o atrás de accionamiento motriz.
S5	Entrada de reinicio del accionamiento Regen

Tabla 3. 10 Claves de los elementos del sistema de la figura 3.3

En la figura 3.5 se muestra la implementación del sistema regen que se habilitó en el laboratorio y se señalan algunos de los componentes que lo conforman.

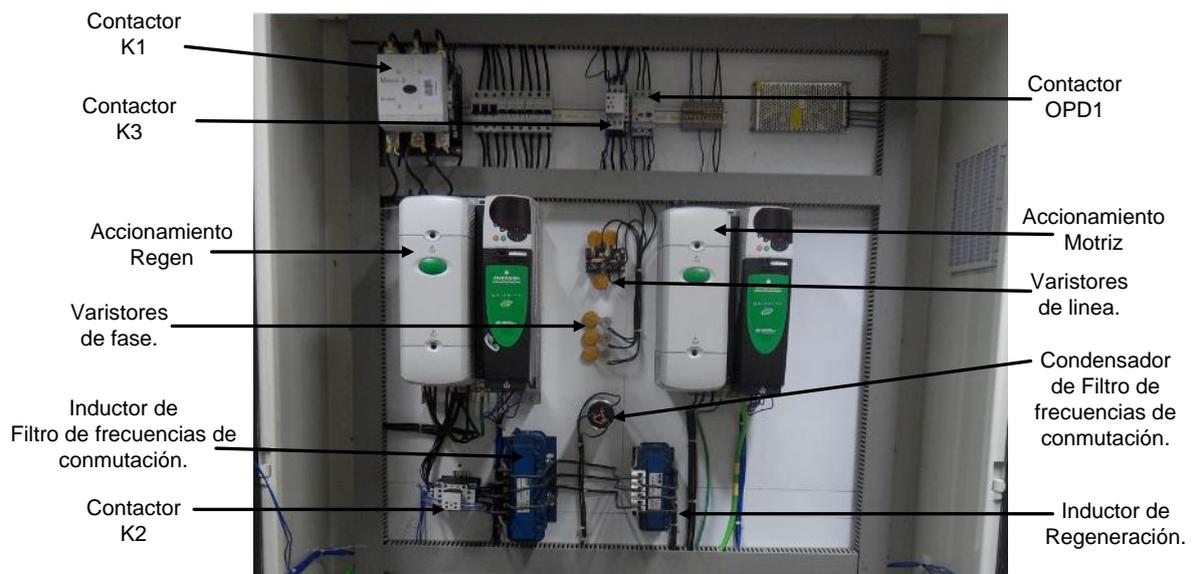


Figura 3. 6 Implementación del sistema regenerativo.

3.4 Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211

La NI USB 6211 es una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) optimizada para una precisión superior y tiene una alta velocidad de muestreo, ofrece dieciséis entradas analógicas, dos salidas analógicas, cuatro salidas digitales y cuatro entradas digitales programables, está diseñada para aplicaciones de poco espacio y de fácil transportación, por lo tanto no requiere de una fuente de alimentación externa, es compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI, y measurement studio.

En las tablas 3.11 y 3.12 se describen las características básicas de las entradas y salidas analógicas y digitales de la NI USB 6211.

Entradas analógicas	Resolución (bits)	Tiempo de muestreo kS/s	Rango de voltaje de entrada
	16	250	±10
Salidas analógicas	Resolución (bits)	Tiempo de muestreo kS/s	Rango de voltaje de entrada
	16	250	±10

Tabla 3. 11 Características de entradas y salidas analógicas.

Entradas digitales	Voltaje min. De estado lógico 0 (voltios)	Voltaje máx. De estado lógico 0 (voltios)	Voltaje min. De estado lógico 1 (voltios)	Voltaje máx. De estado lógico 1 (voltios)
	0	0.8	2	5.25
Salidas digitales	Voltaje min. De estado lógico 0 (voltios)	Voltaje máx. De estado lógico 0 (voltios)	Voltaje min. De estado lógico 1 (voltios)	Voltaje máx. De estado lógico 1 (voltios)
	0	0.6	2.7	3.8

Tabla 3. 12 Características de entradas y salidas digitales.

En la siguiente figura se muestra la USB 6211 que se utiliza como interfaz entre la PC y el Unidrive SP 3201 para mandar las señales de control de par y velocidad del accionamiento Unidrive SP 3201.

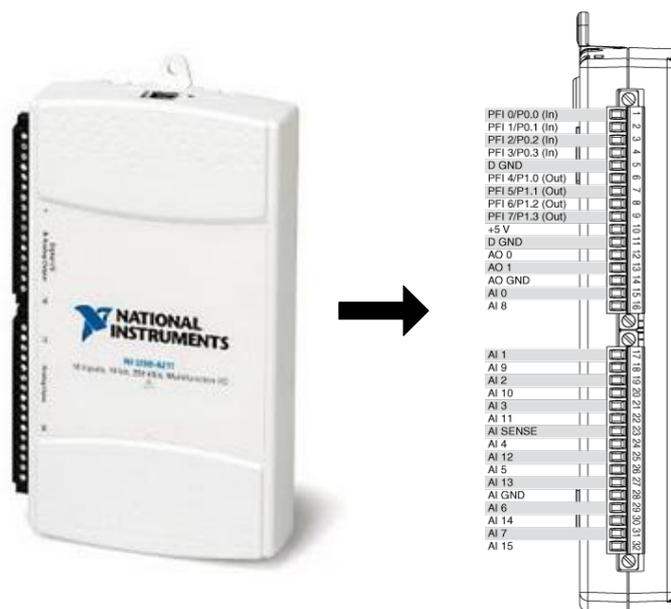


Figura 3. 7 Fotografía y asignación de terminales de la NI USB 6211.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL

El objetivo de este capítulo es mostrar los algoritmos de control del electrodinamómetro que se desarrollaron en el entorno de programación gráfico LabView, los programas realizados en LabView son conocidos como instrumentos virtuales ó VI's por su apariencia y operación, que imitan a instrumentos físicos como osciloscopios, multímetros, generadores de frecuencia etc.

En la programación gráfica se utilizan bloques para realizar los algoritmos de programación, a diferencia de la programación convencional en la que se utilizan comandos, en las que a veces requiere de una compleja sintaxis. Cada uno de los bloques utilizados en LabView cuenta con una función específica, estos bloques se integran al programa estratégicamente para lograr que cumpla con un objetivo específico. El programa de control del electrodinamómetro se diseñó, de tal manera que el VI principal utiliza dieciocho diferentes subVI, que son llamados a ejecutarse desde el diagrama de bloques del programa principal.vi.

4.1 Descripción del VI principal

Cada VI consta de un panel frontal y de un diagrama de bloques, el panel frontal es la interface por medio de la cual el usuario interactúa con el programa y el diagrama de bloques es donde se realiza la programación. El VI principal utiliza diferentes subVI para realizar el control del electrodinamómetro a continuación se muestra una lista de los subVI que forman al VI principal.

1. Adquisición.vi.
2. Cargar ciclo.vi
3. Derivada.vi.
4. Escribe datos.vi.
5. Escribe datos modo automat.vi.
6. Escribe archivo binario.vi.
7. Grafica datos.vi
8. Guarda variables.vi
9. Lee archivo binario.vi
10. Limite de los parámetros_0.vi.
11. Limite de los parámetros_1.vi.
12. Modelo del vehículo.vi.
13. Modo automatico.vi.
14. Modo de vehiculo.vi.
15. Modo manual.vi
16. Programar ciclo.vi
17. Variables globales

En la figura 4.1 se ilustra el panel frontal del VI programa principal, en este panel frontal se localizan cuatro botones (Parar, modo manual, modo vehículo y modo automático), los tres últimos botones que se encuentran en el panel frontal, son los modos en los que puede trabajar el electrodinamómetro y el primer botón localizado en la parte izquierda del panel frontal llamado parar se utiliza para finalizar la aplicación, es importante hacer mención que esta plataforma está diseñada para trabajar con el electrodinamómetro en un solo modo de operación a la vez.

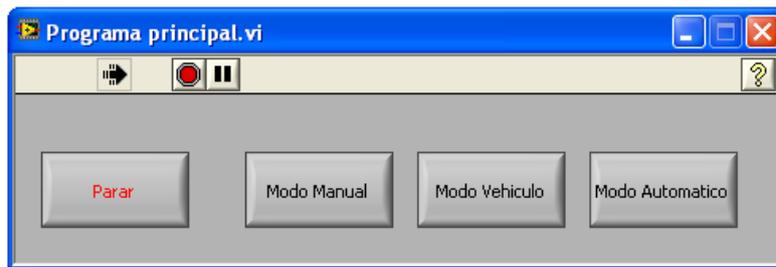


Figura 4. 1 Panel frontal del VI principal.

Parar: este botón finaliza al VI principal, y detiene la ejecución de todos los subVI que son utilizados en este programa principal.vi y que en ese momento se estén ejecutando.

Modo manual: en este modo el usuario indica el par y la velocidad en la que va operar el electrodinamómetro.

Modo automático: en este modo el usuario selecciona el ciclo de carga que desarrolla el electrodinamómetro también el usuario tiene la opción de programar de manera personalizada los ciclos de carga para el electrodinamómetro.

Modo vehículo: en este modo el electrodinamómetro emula el comportamiento de un vehículo, dando la opción al usuario de introducir las características del vehículo que se va emular.

La figura 4.2 ilustra el diagrama de bloques del VI principal

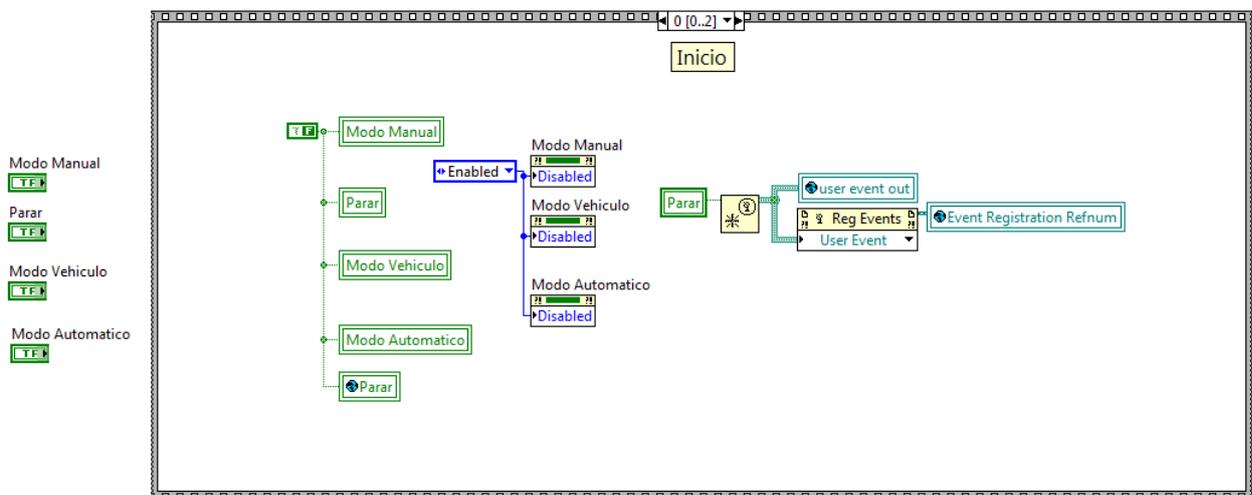


Figura 4. 2 Diagrama de bloques del VI principal.

El diagrama de bloques de la figura 4.2 está conformado principalmente por una estructura de secuencia que está constituida por tres secuencias las cuales son: inicio, ejecución y fin.

En la secuencia cero (inicio) se habilitan y asigna el valor lógico falso a los botones (parar, modo manual, modo vehículo, modo automático) y a una variable global llamada parar y por último se crea un evento de usuario y se registra el evento con un número de referencia el cual se utiliza para pasar eventos entre VI's.

En la figura 4.3 se muestra la secuencia uno (Ejecución), dentro de ella se encuentran dos ciclos While que se ejecutan en paralelo. Al interior del ciclo While uno se encuentra una estructura de eventos la cual espera que ocurra un evento de cualquiera de los cuatro botones que se encuentran en el panel frontal para ejecutar las instrucciones que se encuentran dentro del evento correspondiente. En el lado derecho de la secuencia uno se encuentra el ciclo While dos que se encarga de mandar un evento entre VI's cuando la variable local Parar es verdadera.

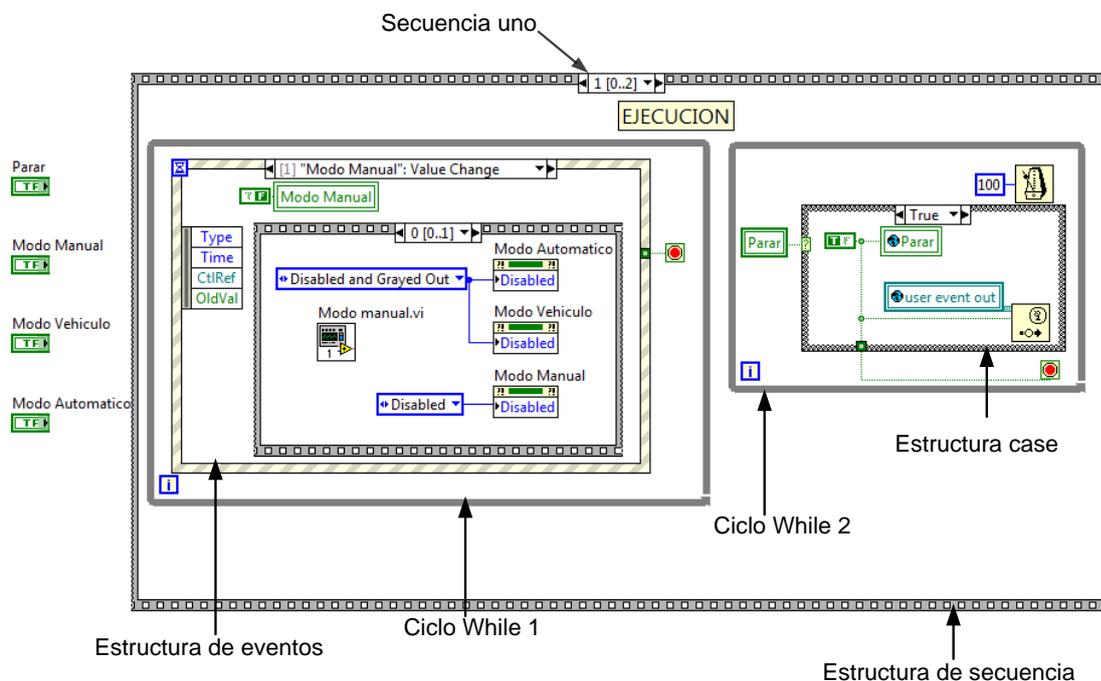


Figura 4.3 Diagrama de bloques dentro de la secuencia uno.

En la figura 4.3 se muestra que el ciclo While uno, mismo que permanece en espera de que ocurra uno de los cuatro eventos posibles que se encuentran dentro de la estructura de eventos los cuatro eventos posibles son:

1. Cambio de valor del botón parar.
2. Cambio de valor del botón modo manual.
3. Cambio de valor del botón modo vehículo.
4. Cambio de valor del botón automático.

Cada uno de estos eventos ocurre cuando los botones del panel frontal cambia de valor, sin embargo cuando ocurre un evento en el cual se elige un modo de trabajo del electrodinamómetro, los otros dos modos restantes se deshabilitan evitando de esta manera, que

dos modos diferentes funcionen al mismo tiempo, para eso se analizara cada evento por separado, iniciando con modo manual. En la figura 4.4 se ilustra el caso de evento del botón modo manual.

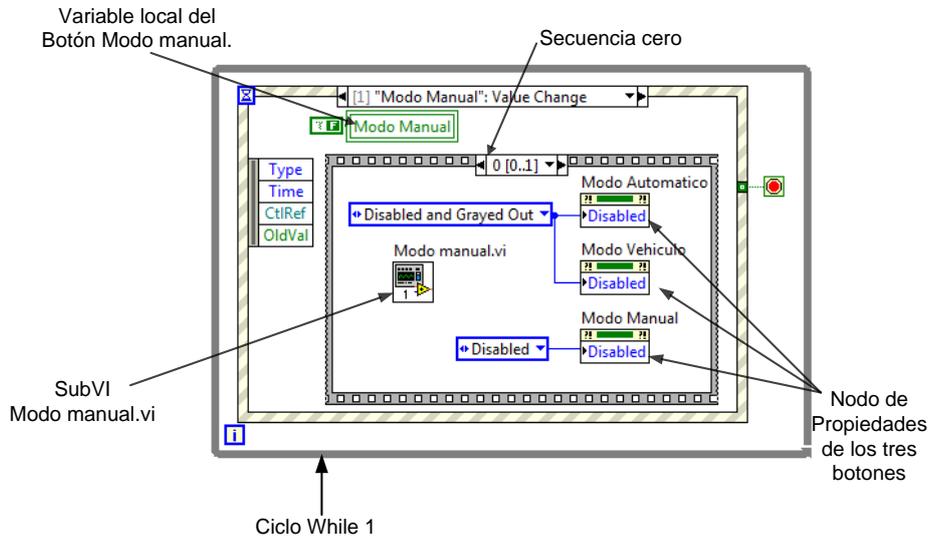


Figura 4. 4 Secuencia cero del caso de evento modo manual.

En la figura 4.4 se muestra el caso de evento modo manual dentro de él se encuentra una estructura de secuencias que contiene dos secuencias, en la secuencia cero se tienen tres nodos de propiedad cada uno de ellos de un botón del panel frontal, la aplicación de estos nodos de propiedad es deshabilitar los botones (modo automático, modo vehículo, modo manual) ya que el electrodinamómetro solo puede trabajar en un solo modo a la vez y no es posible seleccionar otro modo de funcionamiento, hasta que haya concluido el modo seleccionado. También se puede observar un subVI llamado Modo manual.vi el cual es el encargado de ejecutar toda una rutina la cual se explicará a detalle más adelante. Una vez que el subVI modo manual terminó toda su rutina la estructura de secuencia pasa de la cero a la uno la cual se ilustra en la figura 4.5.

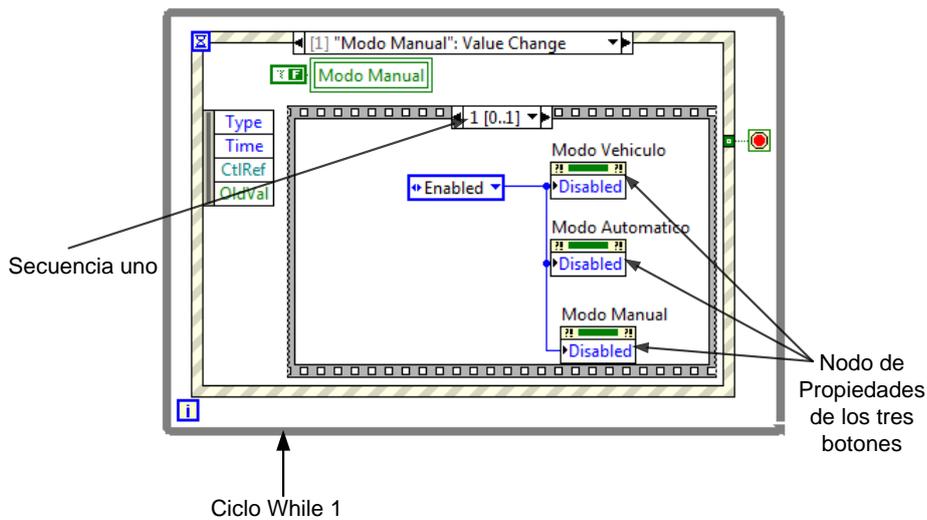


Figura 4. 5 Secuencia uno del caso de evento modo manual.

En la figura 4.5 se encuentra en la secuencia uno, que se utiliza para volver a habilitar los botones (modo automático, modo vehículo, modo manual) y de esta manera se pueda elegir de nuevo un modo de funcionamiento del electrodinamómetro.

En los eventos modo automático y modo vehículo se tiene prácticamente lo mismo que se explica en las figuras 4.4 y 4.5, la única diferencia es, que en lugar ejecutarse una subrutina modo manual se ejecutará una subrutina modo vehículo o modo automático según sea cada caso como lo ilustran las figuras 4.6 , 4.7. y 4.8.

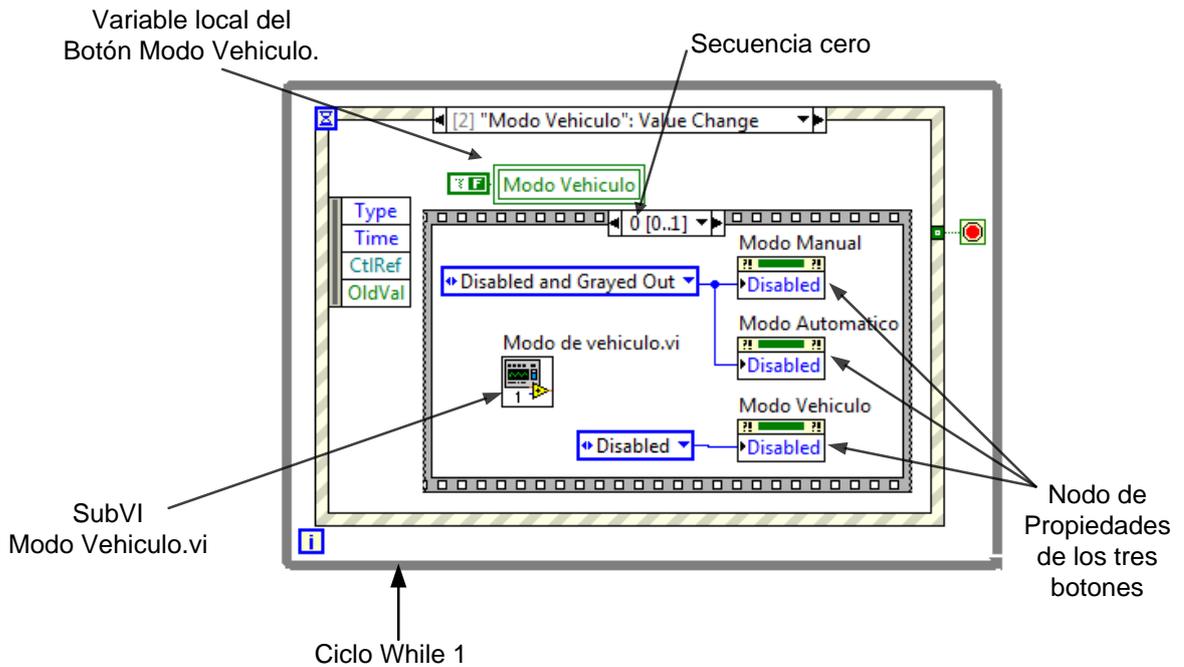


Figura 4. 6 Secuencia cero del caso de evento modo vehículo.

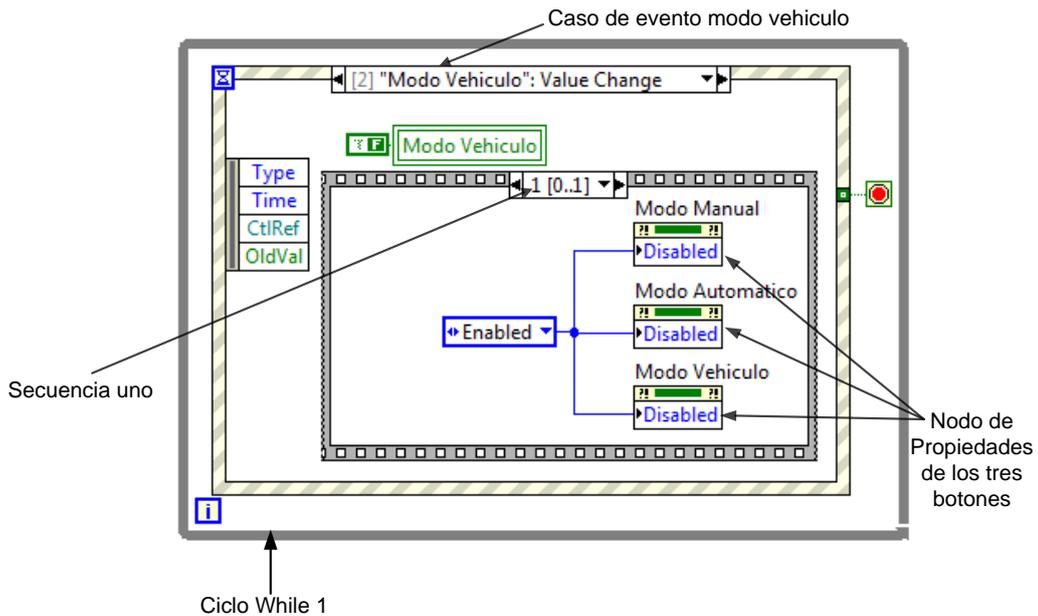


Figura 4. 7 Secuencia uno del caso de evento modo vehículo.

En la figura 4.8 se muestra el caso de evento modo automático en la secuencia cero, en la cual se manda llamar al subVI modo automático, también se puede observar que los nodos de propiedad de los botones modo manual y modo vehículo se encuentran conectados a una constante llamada (*Disable and Grayed Out*) esta constante hace que el botón se deshabilite y que el color del botón sea más tenue a diferencia de la constante conectada al nodo de propiedad del botón modo automático la cual es (*Disable*) la cual únicamente deshabilita el botón y no provoca el cambio de su color, esto es con la intención de poder identificar en qué modo se encuentra trabajando el electrodinamómetro.

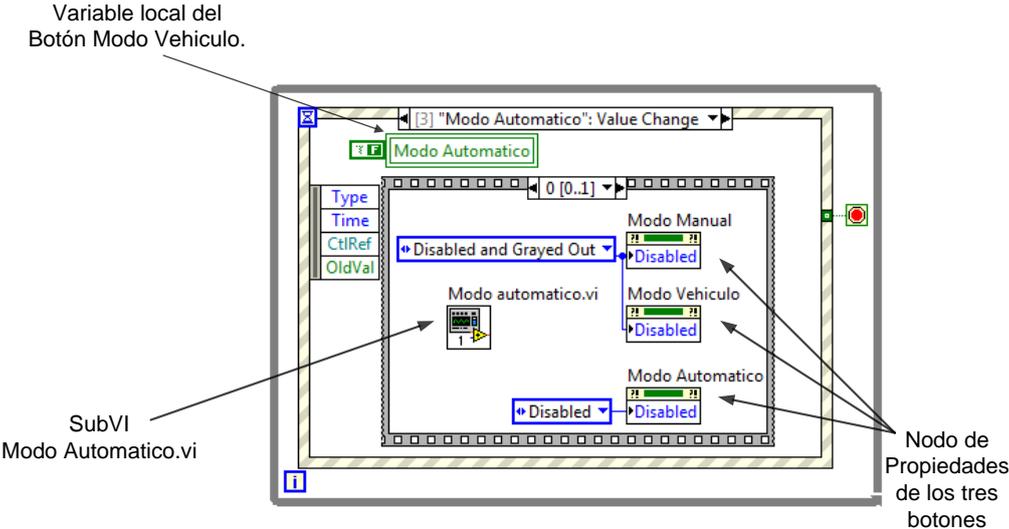


Figura 4. 8 Secuencia cero del caso de evento modo automático.

En la figura 4.9 se muestra el caso de evento modo automático en la estructura de secuencia número uno en la cual se habilitan los botones del panel frontal los cuales fueron deshabilitados en la secuencia cero. Cabe resaltar que el cambio de secuencia se hace una vez que el subVI modo automático concluye su rutina.

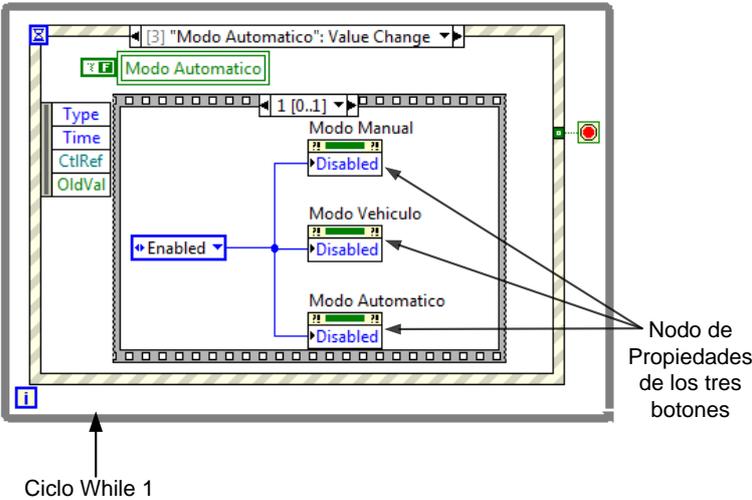


Figura 4. 9 Secuencia uno del caso de evento modo automático.

En la figura 4.10 se muestra el caso de evento del botón parar este evento se utiliza únicamente para finalizar el ciclo While uno.

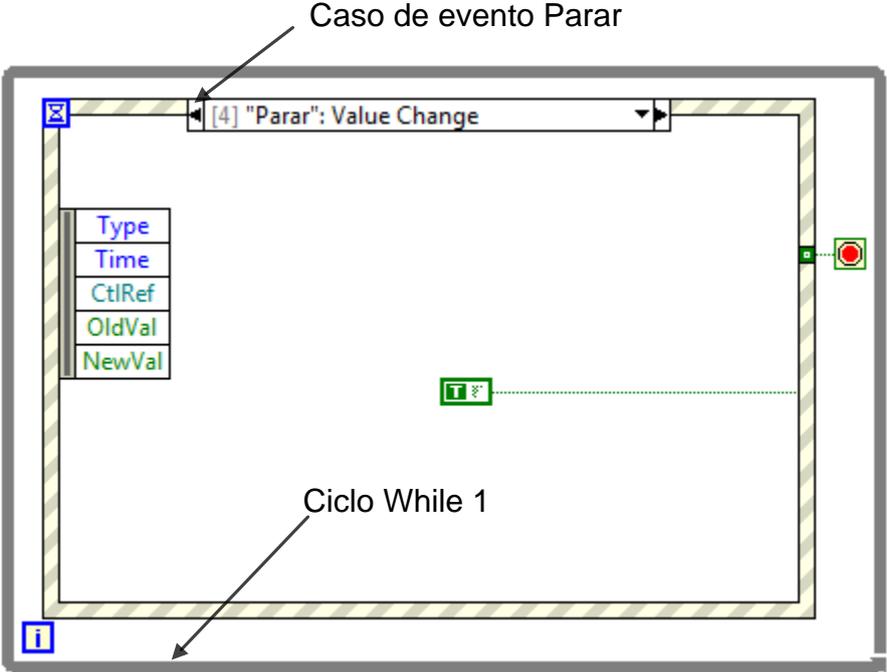


Figura 4. 10 Caso de evento del botón parar.

En la secuencia número dos (Fin) es donde se concluye el VI programa principal y se utiliza para habilitar nuevamente los botones del panel frontal y cerrar el número de registro de la variable global Event Registration Refnum que como se menciono anteriormente es por medio de la cual se pasan eventos entre VI's.

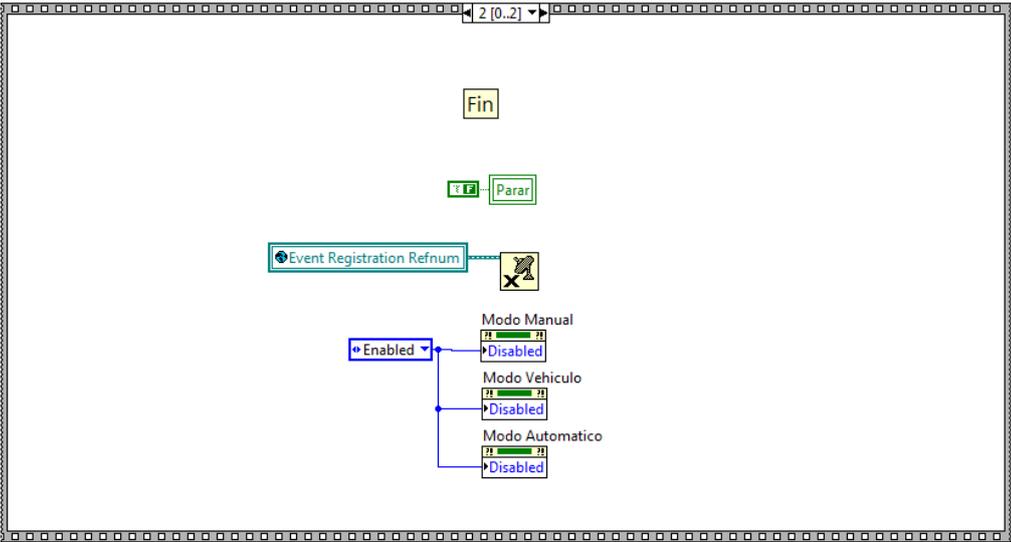


Figura 4. 11 Estructura de secuencia numero dos (Fin).

Una vez que se explicó el VI programa principal se continuará con la descripción de los dieciocho subVI's que se encuentran dentro del programa principal.vi.

4.2 Descripción del subVI Modo manual

En la figura 4.12 se ilustra el icono del subVI modo manual y es de esta manera, como se puede reconocer este subVI el cual se encuentra dentro del VI programa principal.



Figura 4. 12 Icono del subVI modo manual.

El panel frontal del subVI modo manual es el que se muestra en la figura 4.13.

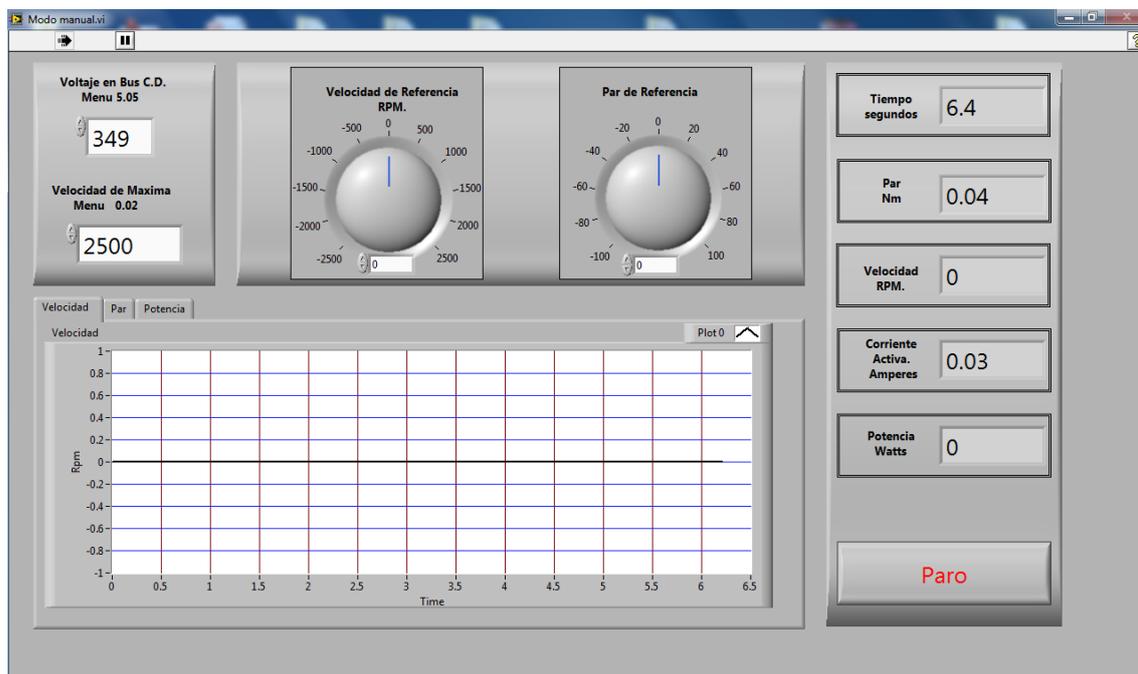


Figura 4. 13 Panel frontal del subVI modo manual.

En el subVI modo manual.vi el usuario define la velocidad a la que gira la MSIP y el par máximo que puede generar. Este modo permite que la máquina trabaje a velocidad cero y par nominal o si el usuario lo desea par nominal y velocidad nominal.

En el caso de que se quiera una velocidad de 1200 rpm y se desea un par del 10 % del par nominal (36.9Nm) la máquina solo generará como máximo 3.69 Nm. y si el par de carga de la máquina motriz es mayor de 3.69 Nm. el electrodinamómetro girará en sentido opuesto al par generado y se producirá una velocidad negativa.

En este modo específicamente se da prioridad al par de referencia, si para alcanzar la velocidad de referencia es necesario un par mayor que el par de referencia el accionamiento solo proporcionara como máximo el par de referencia que el usuario está mandando por medio de la interfaz gráfica. Por otro lado si el par de carga es menor que, el par de referencia del electrodinamómetro, el electrodinamómetro incrementara la velocidad teniendo como límite la velocidad de referencia que el usuario indique en el panel frontal del subVI modo manual.

En la figura 4.14 se ilustra el diagrama de bloques del subVI modo manual.vi, este diagrama de bloques se encuentra formado esencialmente por un ciclo While y una estructura de secuencia la cual está formada por tres secuencias (inicio, ejecución y fin) las cuales se explicaran a continuación cada una de las secuencias y el ciclo While.

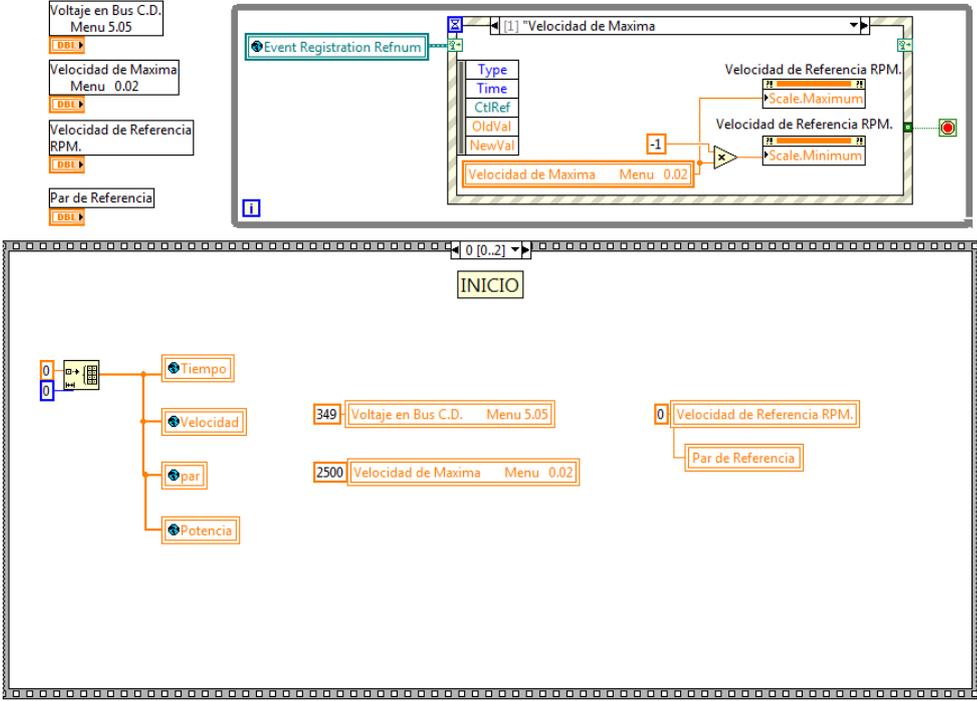


Figura 4. 14 Diagrama de bloques del subVI modo manual.

El ciclo While que se ilustra en la figura 4.15 es el encargado de esperar que ocurra alguno de los tres diferentes eventos posibles, aquí se concretara en el caso del evento uno, (velocidad máxima), si existe un cambio de valor en este control numérico, se ejecuta la rutina que hay dentro de este evento la cual se encarga de cambiar los rangos máximos y mínimos de dicho control.

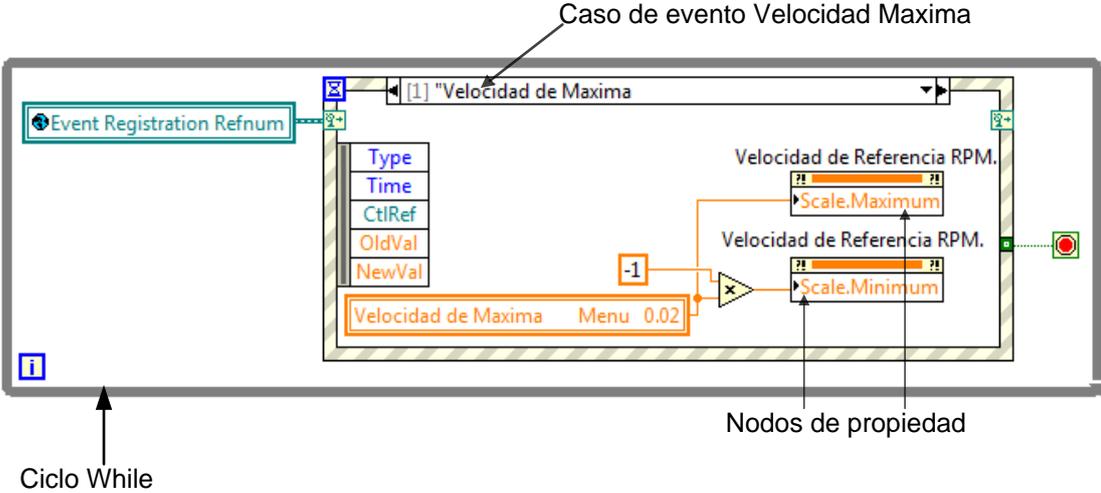


Figura 4. 15 Caso de evento velocidad máxima.

En la figura 4.16 se ilustra el caso de evento <parar> el cual es generado en otro VI, en otras palabras este evento se genera desde el panel frontal del Programa principal.vi. El evento Parar, se encarga de finalizar la ejecución del subVI modo manual.vi cuando el botón parar del programa principal cambia de valor, esto se hace con la intención de poder detener la ejecución desde el programa principal.vi ya que, si no se hiciera de esta manera, al momento de pulsar el botón en el programa principal no se detendría el programa, y se esperaría a que el subVI modo manual.vi terminara de ejecutarse lo cual sucedería hasta que el usuario pulse el botón paro del panel frontal del subVI modo manual.vi.

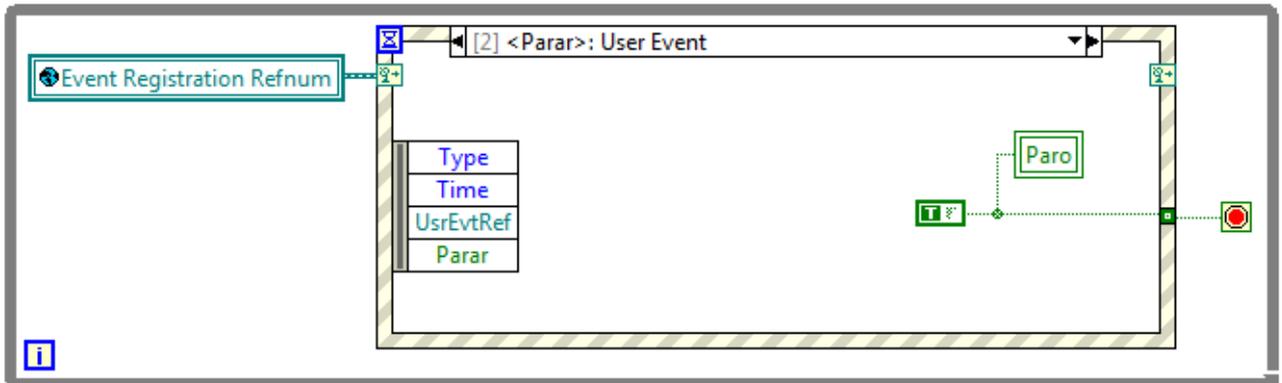


Figura 4. 16 Caso de evento Parar.

En la figura 4.17 se ilustra el caso de evento del botón paro, el cual se encuentra en el panel frontal del subVI modo manual, este botón se puede observar en la figura 4.13. Este evento se encarga de detener la ejecución del ciclo While y de esta manera se termina de ejecutar el subVI modo manual.vi. Sin embargo al pulsar el botón paro del subVI modo manual.vi no se detiene la ejecución del VI programa principal.

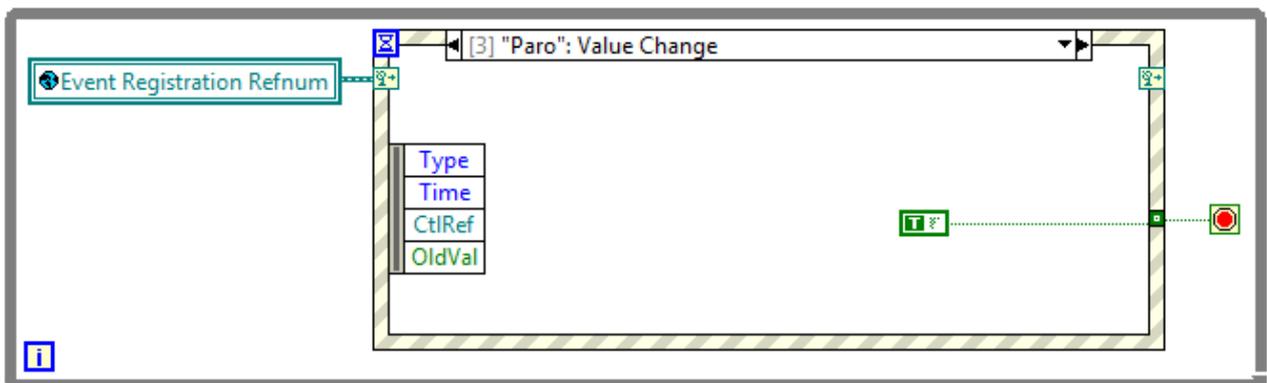


Figura 4. 17 caso de evento paro.

De esta manera se describió el funcionamiento y la aplicación de la estructura de eventos que se encuentra dentro del ciclo While, a continuación se describe la estructura de secuencia que forma parte del diagrama de bloques del subVI modo manual.vi que anteriormente se hizo mención en la figura 4.14.

En la figura 4.18 se ilustra la estructura de secuencias, esta estructura se encuentra en la secuencia cero, y se utiliza prácticamente para inicializar las variables locales del subVI modo manual y también se utiliza para inicializar los arreglos de las variables globales (tiempo, velocidad, par y potencia).

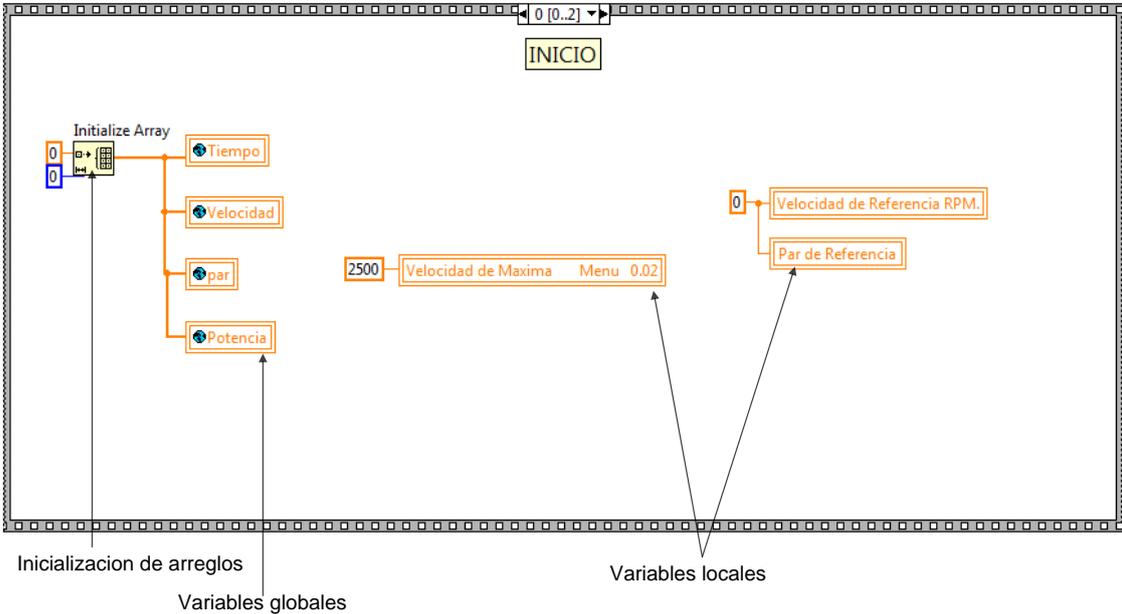


Figura 4. 18 Estructura de secuencia-Secuencia cero (inicio).

En la figura 4.19 se ilustra la secuencia uno y dentro de ella se encuentran tres ciclos While, esto es para que los ciclos se ejecuten en paralelo, esto quiere decir que se escriben datos en las salidas analógicas y al mismo tiempo se leen las entradas analógica y se grafican todos estos datos. A continuación se describen estos tres ciclos while.

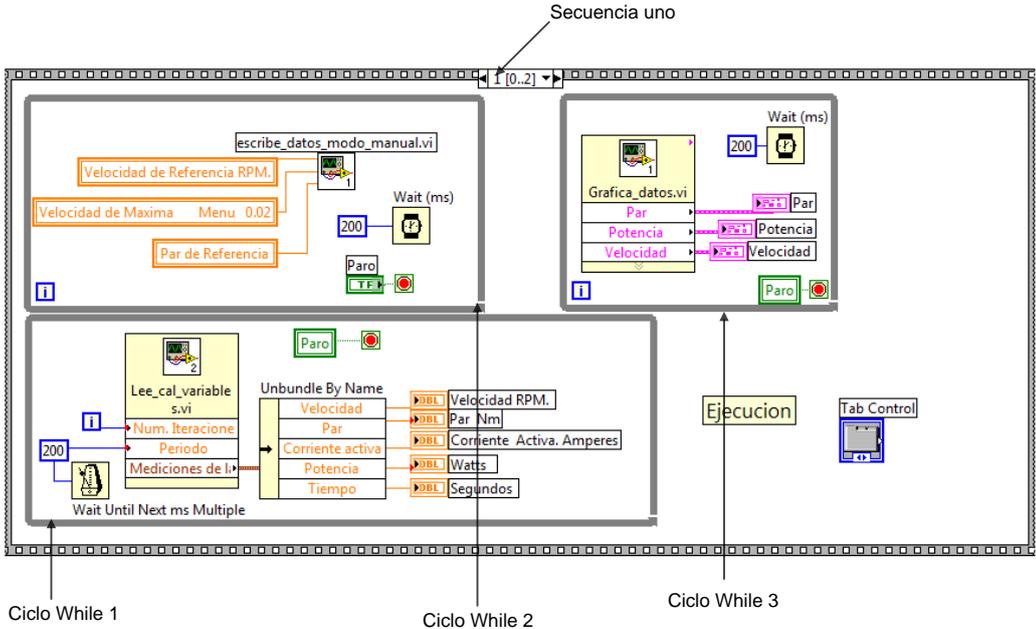


Figura 4. 19 Estructura de secuencia- secuencia uno (ejecución).

En la figura 4.20 se muestra el ciclo While uno el cual se encuentra dentro de la secuencia uno.

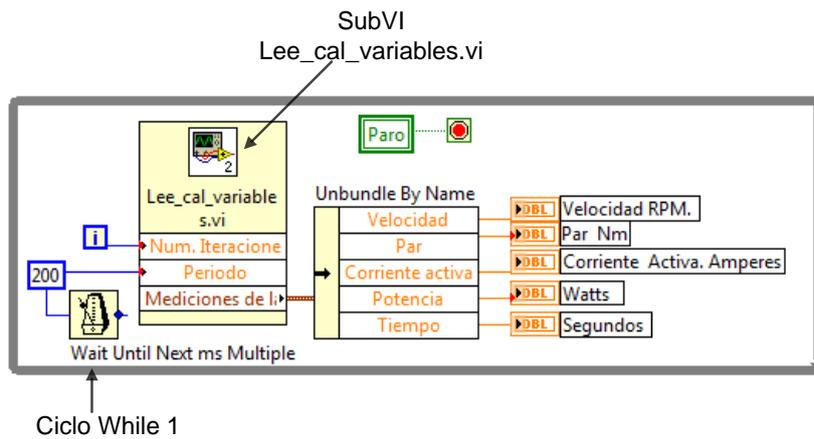


Figura 4. 20 Ciclo While uno.

En el ciclo While de la figura 4.20 se ejecuta un subVI llamado Lee_cal_variables.vi, el cual se encarga de muestrear una entrada digital, para calcular la velocidad y una entrada analógica para calcular el par del electrodinamómetro. Más adelante se explicará a detalle el diagrama de bloques del subVI Lee_cal_variable.vi, sin embargo cabe mencionar que las dos principales tareas de él son dos: adquisición de datos y cálculo de variables. Una vez que este subVI realiza la adquisición de datos a través de la NI USB 6211, este procede a hacer los cálculos necesarios para obtener las variables, las cuales salen del subVI por medio de un cluster, siendo separadas cada una de ellas por un (*Unbundle By Name*) como se puede ver en la figura 4.20 esto se ejecuta cinco veces por segundo.

En la figura 4.21 se ilustra el ciclo While dos el cual también se encuentra dentro de la secuencia uno esto se puede corroborar en la figura 4.19.

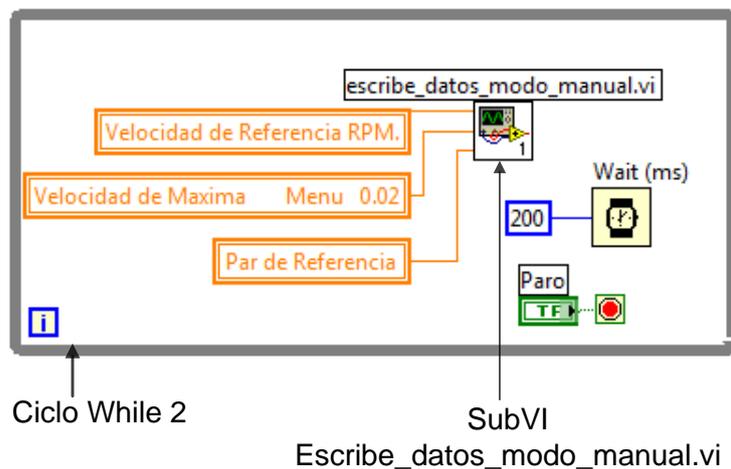


Figura 4. 21 Ciclo While dos.

El ciclo While dos es el encargado de escribir en las salidas analógicas, las señales de referencia tanto de par como de velocidad para que estas sean enviadas al Unidrive SP 3201.

Estas señales de referencias son mandadas por el usuario el cual determina estos valores a través del panel frontal de subVI modo manual.vi.

En la figura 4.22 se ilustra el ciclo While tres, en el cual se encuentra un subVI llamado Grafica_datos.vi y es utilizado para graficar las variables que se están calculando en el subVI lee_cal_variables.vi y es gracias a este subVI que se pueden visualizar en las gráficas las variables adquiridas.

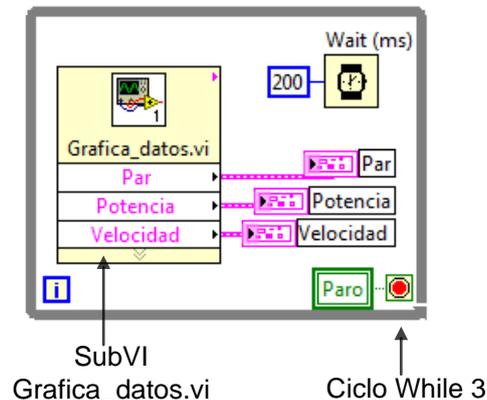


Figura 4. 22 Ciclo While tres.

Ahora se continuará con la secuencia dos, en la cual se finaliza este subVI, esta secuencia se ilustra en la figura 4.23.

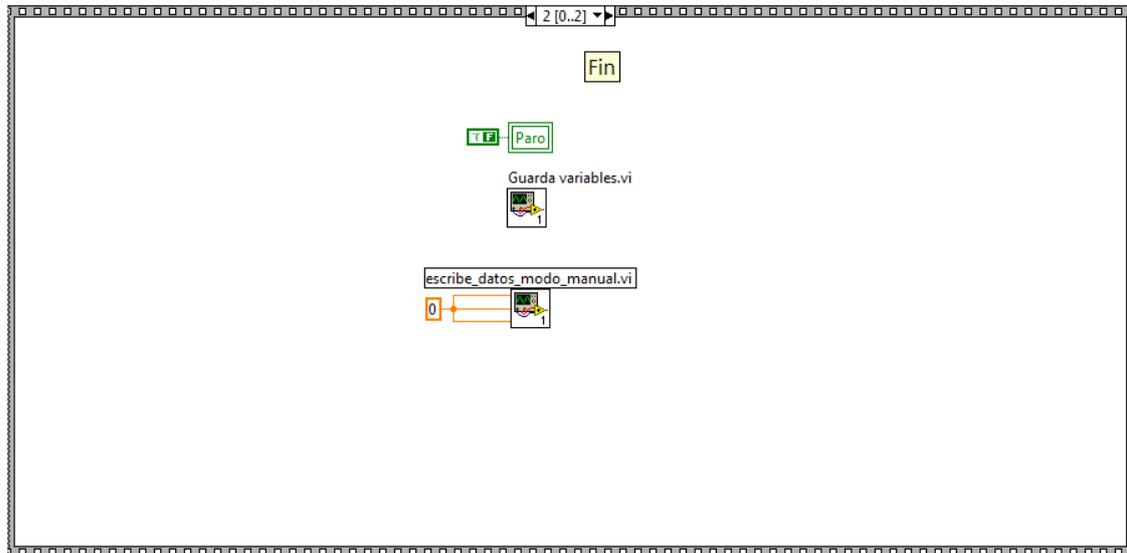


Figura 4. 23 Secuencia dos (fin del subVI).

En esta secuencia se tienen dos subVI el primero llamado guarda variables que es utilizado para guardar en un archivo de texto los valores que se adquirieron durante la ejecución del subVI modo manual las variables de velocidad, par, corriente etc. El segundo subVI es escribe_datos_modos_manual.vi y se utiliza para mandar dos señales de referencia una de par y otra de velocidad ambas con un valor de cero. De esta forma se deshabilita al electrodinamómetro.

4.3 Descripción del subVI modo automático

El subVI llamado modo automático.vi es uno de los tres modos de trabajo del electrodinamómetro, y se caracteriza porque, el electrodinamómetro recibe las señales de referencia de modo automático esto quiere decir que el usuario no está cambiando el valor de las señales de referencia como se hace en el modo manual, esto se hace en automático ejecutado por el software, el usuario únicamente selecciona el ciclo de trabajo que desee utilizar y en su defecto, si el usuario desea diseñar un ciclo en específico, el usuario lo puede configurar, sin embargo la señal de referencia solo puede tener tres comportamientos diferentes (lineal, cuadrático y constante) esto se explica más adelante cuando se discute el subVI llamado parámetros.vi. En la figura 4.24 se ilustra el panel frontal del subVI modo automático.

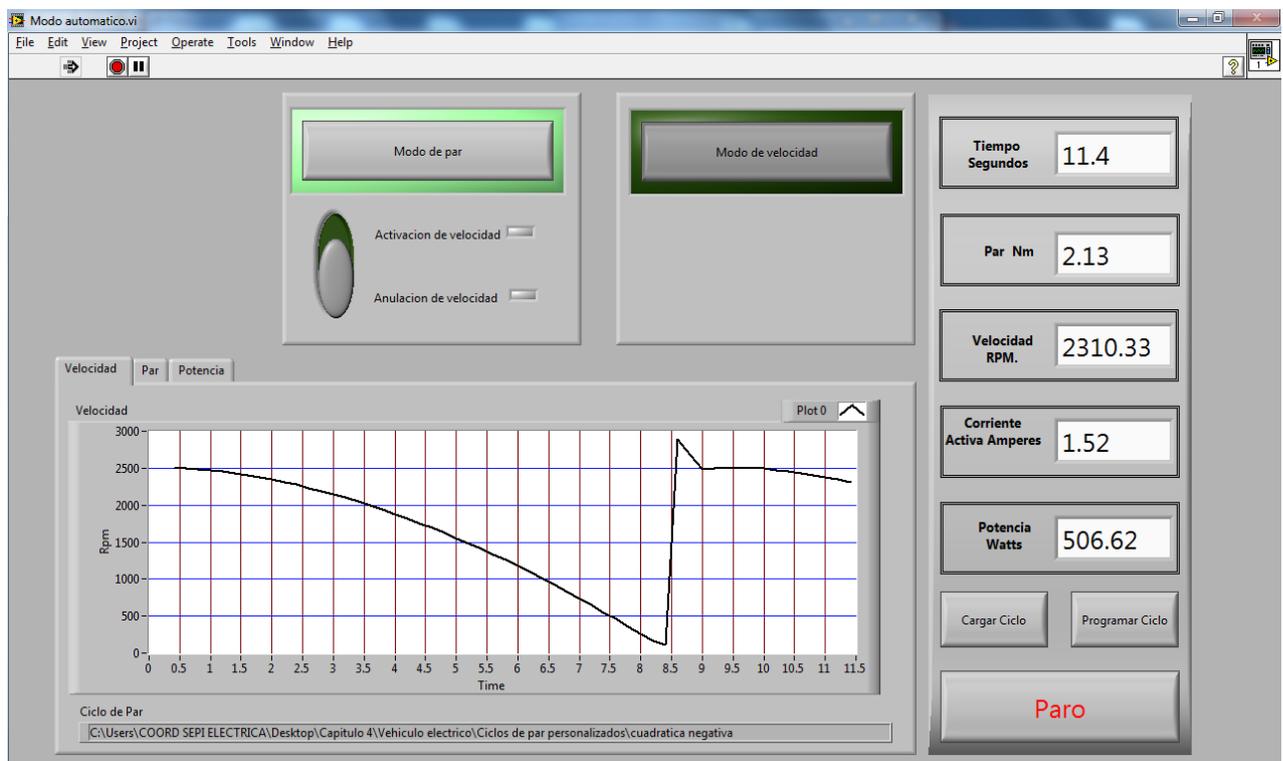


Figura 4. 24 Panel frontal del subVI Modo automatico.vi

En el panel frontal de la figura 4.24 se pueden observar seis botones los cuales son utilizados para modificar el comportamiento del electrodinamómetro ya que se puede configurar para trabajar como señal de par o señal de velocidad.

Por ejemplo si se configura como referencia de velocidad se genera una señal que fue programada por el usuario y se utiliza como señal de referencia de velocidad, en cambio si se configura como referencia de par esa misma pasa a ser utilizada como señal de referencia de par teniendo la opción de generar movimiento en la flecha cuando este par sea mayor que el de la maquina motriz este movimiento tiene como límite la velocidad máxima configurada en el accionamiento sin embargo también se puede configurar con anulación de velocidad esto significa que genera un par sin generar movimiento en la flecha.

En la figura 4.25 se ilustra el diagrama de bloques del subVI modo automatico.vi el cual está constituido esencialmente por una estructura de secuencia formada por cuatro secuencias.

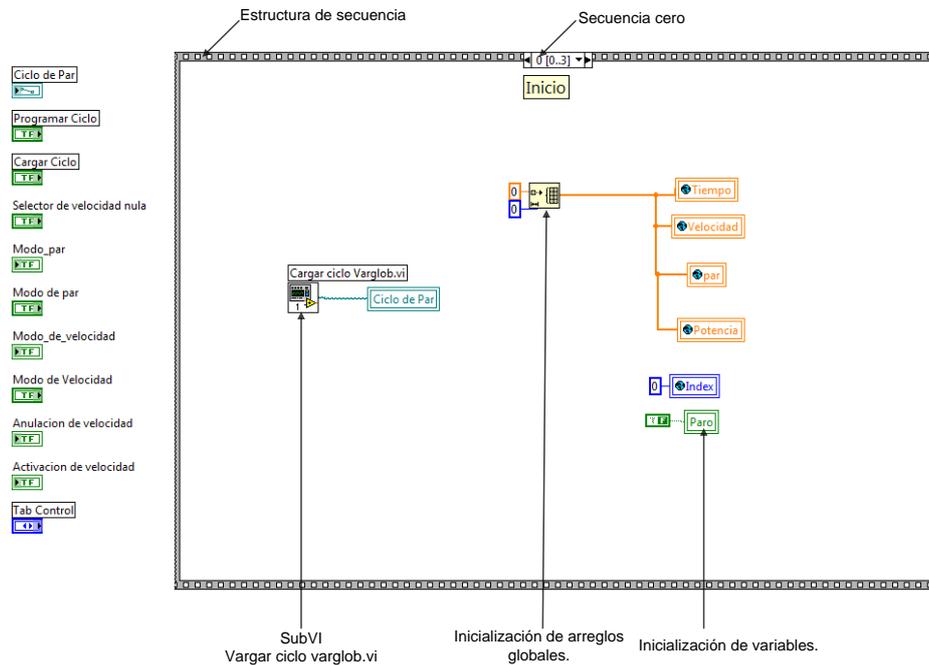


Figura 4. 25 Secuencia cero (Inicio).

En la figura 4.25 se encuentra la secuencia cero (inicio), que básicamente se utiliza para inicializar los arreglos globales que se utilizan para graficar las variables, también dentro de la secuencia cero se encuentra un subVI llamado cargar ciclo varglob.vi que es utilizado para darle al usuario la posibilidad de seleccionar el ciclo de trabajo que será la señal de referencia del electrodinamómetro.

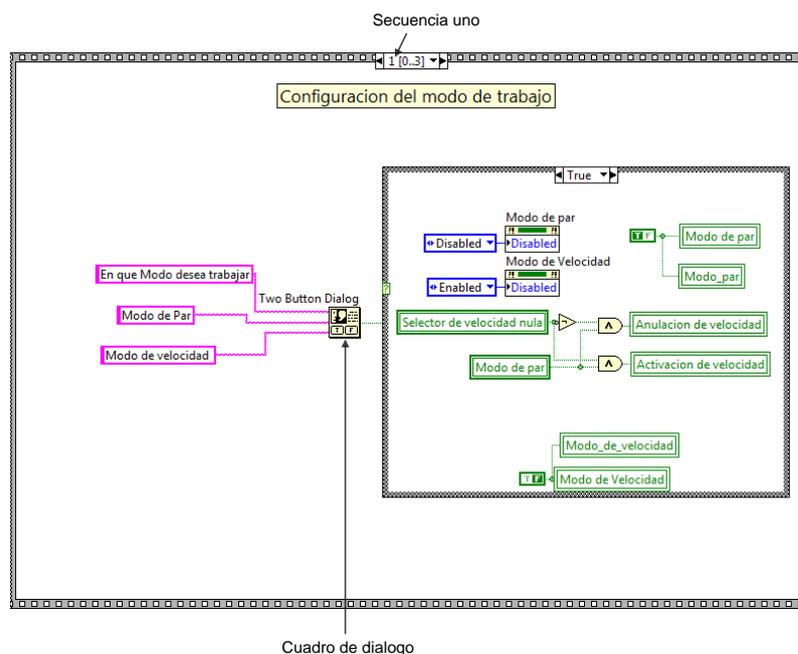


Figura 4. 26 Secuencia uno (configuración del modo).

En la figura 4.26 se ilustra la secuencia uno que se utiliza para enviar un cuadro de dialogo al usuario para que el configure el electrodinamómetro, ya sea en modo de velocidad o en modo de par, el bloque que se utiliza para mandar el cuadro de dialogo es un (*two botton dialog*). El cuadro de dialogo que se envía al usuario se ilustra en la figura 4.27.

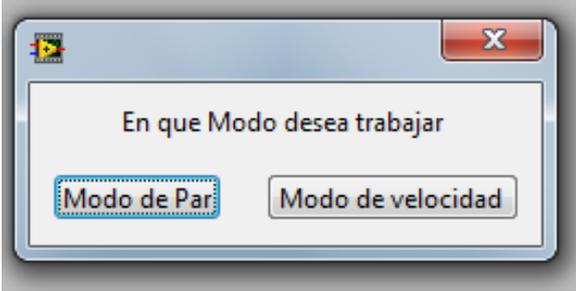


Figura 4. 27 Cuadro de dialogo del subVI modo automático.

En caso de que el usuario elija modo de par, la señal que se encuentra programada dentro del ciclo que selecciona el usuario se utiliza como señal de referencia de par de lo contrario si el usuario selecciona modo de velocidad esta señal se utiliza como señal de referencia de velocidad.

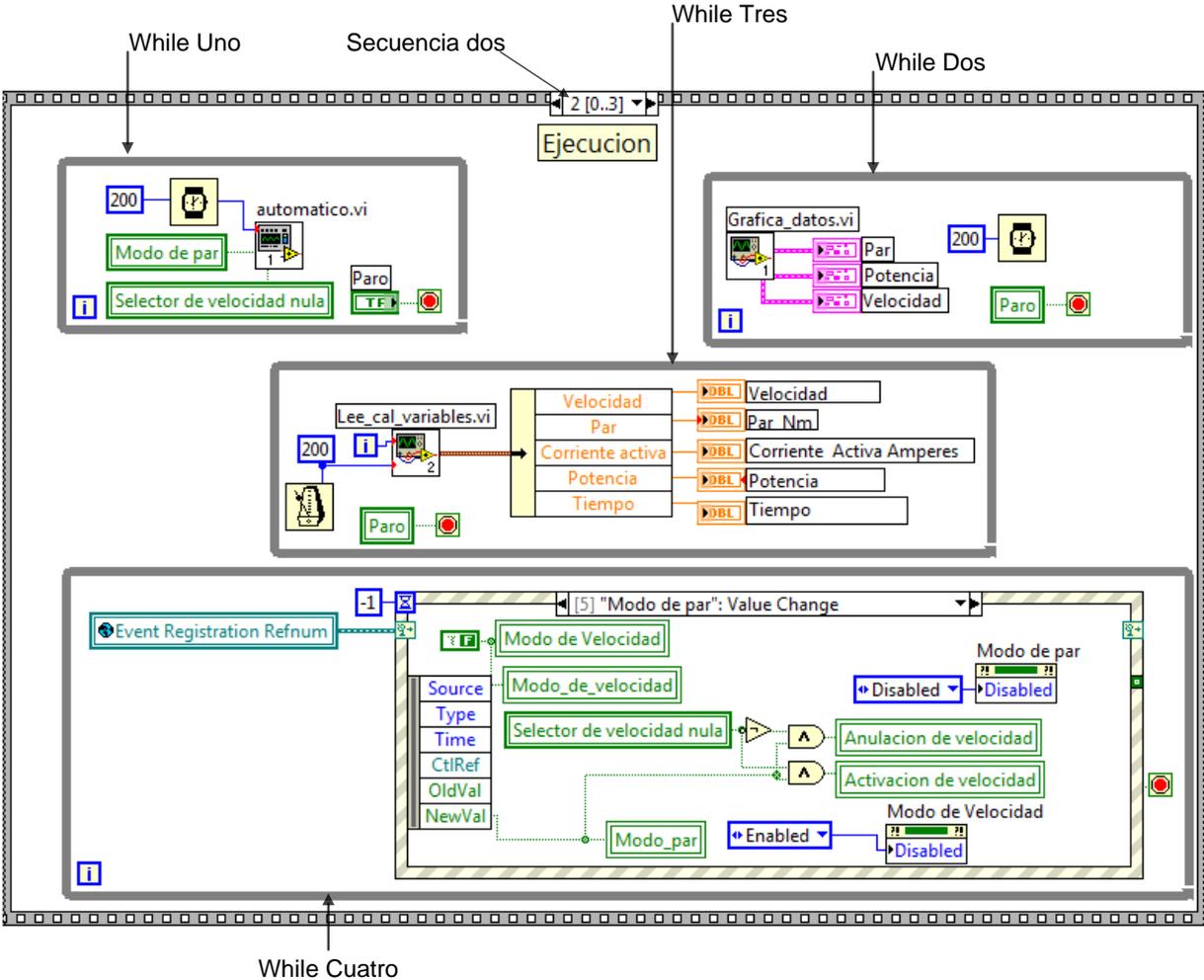


Figura 4. 28 Secuencia dos (Ejecución).

En la figura 4.28 se ilustra la secuencia dos en la cual se encuentran cuatro ciclos while, estos ciclos se encargan de las funciones primordiales del subVI modo automático por ejemplo el ciclo while uno se encarga de generar la señal de referencia y mandarla a las salidas analógicas correspondientes ya sea de par o de velocidad, el ciclo while dos grafica las variables de par, potencia y velocidad esto se realiza a través del subVI grafica datos, el ciclo while tres por medio del subVI Lee_cal_variables.vi manda leer las entradas analógicas de la tarjeta NI USB 6211 para calcular la corriente activa de la máquina y una vez que son adquiridas se muestran en el panel frontal, por último el ciclo while número cuatro es utilizado para esperar que ocurra un evento en el panel frontal ya sea el cambio de valor de un botón como puede ser modo de par, modo de velocidad, cargar ciclo, programar ciclo o paro.

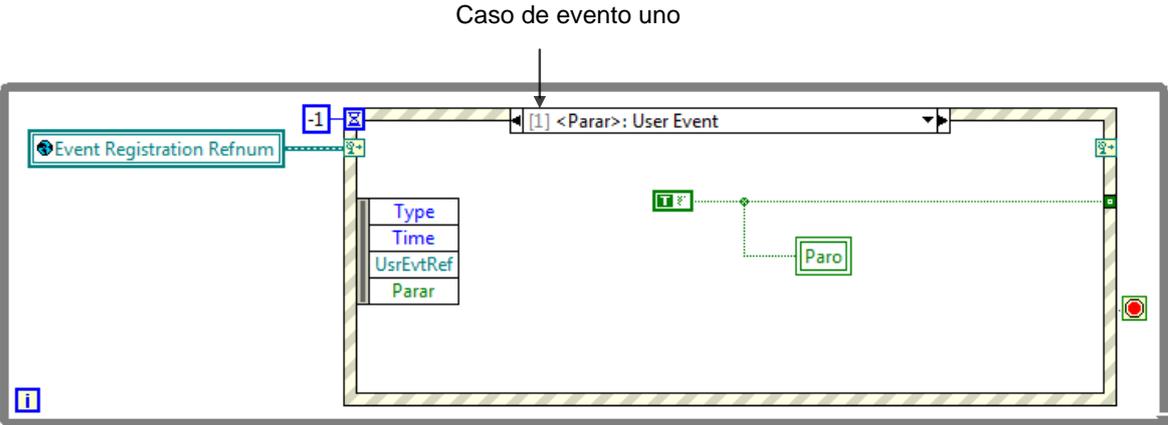


Figura 4. 29 Caso de evento uno (parar).

En la figura 4.29 se ilustra el caso de evento parar el cual es generado desde otro VI llamado programa principal, este evento es utilizado para concluir (terminar) este subVI en otra palabras al pulsar el botón parar desde el panel frontal del VI programa principal.vi se termina de ejecutar este subVI (modo automatico.vi).

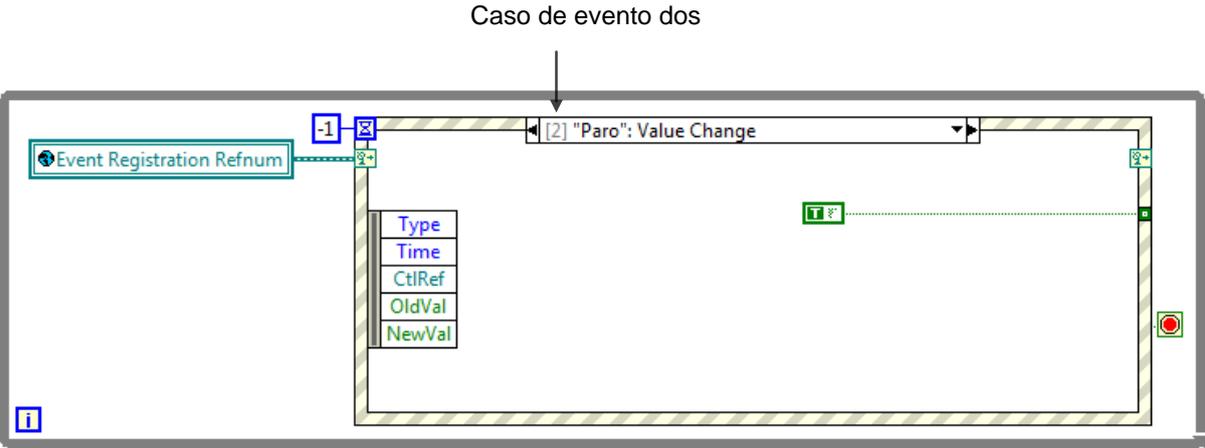


Figura 4. 30 caso de evento dos (Paro).

En la figura 4.30 se ilustra el caso de evento paro que es generado dentro del mismo subVI específicamente por el botón paro, este botón se encuentra en el panel frontal, como lo ilustra la figura 4.24 y se encarga de parar la ejecución de este subVI (modo automático).

En la figura 4.31 se muestra el caso de evento número tres el cual se activa cuando el botón programar ciclo cambia de valor.

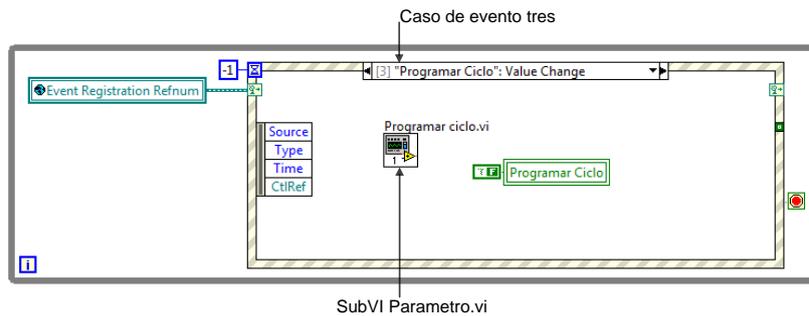


Figura 4. 31 Caso de evento tres (Programar Ciclo).

El caso de evento programar ciclo se utiliza para llamar al subVI llamado programar ciclo.vi el cual ejecuta su código, que se encarga de preguntar al usuario como desea configurar el ciclo, una vez que el usuario configura el ciclo finaliza guardando dicho ciclo como un archivo de datos.

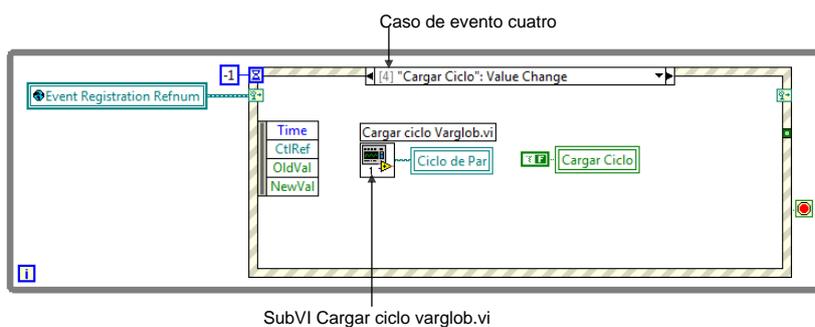


Figura 4. 32 Caso de evento cuatro (cargar ciclo).

En la figura 4.32 se ilustra el caso de evento cuatro (cargar ciclo) que se encarga de cambiar el ciclo que se está ejecutando como señal de referencia, también se transfiere la dirección y el nombre del ciclo que se está ejecutando a una variable local llamada ciclo de par. Esto se hace a través del subVI llamado cargar ciclo varglob.vi.

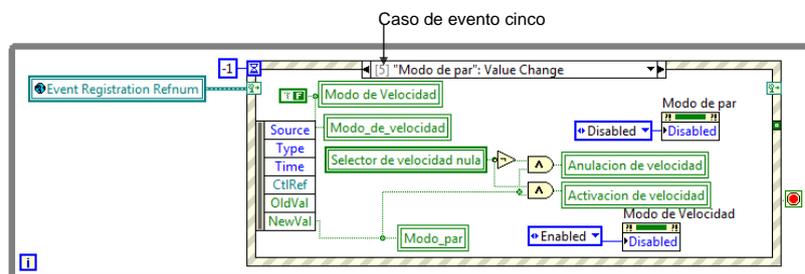


Figura 4. 33 Caso de evento cinco (modo de par).

En la figura 4.33 se ilustra el caso de evento cinco (modo de par), el cual hace el cambio de los indicadores del panel frontal, para mostrarle al usuario cual es la configuración que está utilizando el electrodinamómetro en ese momento por ejemplo si se activa el modo de par el

indicador led que está al fondo del botón de modo de par, cambiará a color oscuro indicando que se encuentra configurando en dicho modo y también se activará un led que indica si está anulada la velocidad o no, dependiendo en qué posición se encuentre el selector de anulación de velocidad, una vez que se haya seleccionado el modo de par el botón quedara deshabilitado y se habilitará el botón modo de velocidad.

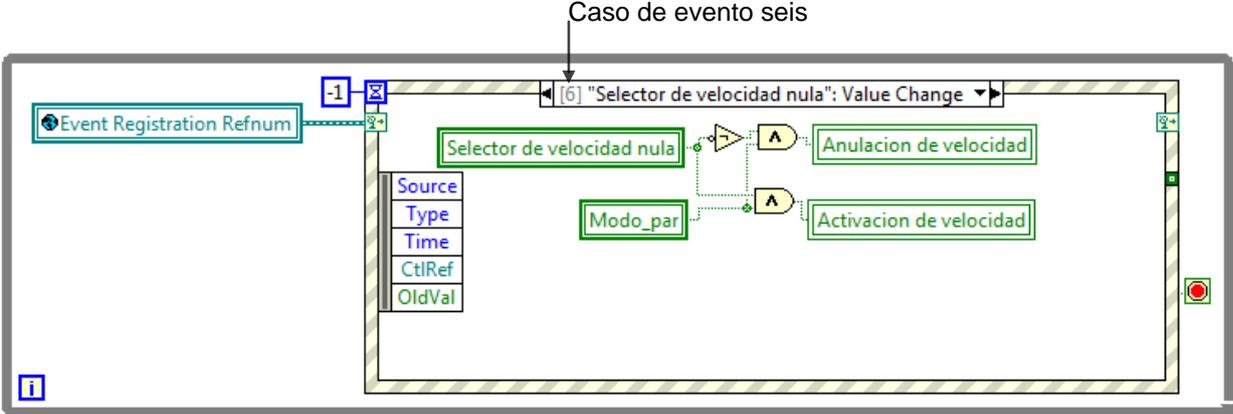


Figura 4. 34 Caso de evento seis (Selector de modo de velocidad nula).

En la figura 4.34 se muestra el caso de evento seis (selector de velocidad nula) dentro del cual se efectúa el cambio de estado de los dos leds, que indican si el electrodinamómetro está trabajando con la velocidad anulada o activada esto cuando se configura en modo de par.

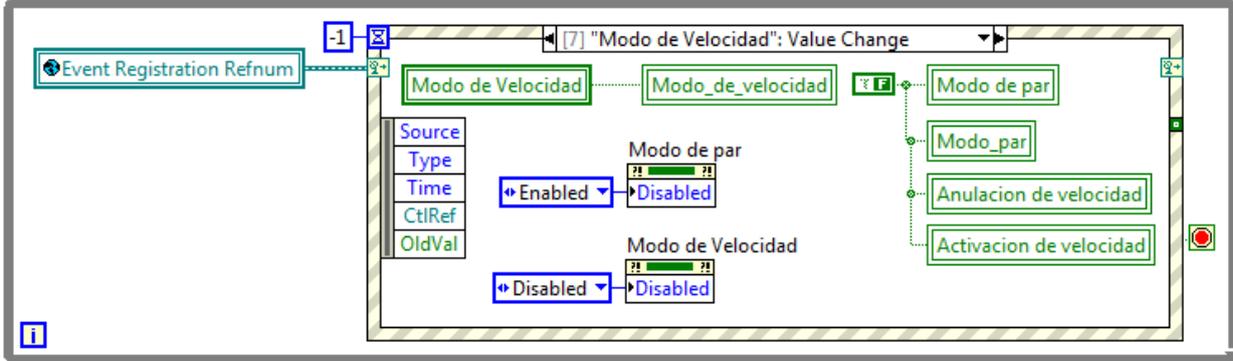


Figura 4. 35 Caso de evento siete (Modo de velocidad).

En la figura 4.35 se ilustra el último caso de evento (modo de velocidad) en este evento se asignan los nuevos valores de los indicadores del panel frontal indicándole al usuario que el electrodinamómetro está configurado para trabajar en modo de velocidad y se habilita el botón modo de par a través de un nodo de propiedad siendo lo inverso en el nodo de propiedad del botón modo de velocidad también se les da un valor falso a los botones modo de par, modo_par, anulación de velocidad, activación de velocidad.

Por último para finalizar con el subVI modo automático.vi se describirá la secuencia tres (fin) la cual se ilustra en la figura 4.36.

En la secuencia tres (fin), básicamente lo que se hace es guardar las variables que se graficaron durante le ejecución del subVI modo automatico.vi las guarda como un archivo de datos y por último se les da un valor falso a los indicadores y controles del panel frontal.

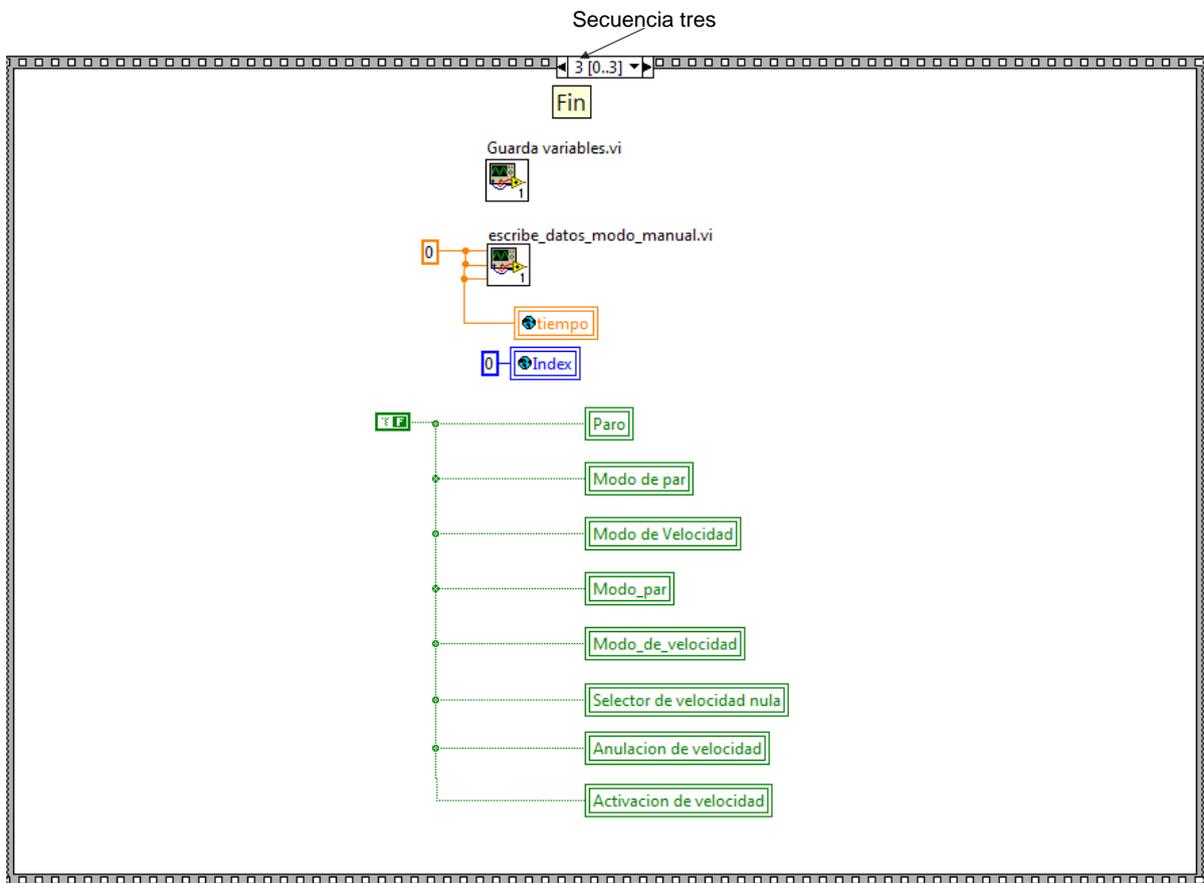


Figura 4. 36 Secuencia tres (fin).

4.4 Descripción del subVI modo de vehículo

En el panel frontal del subVI modo de vehiculo.vi se encuentra una carpeta de dos pestañas, en una de las pestañas se encuentra un velocímetro y un tacómetro los cuales emulan el comportamiento del motor como si se encontrara en el interior de un vehículo eléctrico, las características del vehículo se configuran en la misma pestaña dentro de un cluster llamado parámetros del vehículo y en la siguiente pestaña se encuentran dos gráficas en una se grafica el comportamiento de la velocidad con respecto al tiempo y en la otra se grafica el par emulado (par de referencia) y el par generado por el electrodinamómetro esto con la finalidad de comparar el desempeño del accionamiento el cual lee las señales de referencia cada 250µs el cual es suficientemente rápido ya que se está emulando un sistema mecánico el cual tiene un comportamiento lento comparado con un sistema eléctrico.

En la figura 4.37 se ilustra el panel frontal del subVI modo de vehículo eléctrico en la primera pestaña.

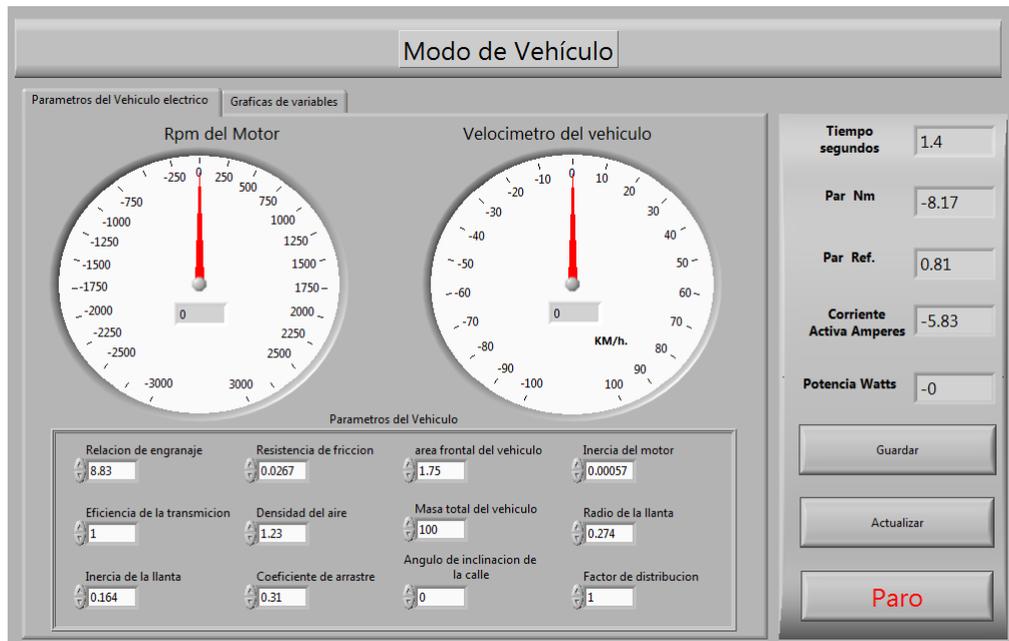


Figura 4. 37 Panel frontal del subVI modo de Vehículo en la pestaña uno.

En la figura 4.38 se muestra el panel frontal del subVI modo de vehiculo.vi en la pestaña dos en la cual se encuentran las gráficas de par y velocidad.

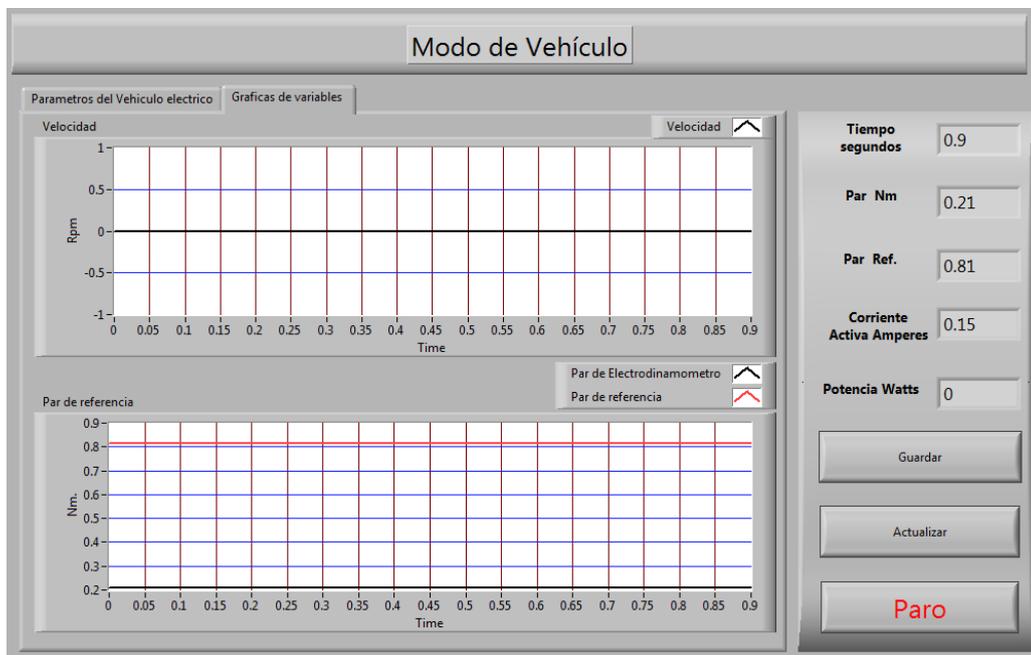


Figura 4. 38 Panel frontal del subVI modo de vehículo.vi en la pestaña dos.

En la parte derecha del panel frontal se encuentran las variables del electrodinamómetro los cuales son calculados con las señales de retroalimentación que el Unidrive SP 3201 envía a través de la tarjeta de adquisición de datos.

En la figura 4.39 se muestra el diagrama de bloques del subVI modo de vehículo.vi el cual está constituido por una estructura de secuencias. En la estructura de secuencia cero (INICIO) se llama al subVI lee_archivo_binario.vi el cual lee un archivo binario para cargar la configuración del vehículo, también dentro de la secuencia cero se inicializan las variables globales en cero.

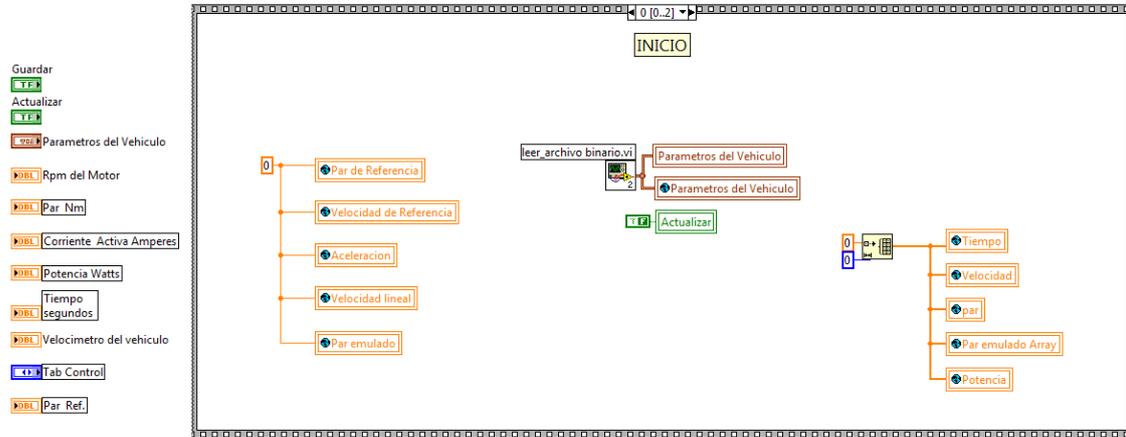


Figura 4. 39 Estructura de secuencia número cero (inicio).

En la figura 4.40 se ilustra la estructura de secuencias uno dentro de la cual se encuentran cuatro ciclos while los cuales se ejecutan en paralelo. El ciclo while uno tiene la función de esperar por los eventos ya sea que se generen dentro del mismo subVI o que se generen en el VI programa principal, el ciclo while dos es utilizado para escribir el par de referencia en la tarjeta de adquisición de datos esto se hace a través del subVI llamado escribe_datos.vi, en el ciclo while tres se leen las entradas de corriente y velocidad de la tarjeta de adquisición de datos y se despliegan en el panel frontal del subVI, modo de vehículo.vi, por último en el ciclo while cuatro se grafican las variables de velocidad y par a través del subVI llamado grafica_datos.vi y dichas gráficas se encuentran en la pestaña dos de la carpeta que se localiza en el panel frontal.

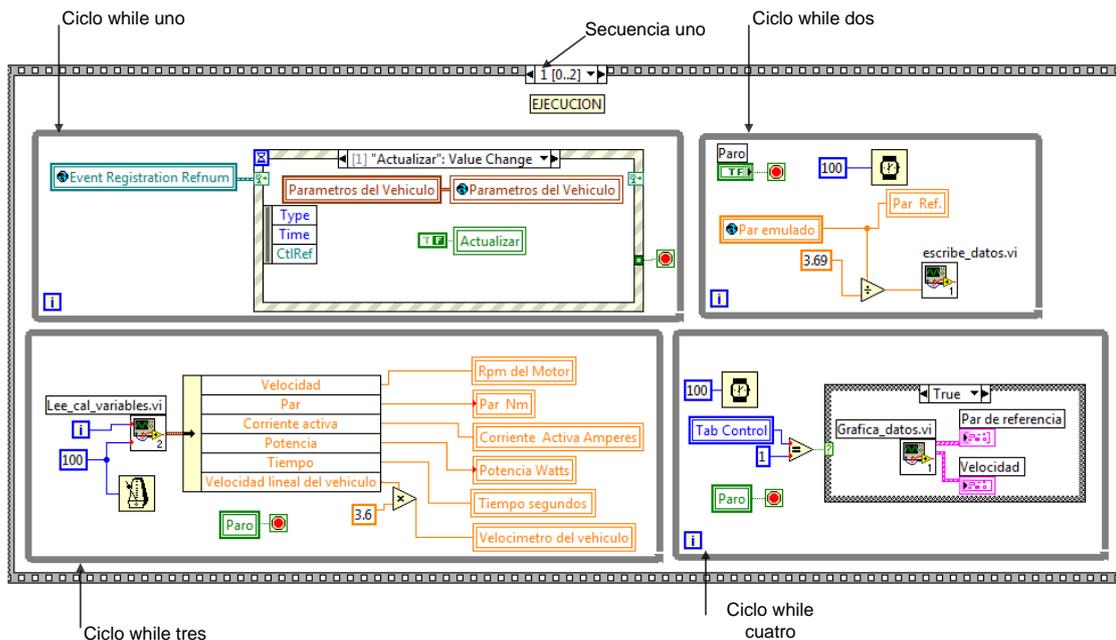


Figura 4. 40 Estructura de secuencia uno (Ejecución).

En la figura 4.41 se muestra la secuencia dos dentro de la cual se encuentran dos subVI llamados guarda variables.vi y escribe_datos_modos_manual.vi, el primer subVI se encarga de guardar todas las variables graficadas en un archivo de datos y el segundo manda las señales de referencia de par y velocidad con un valor de cero de esta manera concluye el subVI modo de vehiculo.vi.

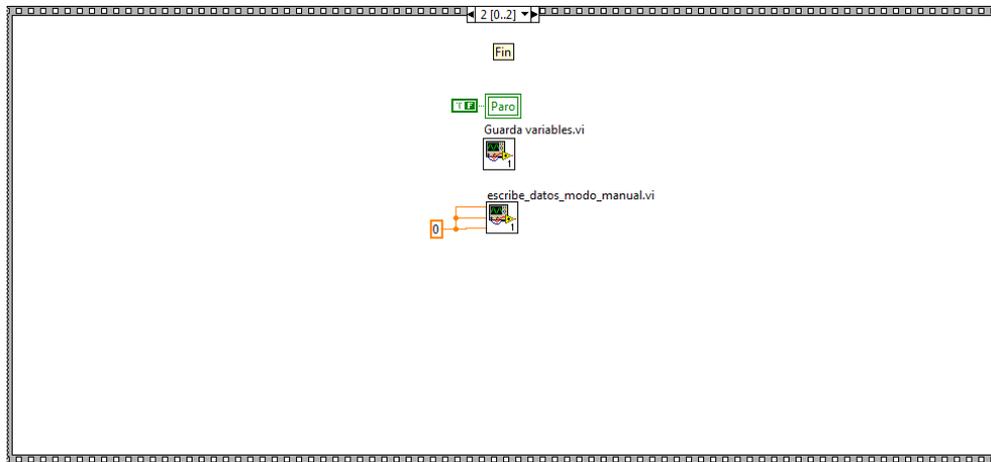


Figura 4. 41 Estructura de secuencia dos (Fin).

4.5 Descripción del subVI Cargar ciclo.vi

En la figura 4.42 se ilustra el panel frontal de subVI cargar ciclo.vi dentro del cual hay un cluster llamado configuración y una variable string llamada ciclo de par, estas variables se utilizan para transferir la configuración del ciclo a una variable global llamada configuración. Esto se ilustra en el diagrama de bloques del subVI cargar ciclo.vi

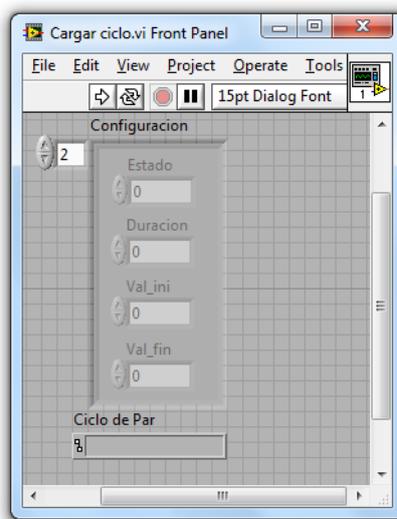


Figura 4. 42 Panel frontal del subVI Cargar ciclo.vi

En el diagrama de bloques que se muestra en la figura 4.43 en la parte izquierda se encuentra un bloque llamado open_create_replace file.vi el cual tiene la función de mandar un cuadro de dialogo para que el usuario seleccione el archivo que desea abrir para que posteriormente sea utilizado como señal de referencia, también en la parte derecha se encuentra una estructura case, que se utiliza para escribir la configuración del ciclo en la variable global tipo cluster llamada configuración, en caso de que el usuario seleccione un archivo, este archivo se carga en la variable global configuración y si el usuario no selecciona un archivo o cancela, se ejecuta el caso falso.

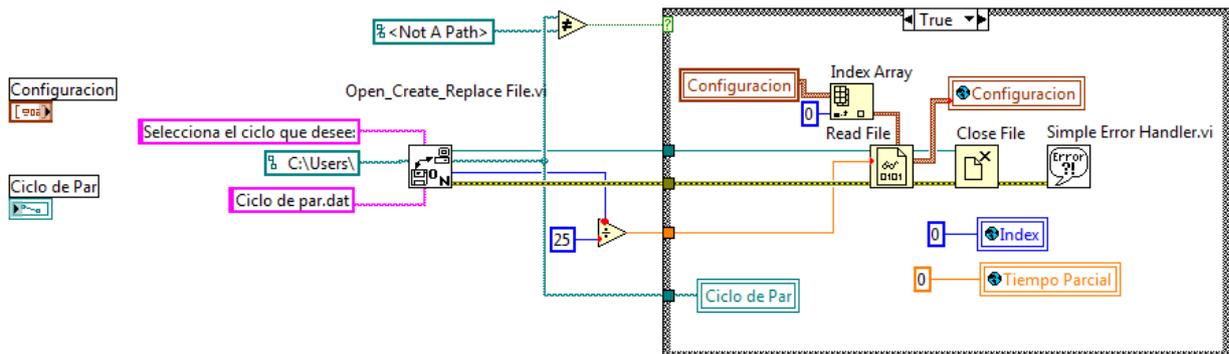


Figura 4. 43 Diagrama de bloques del subVI Cargar ciclo en el caso verdadero.

En la figura 4.44 se ilustra la estructura case, cuando la condición es falsa en este caso se carga en la variable global configuración valores definidos previamente, para que cuando el usuario no seleccione ningún ciclo o cancele el cuadro de dialogo, el electrodinamómetro continúe ejecutándose con esta configuración.

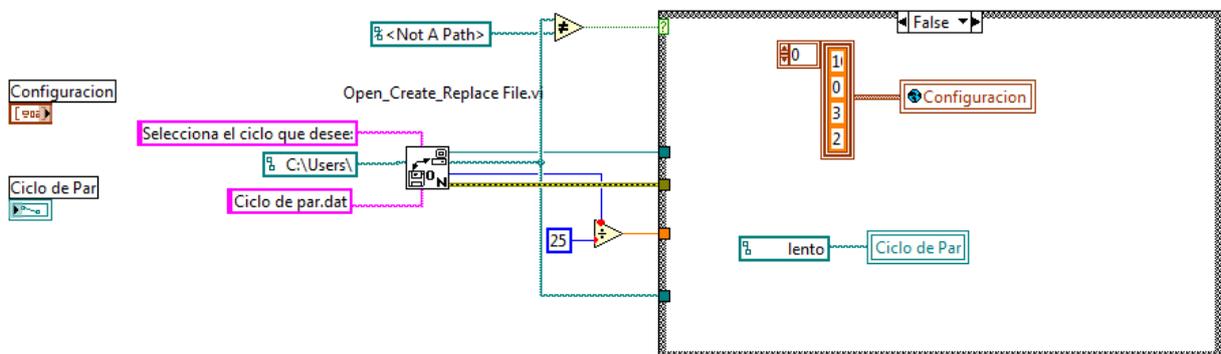


Figura 4. 44 Diagrama de bloques del subVI Cargar ciclo en el caso falso.

4.6 Descripción del subVI Derivada.vi

El subVI derivada.vi se utiliza para derivar la velocidad de la máquina y de esta manera obtener la aceleración debido a que la aceleración es requerida por el modelo del vehiculo. La señal de velocidad entra por la variable x y una vez derivada se transfiere el valor por medio de la variable dx, para esto es necesario indicar el incremento del tiempo por medio de la variable dt.

En la figura 4.45 se ilustra el panel frontal del subVI Derivada.vi

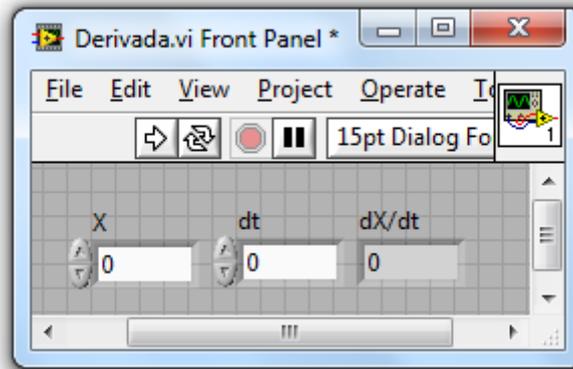


Figura 4. 45 Panel frontal del subVI Derivada.vi.

En la figura 4.46 se ilustra el diagrama de bloques del subVI.vi.

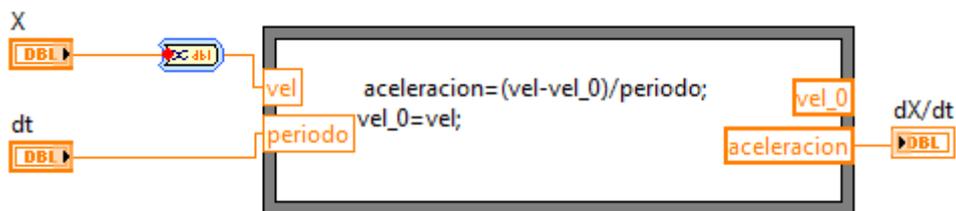


Figura 4. 46 Diagrama de bloques del subVI derivada.vi.

4.7 Descripción del subVI Escribe datos automat.vi

Este subVI realiza el cálculo del valor de la señal de referencia, la cual será enviada a través de la tarjeta NI USB 6211 por las salidas analógicas, para hacer el cálculo de las señales de referencia es necesario que la variable global llamada configuración este inicializada (que dicho arreglo tenga valores), ya que en este arreglo es donde se encuentra definida la duración y el tipo de la señal que se va a generar (constante, lineal o cuadrática). Para poder inicializar esta variable global el usuario selecciona el ciclo que desea utilizar como señal de referencia, esto se hace mediante el subVI cargar ciclo, una vez que la variable configuración contiene la información del ciclo, el subVI escribe datos extrae cuatro valores que contiene el cluster que son (estado, duración, valor inicial y valor final) los cuales serán descritos a continuación:

Estado: este valor indica que tipo de función se utilizará en el cálculo de la señal de referencia la cual puede tener tres valores cero, uno o dos y significan lo siguiente:

- Cero: indica que la señal tendrá un comportamiento constante.
- Uno: que la señal de referencia tendrá un comportamiento cuadrático.
- Dos: que la señal de referencia tendrá un comportamiento lineal.

Duración: determina la duración del estado seleccionado.

Valor inicial: indica el valor con el cual inicia la señal de referencia, el rango para esta variable es de 10 a -10, si el usuario introduce un valor fuera de este rango el programa manda un cuadro de dialogo indicando que el valor asignado se encuentra fuera de rango.

Valor final: indica el valor con el que finaliza la señal de referencia, el rango para esta variable es de 10 a -10, si el usuario introduce un valor fuera de este rango el programa manda un cuadro de dialogo indicando que el valor asignado se encuentra fuera de rango.

El panel frontal del subVI escribe datos automático se ilustra en la figura 4.47.

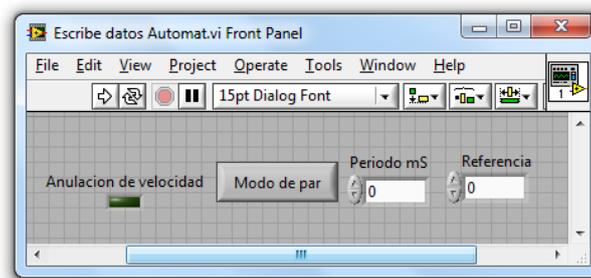


Figura 4. 47 Panel frontal del subVI Escribe datos automat.vi

El panel frontal muestra las cuatro variables, que se utilizan en el subVI escribe datos automat.vi para configurar el modo de trabajo del electrodinamómetro.

En la figura 4.48 se ilustra el diagrama de bloques del subVI escribe datos automat.vi.

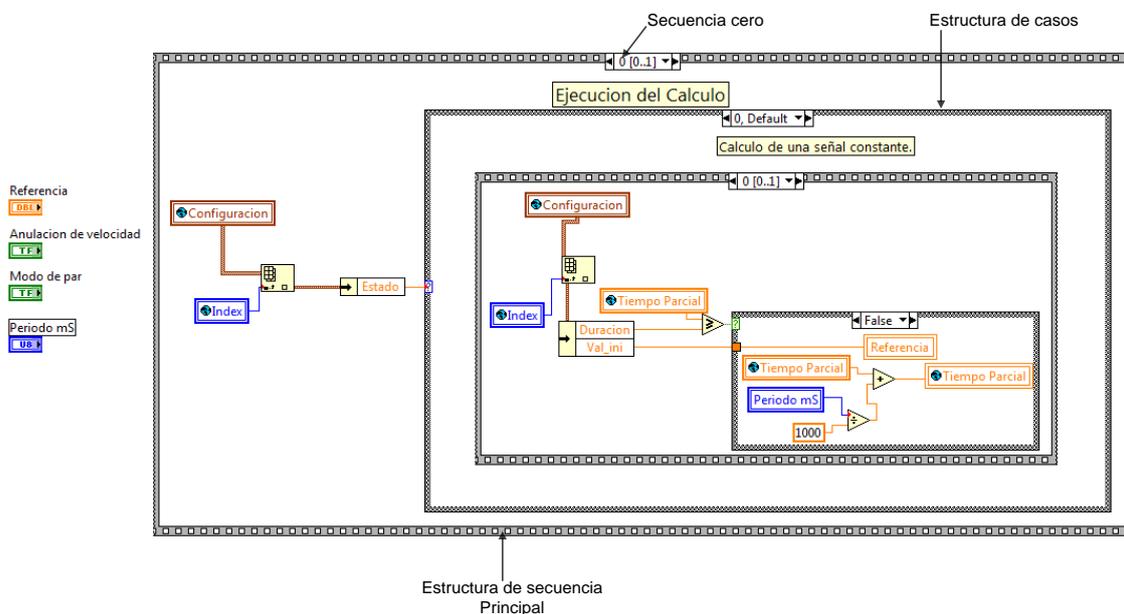


Figura 4. 48 Diagrama de bloques del subVI escribe datos automat.vi.

En la secuencia cero de la estructura de secuencias principal, se encuentra una estructura de casos, la cual tiene tres diferentes casos que son: cero y uno, dos. Estos casos ya fueron descritos al inicio del subcapítulo 4.7, a continuación se describirá el diagrama de bloques de cada uno de

los casos. En la figura 4.49 se ilustra el caso cero, el cual se utiliza para generar la señal de referencia con un comportamiento constante, el valor de la señal de referencia será constante hasta que la condición de tiempo se cumpla, la condición es que el tiempo parcial debe ser menor que la variable llamada Duración.

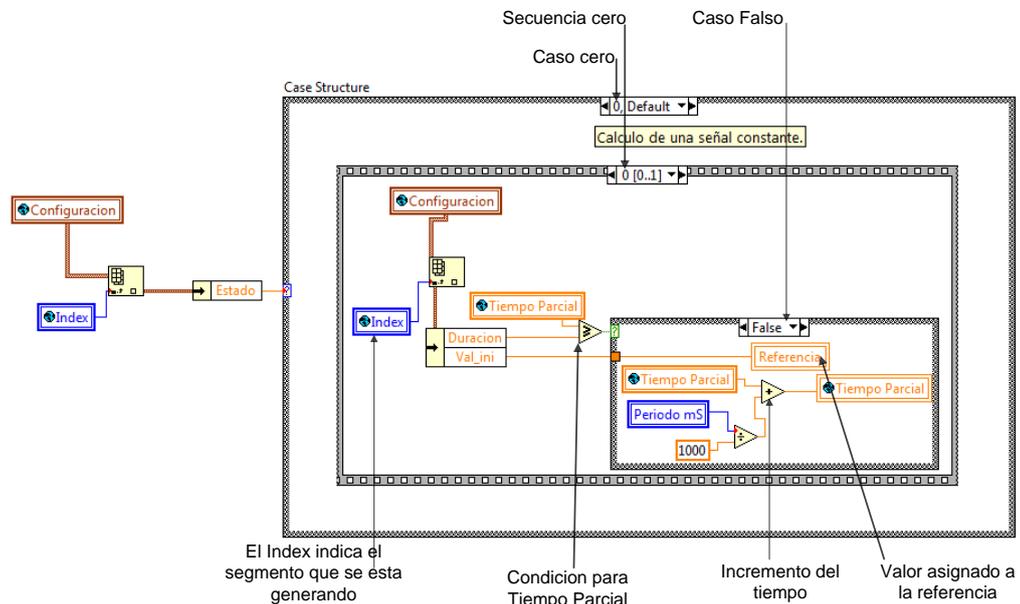


Figura 4. 49 Caso cero, secuencia cero, caso falso (generación de referencia constante).

En la figura 4.50 se ilustra el caso cero, secuencia cero, caso verdadero, en ella se reinicia la variable tiempo parcial y se incrementa en uno el index, esto ocurre cuando el tiempo parcial cumple con la condición de ser mayor o igual a la variable duración.

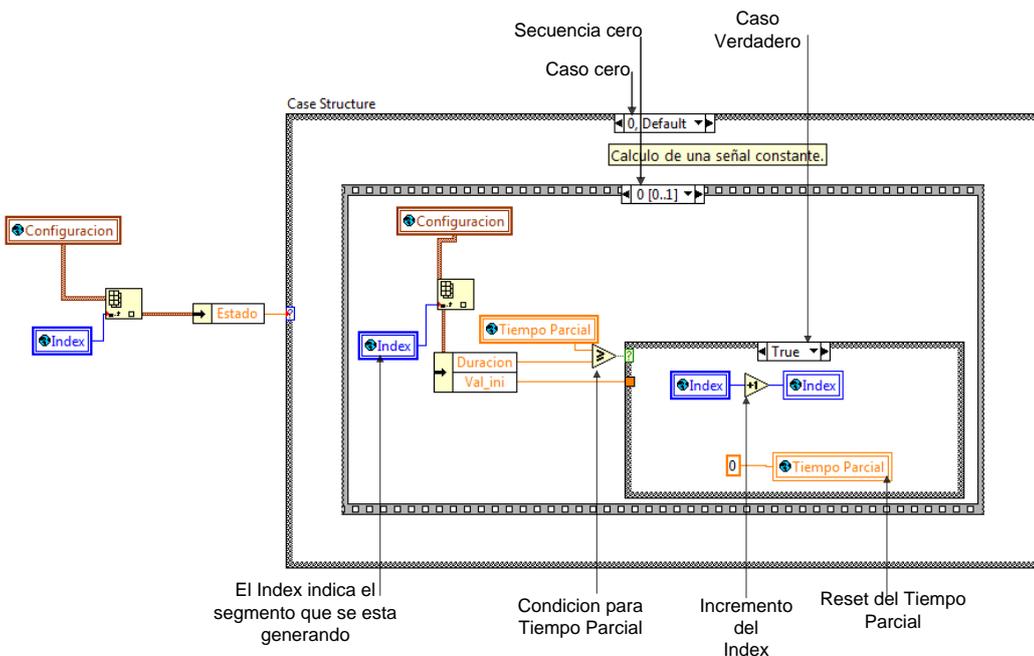


Figura 4. 50 Caso cero, secuencia cero, caso verdadero.

En la secuencia uno que se observa en la figura 4.51 se ilustra como la señal de referencia es asignada a la salida analógica uno, esto ocurre cuando la variable modo de par es falsa indicando que la variable referencia es utilizada como señal de referencia de velocidad, y la salida analógica dos es la referencia de par, la referencia de par puede tomar dos valores (10 o -10), el valor de 10 es asignado cuando la velocidad es positiva.

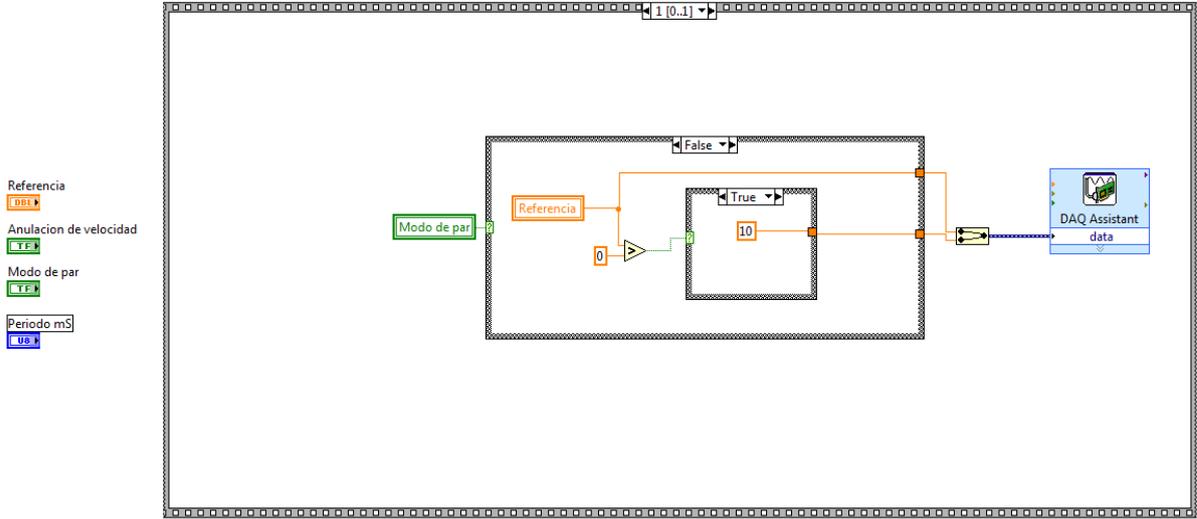


Figura 4. 51 Secuencia uno del subVI escribe datos automat.vi.

Cuando la variable referencia es utilizada como señal de referencia de velocidad y esta señal es negativa la señal de referencia de par también toma un valor negativo igual a (-10), como se ilustra en la figura 4.52.

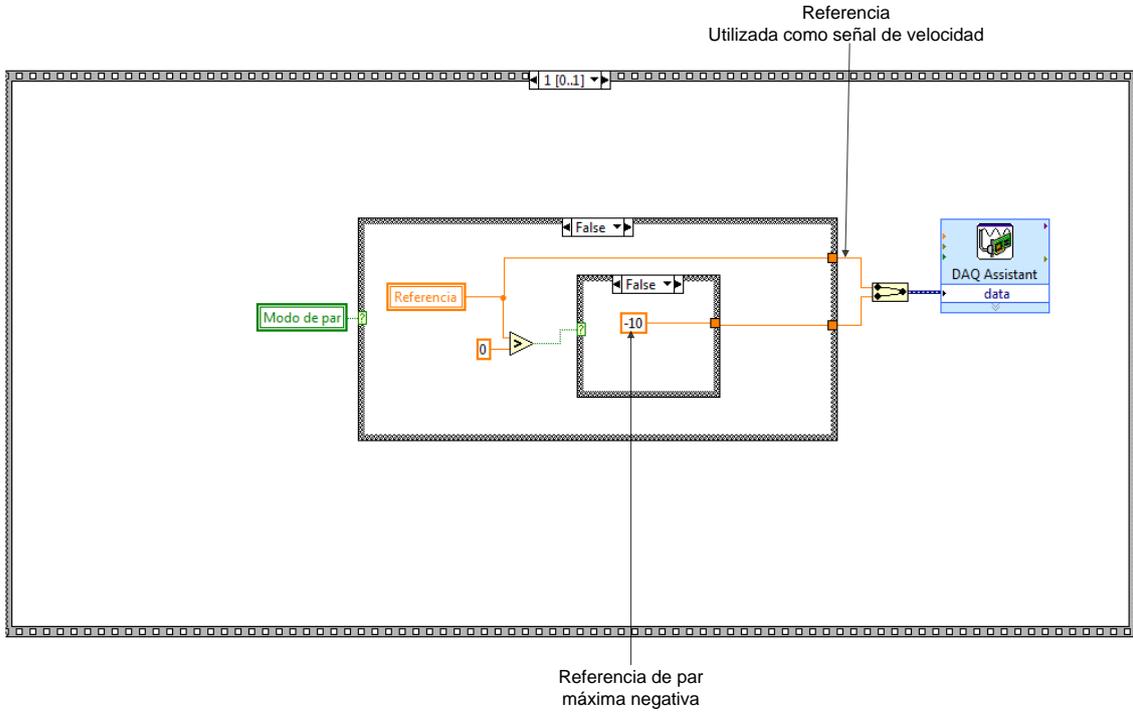


Figura 4. 52 Secuencia uno utilizando referencia como señal de velocidad.

En la figura 4.53 se ilustra la secuencia uno cuando el electrodinamómetro se configura como modo de par, y la señal de velocidad puede tomar dos valores, Este valor depende del valor de referencia si la referencia es positiva, la señal de velocidad tendrá un valor máximo positivo (10) y si referencia es negativa, la señal de referencia de velocidad tomara el valor máximo negativo (-10). Siempre y cuando la variable activación de velocidad sea verdadera de lo contrario el valor de la señal de referencia de velocidad será cero.

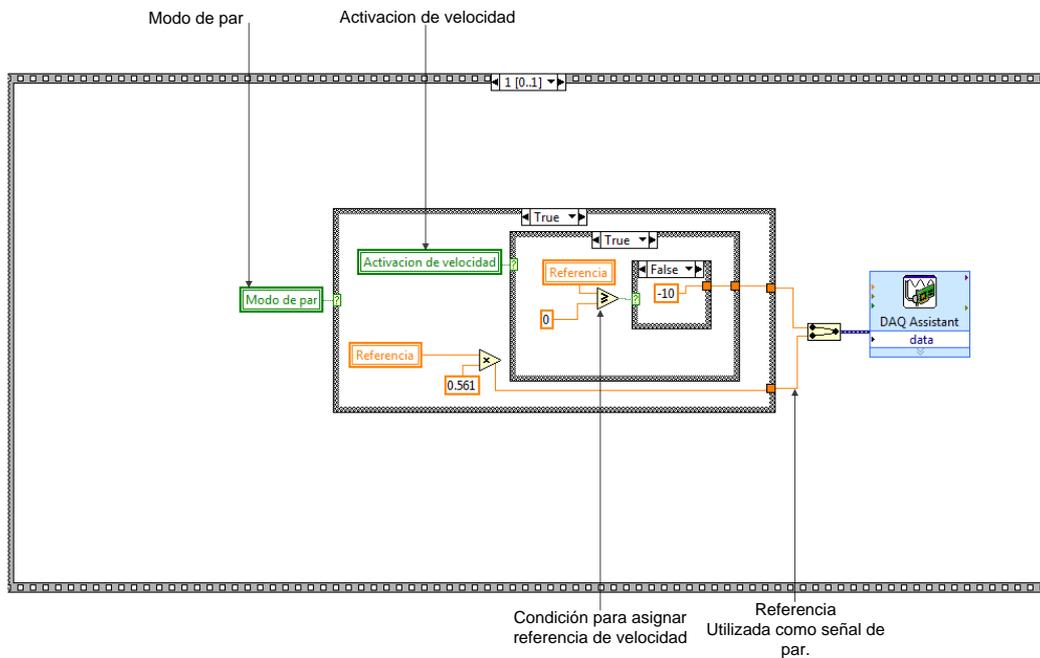


Figura 4. 53 Secuencia uno utilizando referencia como señal de par.

4.8 Descripción del subVI escribe datos.vi

En la figura 4.54 se ilustra el panel frontal del subVI escribe datos.vi, en el panel frontal se encuentran dos variables, una llamada velocidad y la otra par, es por medio de estas variables que el valor de par y velocidad entran al subVI para ser enviadas a las salidas analógicas de la tarjeta NI USB 6211.

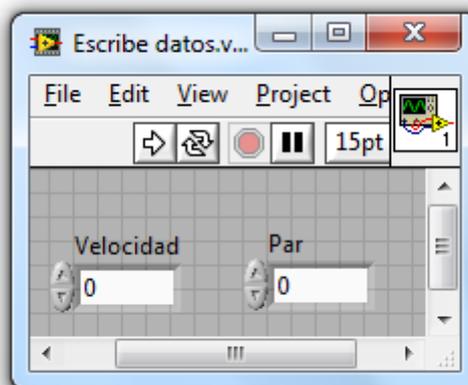


Figura 4. 54 Panel frontal del subVI escribe datos .vi

En la figura 4.55 se ilustra el diagrama de bloques del subVI escribe datos, este subVI es de los más sencillos ya que únicamente utiliza los valores de las variables para mandarlo a las salidas analógicas de la tarjeta por medio del bloque DAQ Assistant.

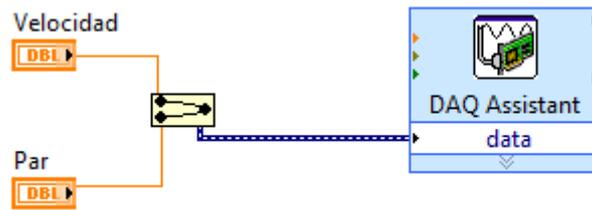


Figura 4. 55 Diagrama de bloques del subVI escribe datos.vi.

4.9 Descripción del subVI escribe archivo binario.vi

En la figura 5.56 se ilustra el panel frontal del subVI escribe archivo binario.vi.

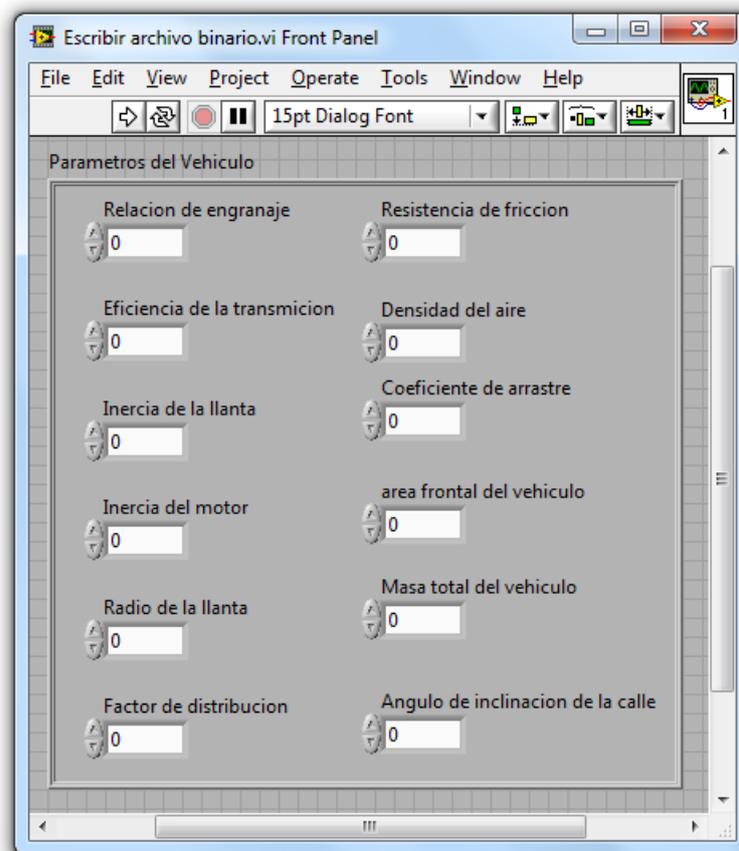


Figura 4. 56 Panel frontal del subVI escribe Archivo binario.vi.

En el panel frontal de la figura 4.56 se muestra la variable llamada, Parámetros del vehículo, esta variable es de tipo cluster y dentro del cluster existen doce variables las cuales son utilizadas para configurara la simulación del vehículo.

En la figura 4.57 se muestra el diagrama de bloques del subVI escribe archivo binario.vi.

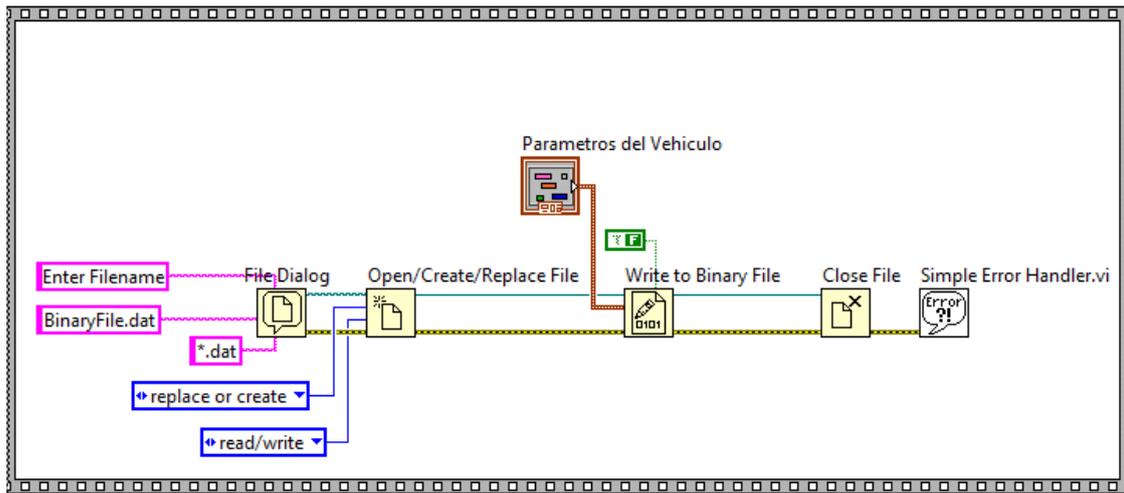


Figura 4. 57 Diagrama de bloques del subVI escribe archivo binario.vi.

Este diagrama de bloques se utiliza para escribir la variable que entra al subVI en un formato binario, al momento de ejecutarse este subVI al usuario le aparece un cuadro de dialogo para que, se le asigne el nombre con el cual se va a guardar este archivo.

4.10 Descripción del subVI Grafica datos.vi

En la figura 4.58 se muestra el panel frontal del subVI grafica datos.vi, dentro del cual se encuentran tres variables de tipo clusters (Velocidad, Potencia y Par) y la otra variable restante es, par emulado, que es un arreglo de clusters utilizado para graficar el par de referencia y el par del electrodinamómetro. Este subVI es utilizado para acondicionar los arreglos de las variables globales, que posteriormente se grafican en un xy graph.

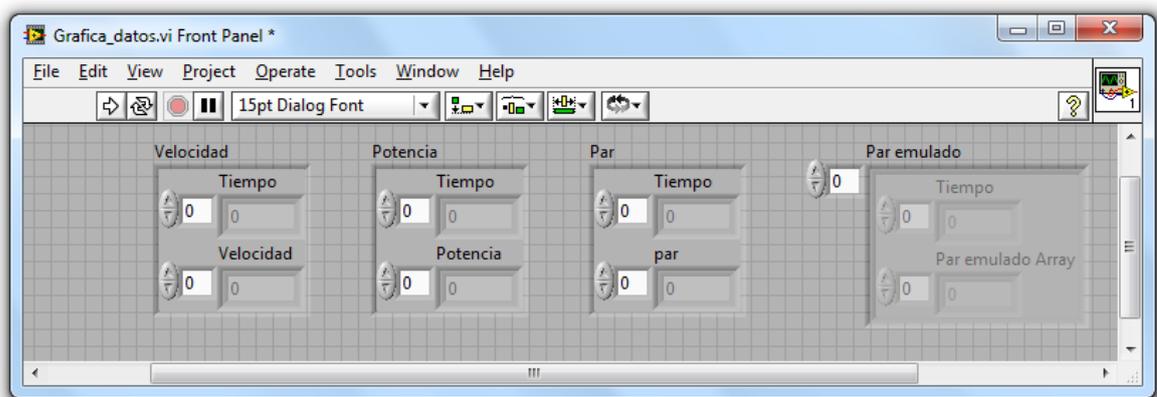


Figura 4. 58 Panel frontal del subVI Grafica datos.vi.

En el diagrama de bloques de la figura 4.59 se ilustra cómo se acondicionan los arreglos para poder ser desplegados en las graficas correspondientes, para esto es necesario dos arreglos que sean de las mismas dimensiones, estos son unidos por medio de un (*bundle*) para formar una

variable de tipo cluster, y de esta manera graficarlas. Cuando se requiere graficar dos variables en una sola gráfica, es necesario utilizar un built array para unir los dos clusters como se muestra en la figura 4.59.

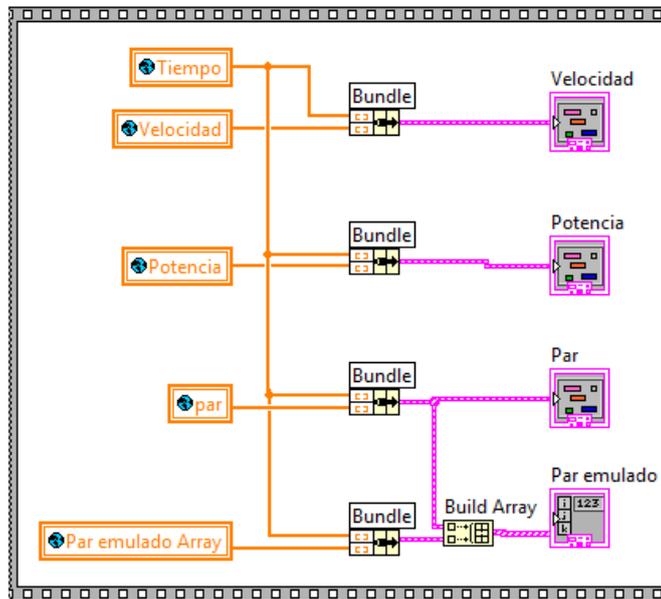


Figura 4. 59 Diagrama de bloques del subVI Grafica datos.vi.

4.11 Descripción del subVI Guarda variables .vi

En el panel frontal del subVI guarda variables .vi no existe ninguna variable local, solamente se utilizan variables globales en el diagrama de bloques como se ilustra en la figura 4.60. En este subVI se hace un arreglo de dos dimensiones y se manda escribir como un archivo de datos.

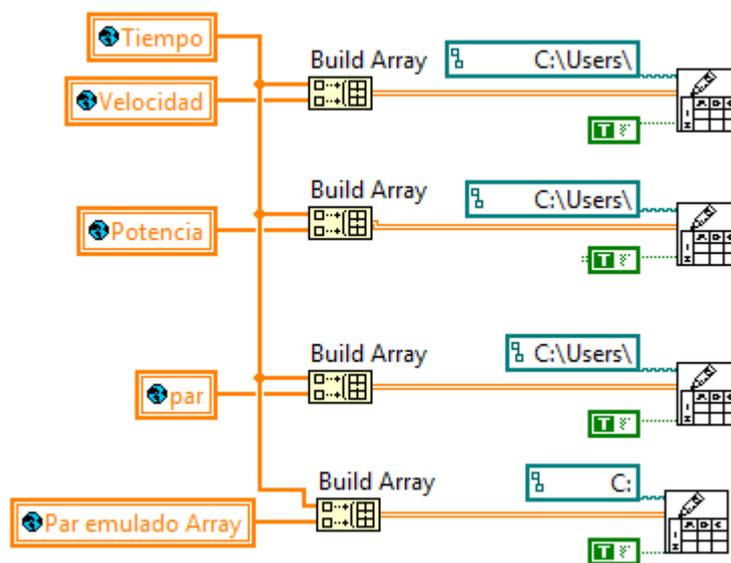


Figura 4. 60 Diagrama de bloques del subVI Guarda variables .vi

4.12 Descripción del subVI Adquisición.vi

En la figura 4.61 se ilustra el panel frontal del subVI Adquisicion.vi, en el que se encuentran las variables utilizadas para la adquisición de datos y cálculo de la velocidad, par y potencia.

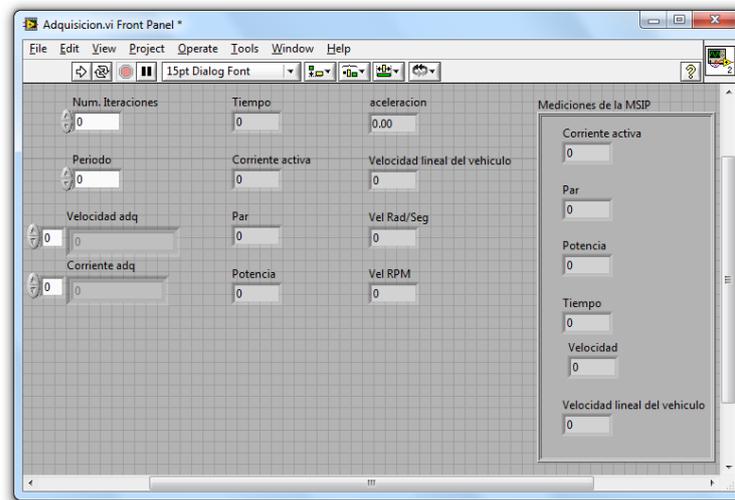


Figura 4. 61 Panel frontal del subVI Adquisicion.vi.

En la figura 4.62 se muestra el diagrama de bloques, el cual está constituido por una estructura de secuencias, en esta figura se analiza la secuencia cero, que es utilizada para adquisición de datos y para almacenar estos datos en las variables locales velocidad adq y corriente adq. La variable de velocidad antes de ser almacenada es deriva debido a que el bloque DAQ Assistant2 procesa la señal del encoder calculando la posición y para obtener la velocidad es necesario derivar la posición para después de esto almacenarla en la variable local.

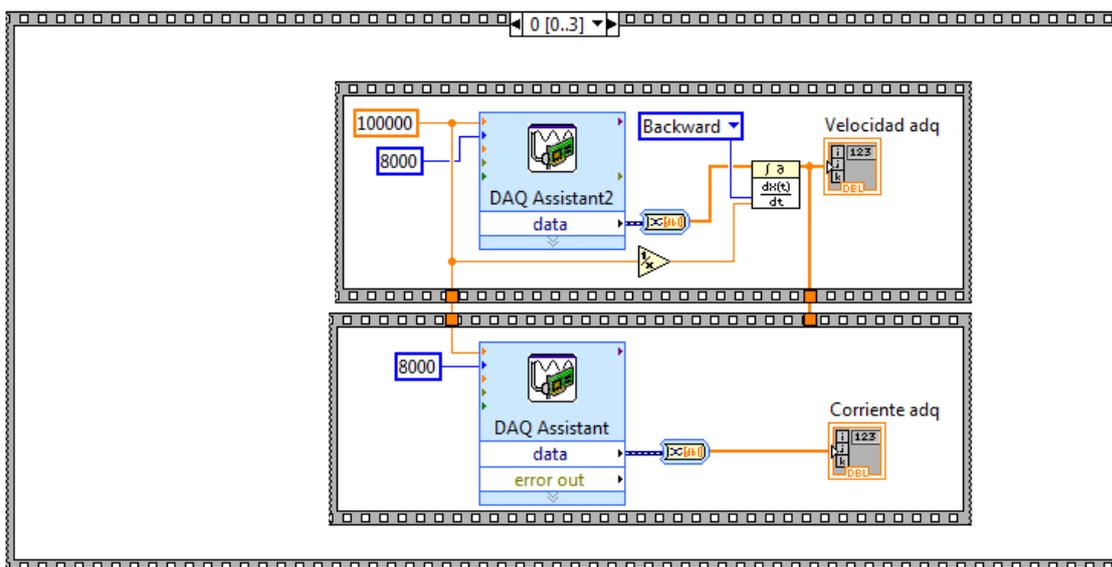


Figura 4. 62 Secuencia cero del diagrama de bloques del subVI Adquisicion.vi.

En la figura 4.63 se observa la secuencia uno de la estructura de secuencia principal del subVI Adquisicion.vi, esta secuencia es utilizada para calcular diferentes parámetros como velocidad lineal del vehículo, aceleración, corriente activa, par, velocidad en r/min, calcular el promedio, tiempo, etc.

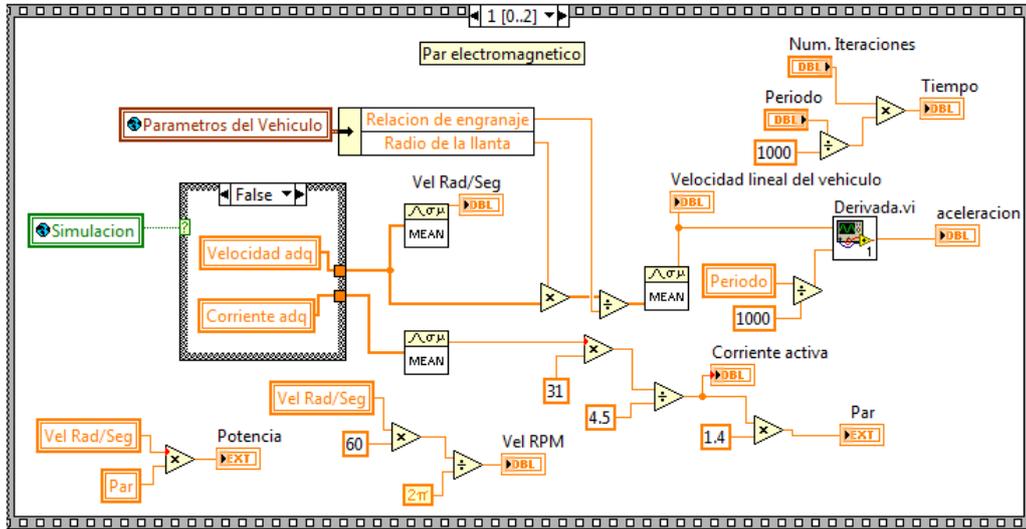


Figura 4. 63 Secuencia uno del diagrama de bloques del subVI Adquisición.

En la figura 4.64 se ilustra la secuencia dos del subVI Adquisición.vi, que se utiliza para transferir los valores de las variables locales calculadas, a una sola variable de tipo cluster llamada, mediciones de la MSIP, y también, es utilizada para construir los arreglos globales de las variables calculadas para que posteriormente se grafiquen con el subVI grafica datos.vi. En esta secuencia es donde finaliza el subVI Adquisición.vi.

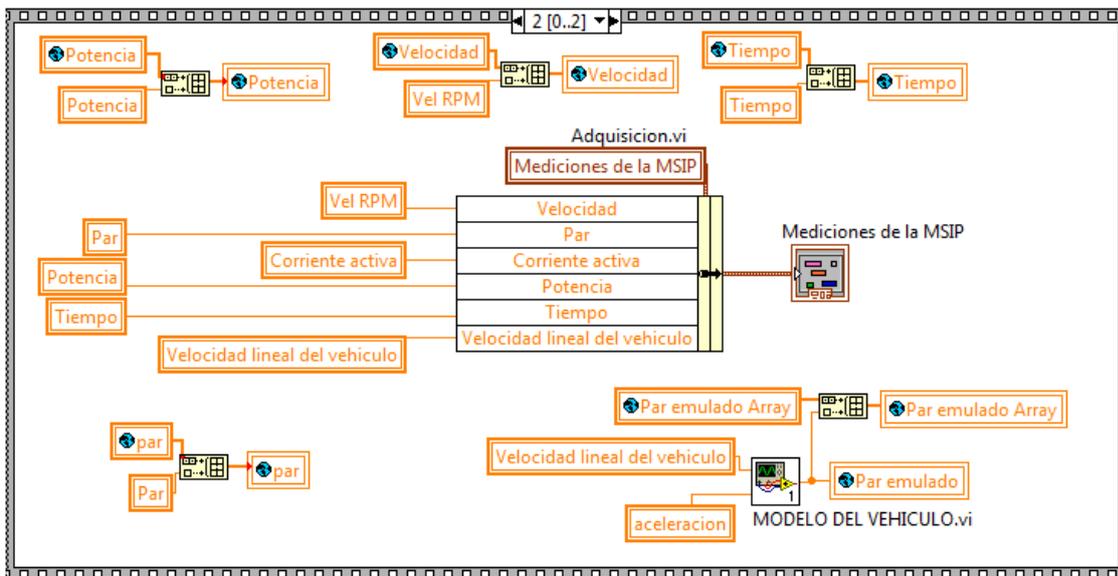


Figura 4. 64 Secuencia dos del diagrama de bloques del subVI Adquisición

Prácticamente el subVI adquisicion.vi es utilizado para adquisición, calculo y almacenamiento de variables.

4.13 Descripción del subVI Lee archivo binario.vi

En la figura 4.65 se ilustra el panel frontal del subVI lee archivo binario.vi, este subVI es utilizado en el subVI modo vehículo.vi para leer los parámetros de configuración del vehículo y cargarlo en la variable local del subVI modo vehiculo.vi y con esto emular el comportamiento del vehículo.

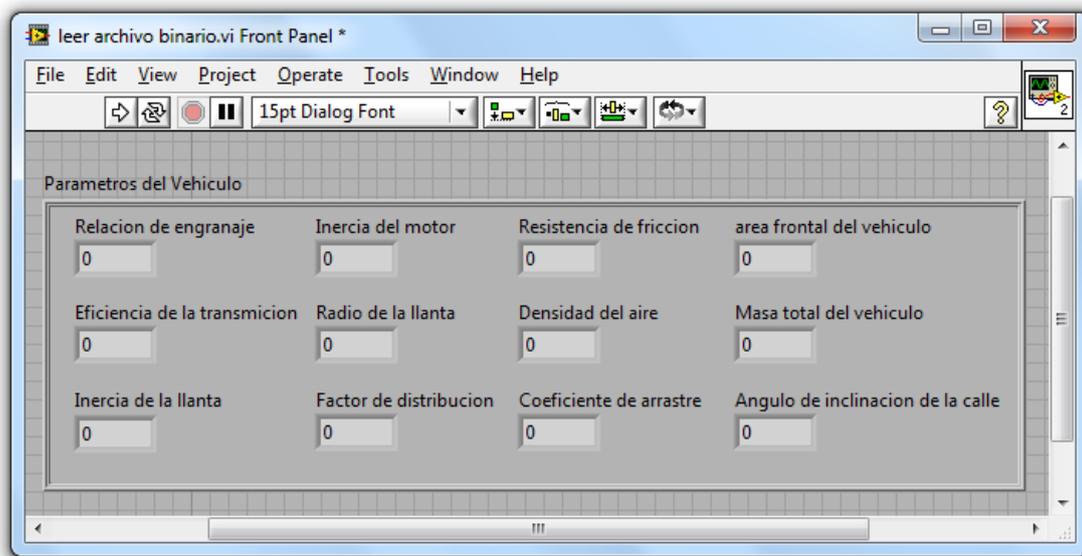


Figura 4. 65 Panel frontal del subVI Lee archivo binario.vi.

En la figura 4.66 se ilustra el diagrama de bloques del subVI Leer archivo.

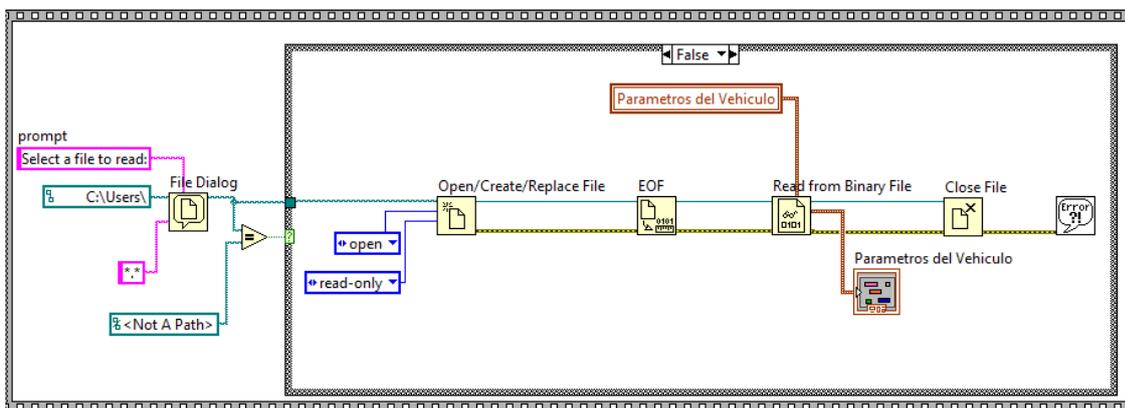


Figura 4. 66 Diagrama de bloques del subVI Leer archivo binario.vi.

La ejecución del subVI leer archivo binario se basa principalmente en mandar un cuadro de dialogo al usuario pidiendo que seleccione el archivo binario que se utilizara para configurar el vehículo. En el caso de que el usuario cancele esta acción se cargará automáticamente una configuración predeterminada por el programador, esto se muestra en la figura 4.67 en donde se le asignan valores a la variable parámetros del vehículo.

En la figura 4.67 se ilustran los valores de las constantes que configuran el comportamiento del vehículo.

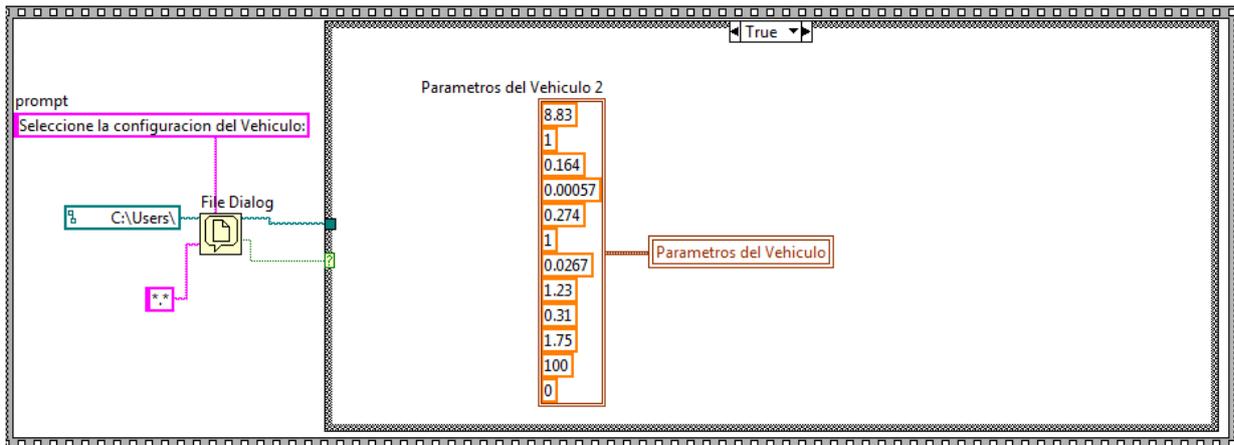


Figura 4. 67 Caso verdadero (Configuración cancelada).

4.14 Descripción del subVI Límite de los parámetros_0.vi

En la figura 4.68 se ilustra el panel frontal del subVI límite de los parámetros_0.vi en cual se pueden observar únicamente dos variables que son utilizadas para configurar la función de comportamiento constante, este subVI utiliza un bloque prompt user for input, para preguntarle al usuario el valor de la constante, y cuanto tiempo durará el segmento que el usuario está configurando. Este subVI es utilizado en el subVI programar ciclo.vi, cuando el usuario selecciona un comportamiento constante para el segmento que está configurando, los valores que el usuario asigna en la configuración deben de estar dentro del rango establecido por el programador, que es del 100% como máximo y -100% como mínimo para el valor de la constante. En el caso de la duración del segmento existe la restricción de ser mayor que cero, en caso de que el usuario introduzca valores fuera de los rangos establecidos, aparecerá un cuadro de dialogo indicando al usuario que los datos que capturó se encuentran fuera de rango, y volverá a pedirle que introduzca nuevamente los valores de configuración del segmento. Cuando estos valores son correctos, se transfieren a las variables locales y para salir del subVI .

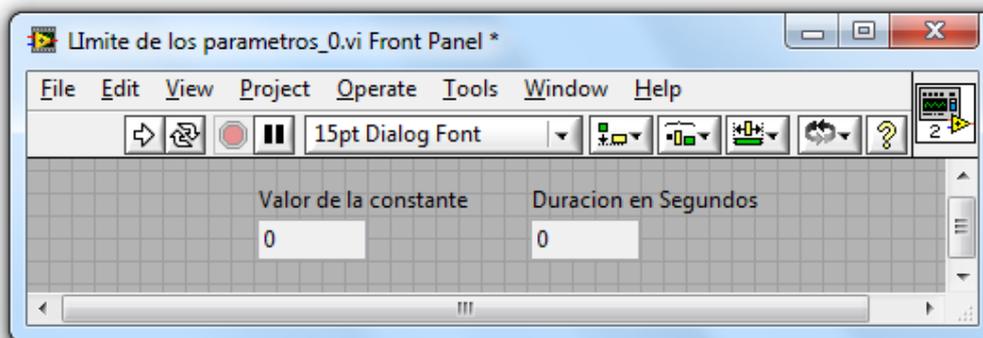


Figura 4. 68 Panel frontal del subVI Límite de los parámetros_0.vi.

En la figura 4.69 se ilustra el diagrama de bloques del subVI límite de los parámetros_0.vi.

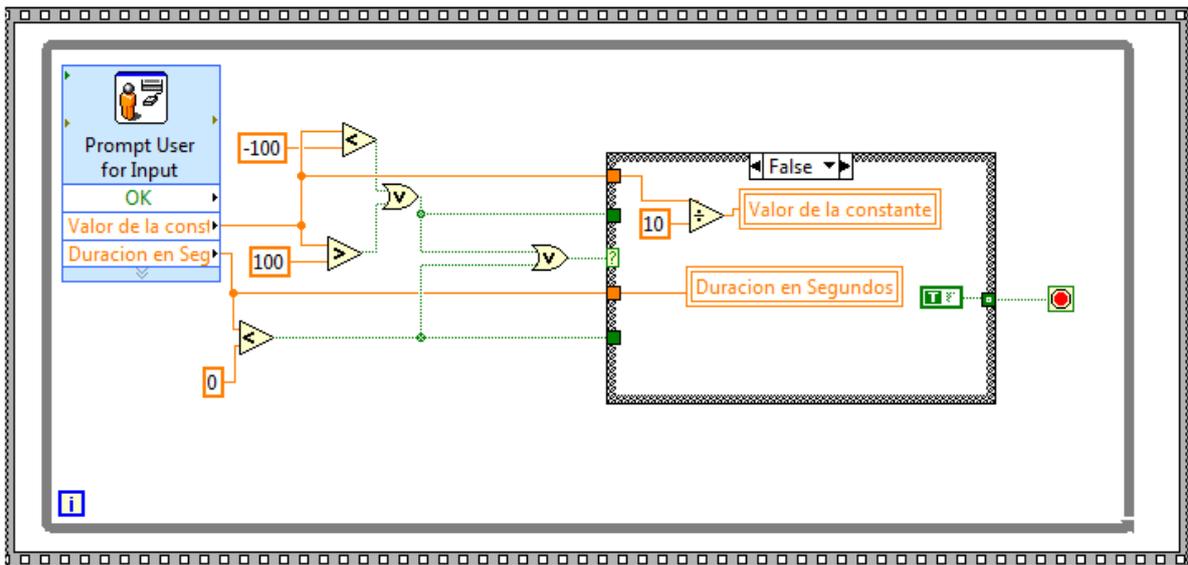


Figura 4. 69 Diagrama de bloques del subVI limite de los parámetros_0.vi.

En la figura 4.69 se muestra cuando se hace la transferencia de valores a las variables locales cuando los valores capturados cumplen con el rango establecido.

En la figura 4.70 se puede observar que los cuadros de dialogo son enviados al usuario por medio de bloque display message user, cuando los valores capturados se encuentran fuera de rango, mientras los valores capturados no se encuentren dentro del rango se continuará pidiendo una correcta configuración del segmento. Una vez configurados correctamente los parámetros finaliza el subVI y de esta manera se transfieren los valores configurados a las variables locales y por medio de estas, los valores salen del subVI limite de los parámetros_0.vi para ser utilizados dentro del subVI configurar ciclo.vi.

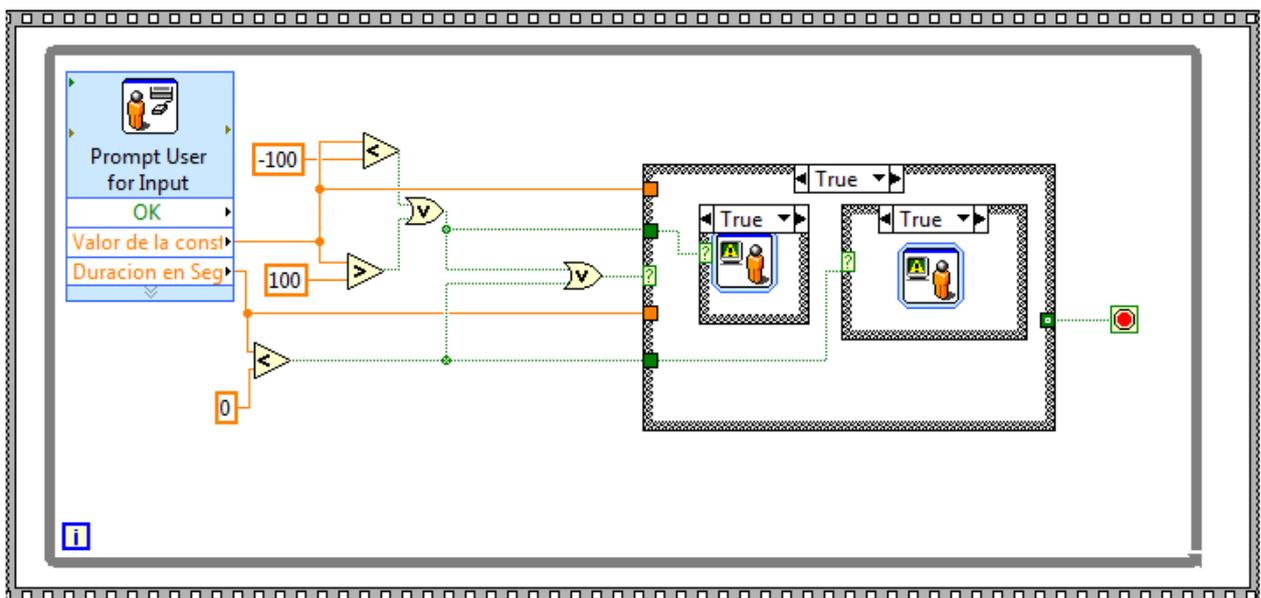


Figura 4. 70 Diagrama de bloques del subVI limites de los parametros_0.vi

4.15 Descripción del subVI Límite de los paramatros_1.vi

Este subVI tiene la misma función que el subVI Limite de los parámetros_0.vi la única diferencia es que dentro de este subVI se capturan tres datos y no dos como en el subVI anterior como se observa en la figura 4.71.

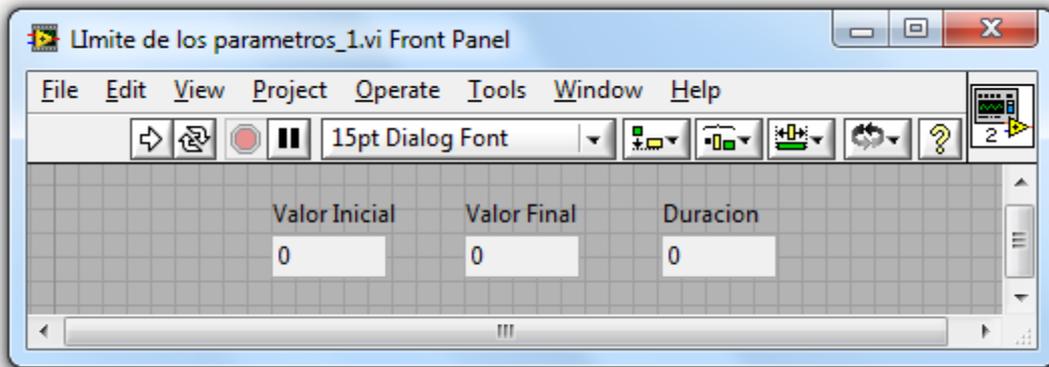


Figura 4. 71 Panel frontal del subVI Límite de los parametros_1.vi.

En la figura 4.72 se ilustra el diagrama de bloques del subVI Límite de los parámetros_1.vi. En este subVI se comparan los tres valores capturados por el usuario para comprobar si se encuentran dentro del rango establecido por el programador, en caso de cumplir con los rangos establecidos, se transfieren los valores capturados a las variables locales y de esta manera concluye este subVI.

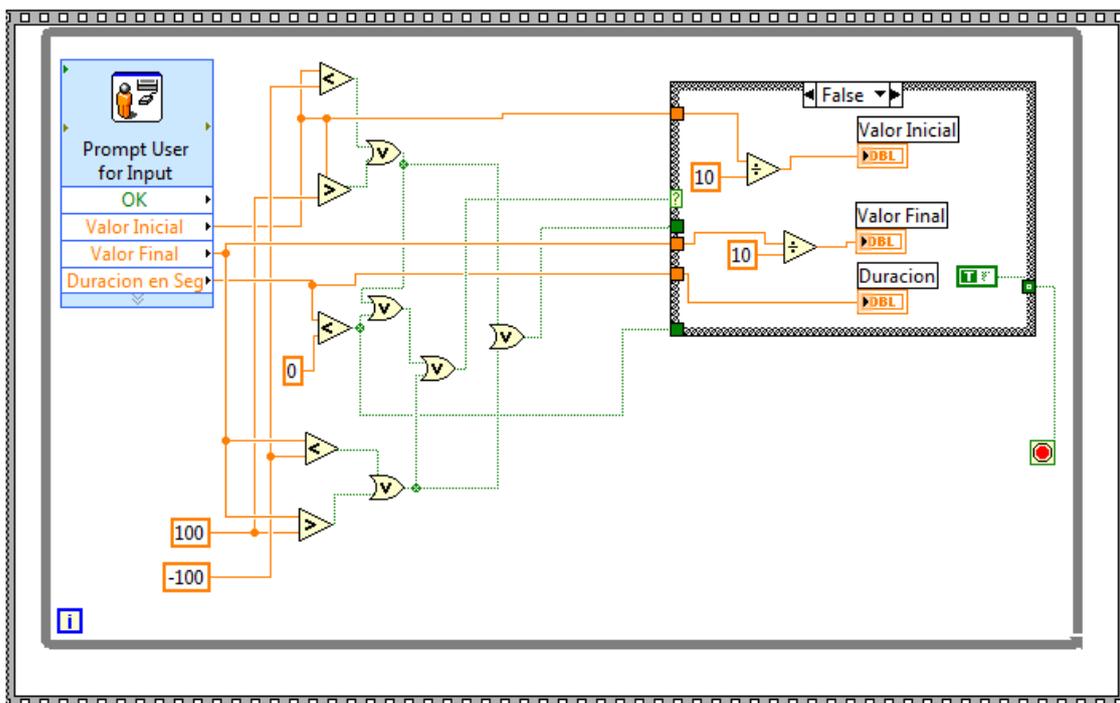


Figura 4. 72 Diagrama de bloques del subVI Límite de los parametros_1.vi.

4.16 Descripción del subVI Modelo del vehiculo.vi

En la figura 4.73 se muestra el panel frontal del subVI Modelo del vehiculo.vi. Este subVI utiliza dos variables que son ingresadas a través de las variables locales llamadas velocidad y aceleración las cuales son calculadas en el SubVI Adquisición.

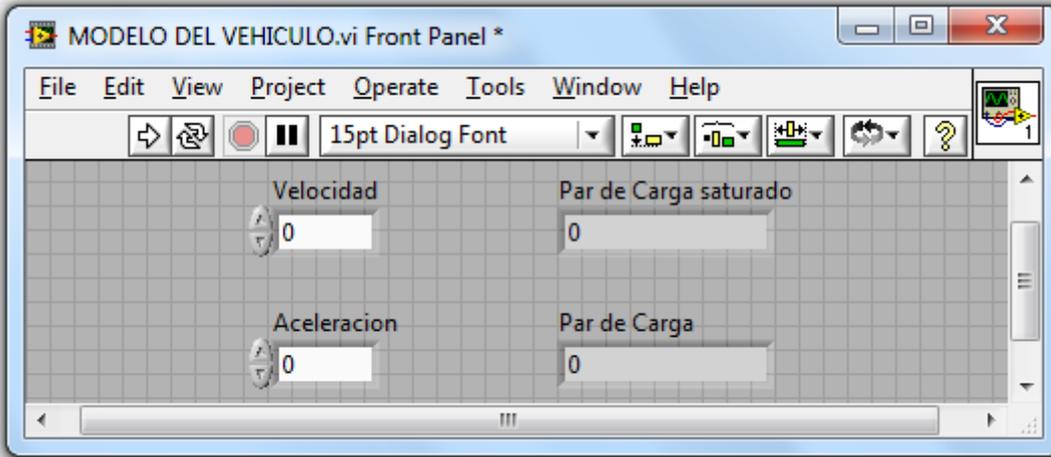


Figura 4. 73 Panel frontal del SubVI modelo del vehiculo.vi.

En la figura 4.74 se ilustra el diagrama de bloques del subVI modelo del vehiculo.vi, en el cual se encuentra la ecuación que modela el comportamiento del vehículo, la cual está en función de la velocidad y aceleración del vehículo, las otras variables son adquiridas a través de una variable global, que es seleccionada como un archivo binario por el usuario. Cuando inicia la ejecución del subVI modo vehiculo.vi, una vez que se elige el archivo, es descargado a la variable global por medio del subVI lee archivo binario.vi.

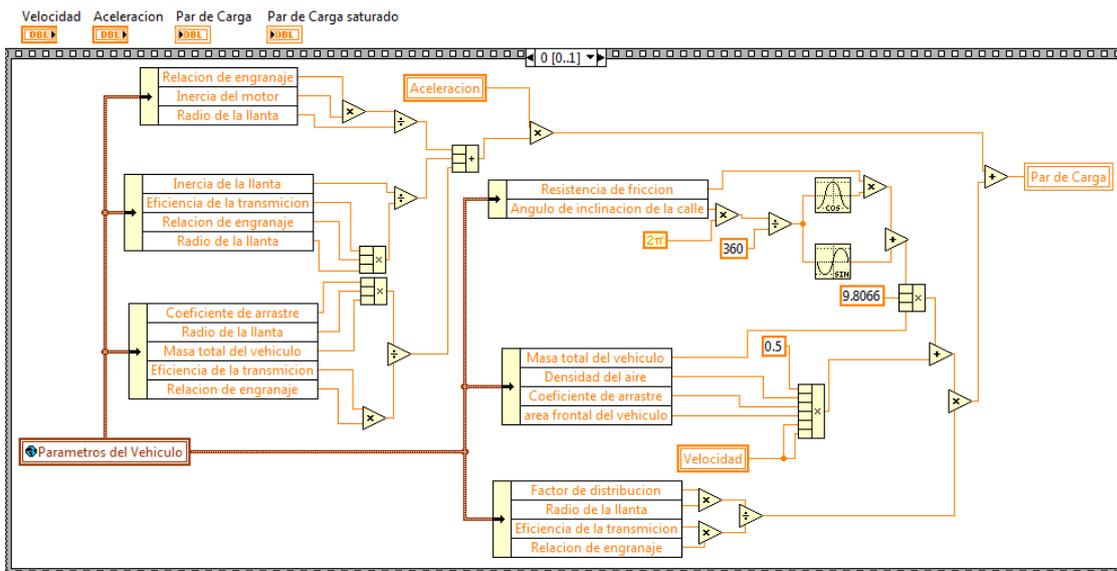


Figura 4. 74 Secuencia cero del diagrama de bloques del subVI modelo del vehiculo.vi.

Una vez que se hace el cálculo del par que debe generar el electrodinamómetro, se debe limitar dicho par al nominal de la máquina de tal manera que el par máximo de referencia no sobrepase el par nominal de la máquina, como se muestra en la figura 4.75, y en esta secuencia es donde finaliza este subVI.

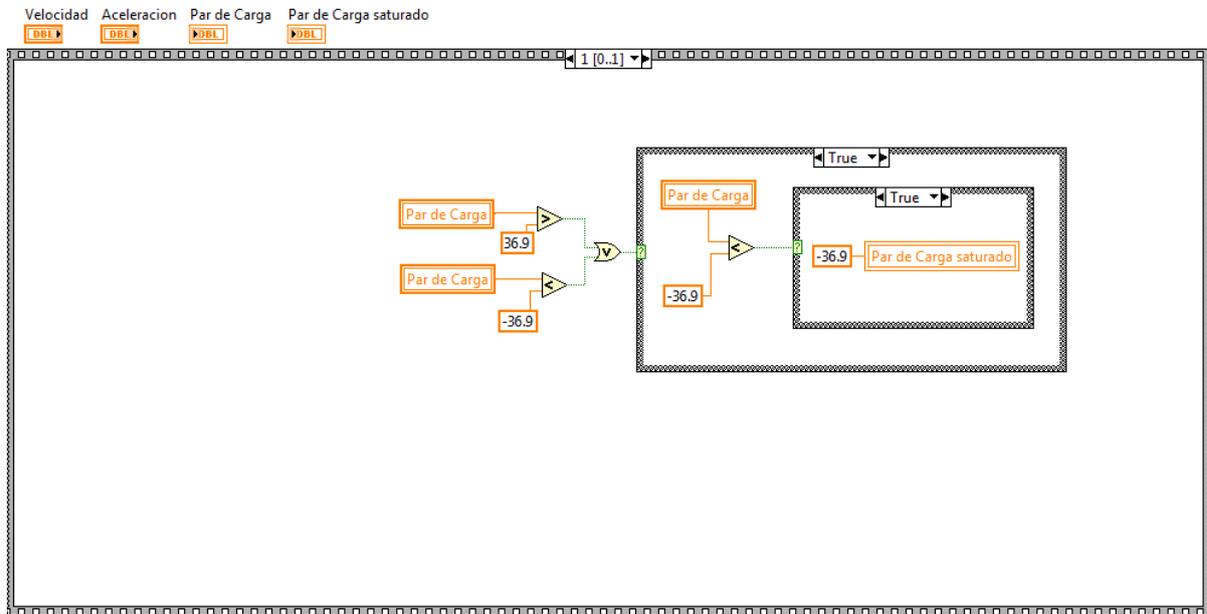


Figura 4. 75 Secuencia uno del diagrama de bloques del subVI modelo del vehículo.

4.17 Descripción del subVI programar ciclo.vi

Este subVI es utilizado para configurar o programar los ciclos de trabajo del electrodinamómetro, a través de este subVI el usuario diseña el comportamiento de la señal de referencia que se mandará al accionamiento electrónico para modificar el par o la velocidad del electrodinamómetro según sea la configuración del modo en que este trabajando el electrodinamómetro. En la figura 4.76 se muestra el panel frontal de este subVI.

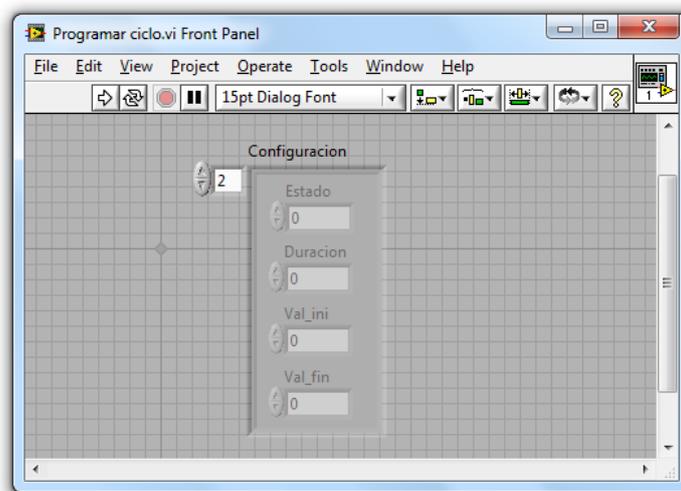


Figura 4. 76 Panel frontal del subVI programar ciclo.vi

En la figura 4.77 se muestra el diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.

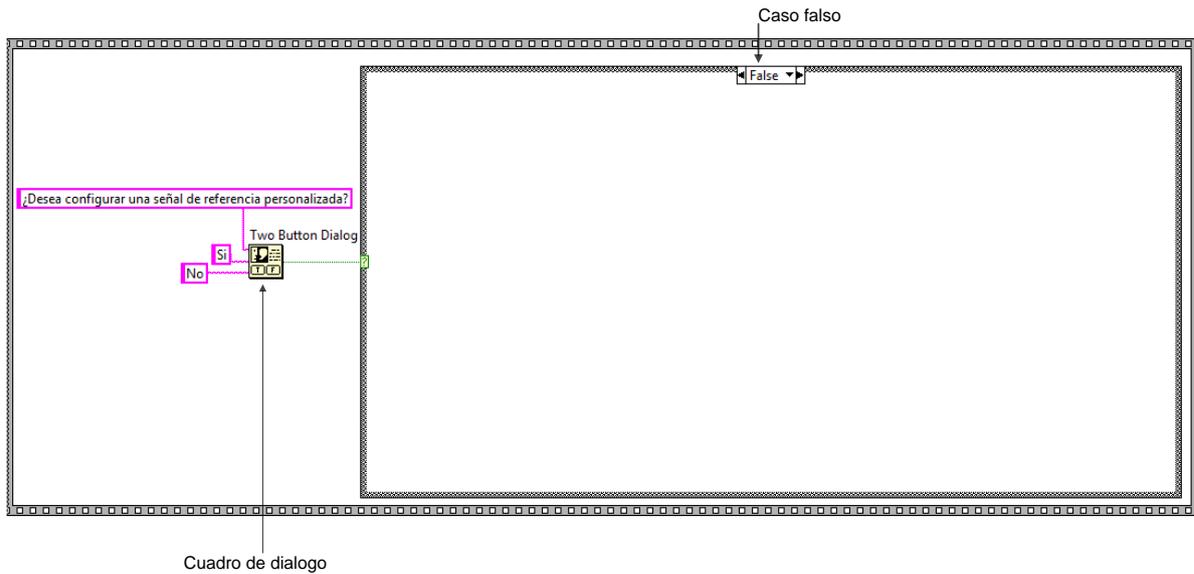


Figura 4. 77 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.

En la figura 4.77 se muestra que al iniciar el subVI aparecerá un cuadro de dialogo al usuario preguntando si efectivamente desea configurar una señal de referencia en caso de ser negativa la respuesta del usuario no se ejecuta ninguna instrucción como se ilustra dentro del caso falso de la estructura de casos y entonces se finaliza el subVI. Sin embargo en la figura 4.78 se ilustra la ejecución que se realiza cuando el usuario desea configurara la señal de referencia.

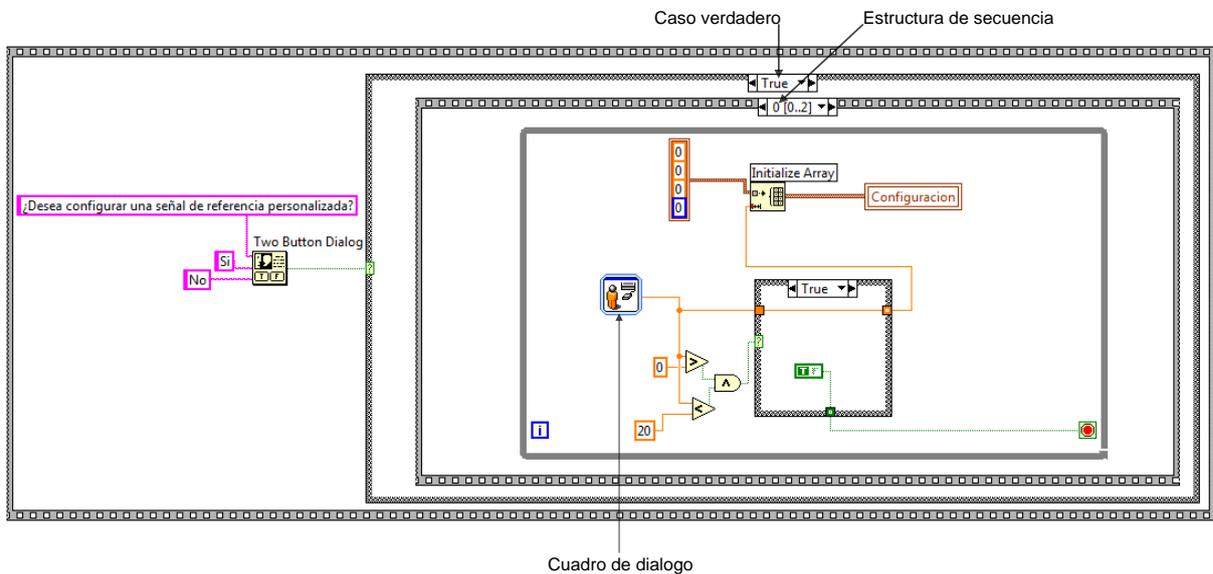


Figura 4. 78 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi

En la figura 4.78 se ilustra, el código que se ejecuta cuando el usuario desea configurar un ciclo, iniciando por un cuadro de dialogo que le pregunta al usuario la cantidad de segmentos que forman al ciclo. Si la cantidad de segmentos está dentro del rango establecido por el programador se procede a inicializar el arreglo tomando como dimensión del ciclo la cantidad de segmentos que el usuario capturó. En caso de que la cantidad de segmentos esté fuera de rango

aparecerá un cuadro de dialogo pidiéndole al usuario que capture un valor dentro de los rangos requeridos por el programador, cuando la cantidad de segmentos es definida correctamente, se pasa a la secuencia uno donde se le cuestiona al usuario que tipo de comportamiento seleccionará. Para el segmento que se está configurando este puede ser: constante, cuadrática o lineal.

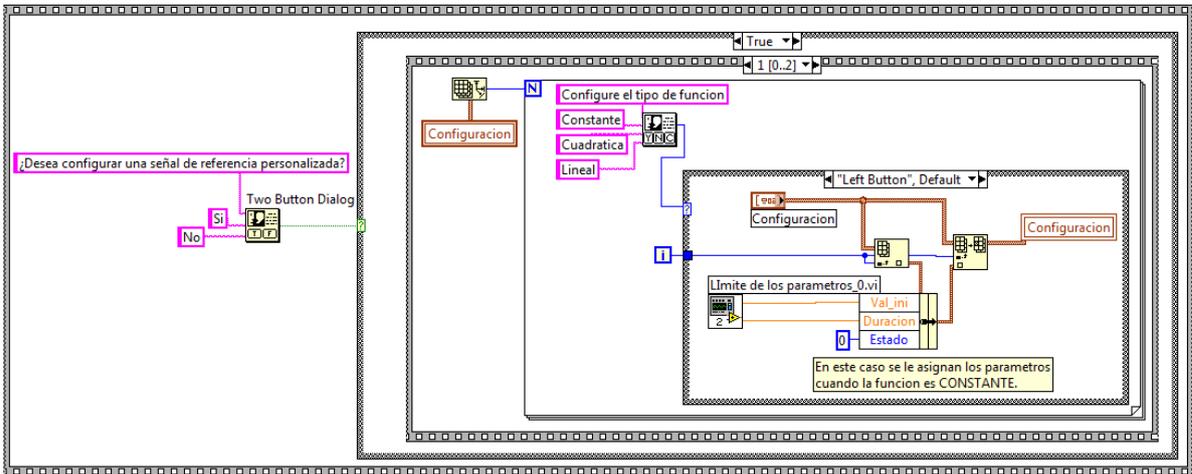


Figura 4. 79 Diagrama de bloques del subVI cargar ciclo.vi.

Cuando se han configurado todos los segmentos correctamente, se pasa a la secuencia número dos la cual se puede observar en la figura 4.80, en esta secuencia se guarda en forma de archivo la configuración que el usuario selecciono, para que posteriormente pueda ser elegida como una señal referencia. Cuando inicia esta secuencia al usuario, le aparece un cuadro de dialogo, pidiendo el nombre que llevara el archivo, siendo el usuario el que decida donde se guarda el archivo y con qué nombre. El bloque file dialog es el encargado de enviar al usuario el cuadro de dialogo, después de que el usuario elija el nombre y su destino se crea el archivo con el bloque new file, para posteriormente escribir el archivo esto con el bloque write file, y por último se procede a cerrar el archivo con el bloque close file y de esta forma es como concluye este subVI programar ciclo.vi.

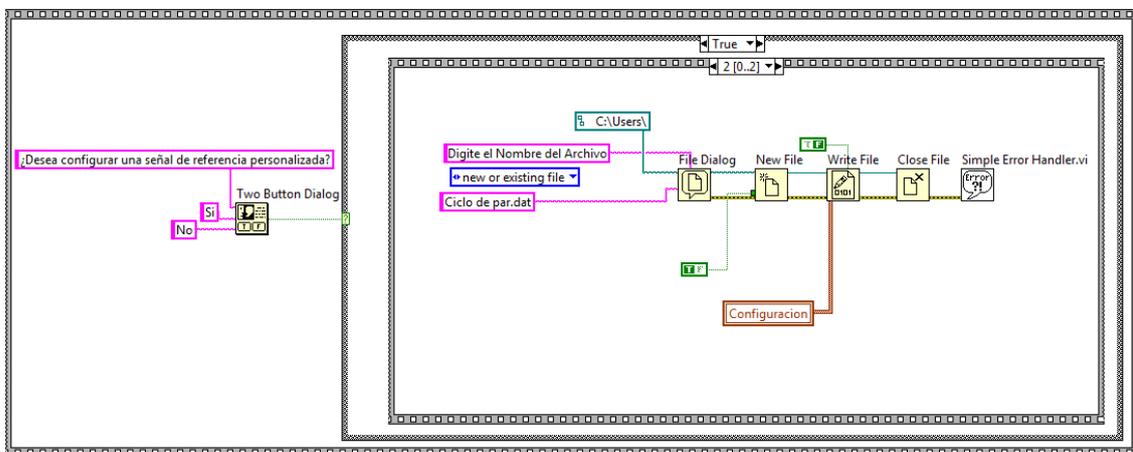


Figura 4. 80 Diagrama de bloques del subVI programar ciclo.vi.

4.18 Variables globales

En la ejecución del programa principal.vi se utilizan diferentes subVI y también variables globales, esto con la finalidad de poder intercambiar información entre los subVI's. En la figura 4.81 se ilustran las variables globales utilizadas en esta aplicación.

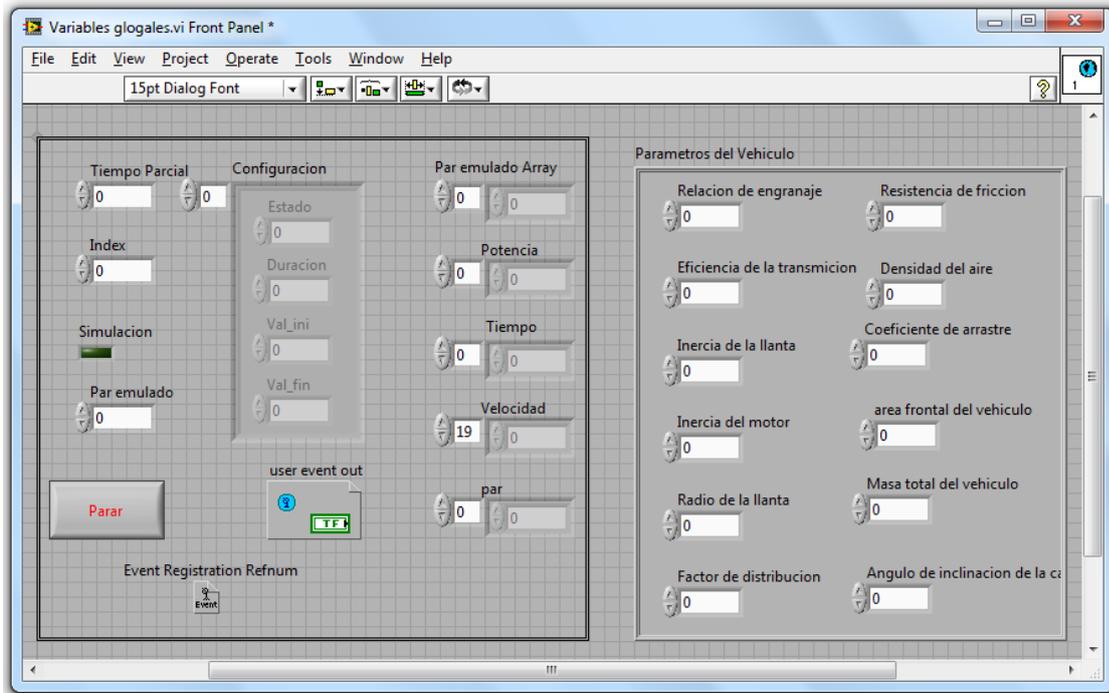


Figura 4. 81 Variables globales utilizadas en la ejecución del VI programa principal.vi.

Son un total de veinticinco variables globales dentro de las cuales se pueden encontrar de tipo arreglo, cluster, booleana, etc.

Estas variables pueden ser manipuladas por un subVI mientras otro les asigna un nuevo valor es por eso la necesidad de utilizarlas ya que por medio de ellas se realiza la transferencia de datos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN

5.1 Introducción

En este capítulo se abordan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, y de simulación. Básicamente son dos pruebas las que se estudian en este capítulo, la primera prueba es cuando el electrodinamómetro se encuentra configurado en el modo automático del electrodinamómetro, en la segunda prueba el electrodinamómetro se configura en modo de vehículo. En cada una de estas pruebas a la máquina motriz se le da una señal de referencia de velocidad, y el electrodinamómetro debe producir un par de carga, la cual depende del tipo de carga que se le configure, estas cargas son modeladas por diferentes ecuaciones por lo tanto se espera obtener diferentes comportamientos en el par de carga que genera el electrodinamómetro.

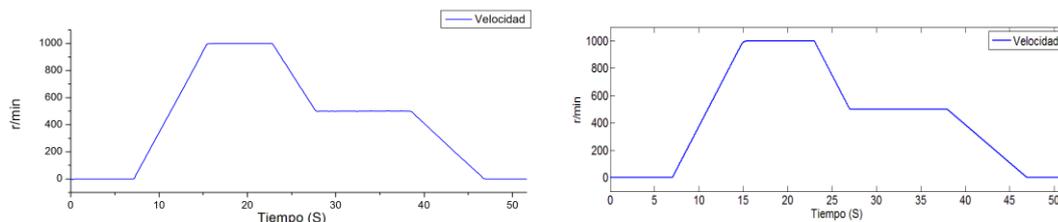
Los resultados experimentales se obtuvieron por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211 con una velocidad de muestreo de 80 kHz pero el tiempo de cómputo para calcular el par de referencia es de 5 Hz, esto se debe por las limitaciones del hardware que se utilizó en la implementación sin embargo el paso de integración empleado en la simulación es de 10 kHz varias veces más rápido que la implementación.

5.2 Comparación de resultados experimentales y simulación en modo automático

Los resultados obtenidos en la simulación son validados a través de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del electrodinamómetro, la prueba que se abordará a continuación es la de carga tipo ventilación, la cual está definida por la ecuación (5.1), esta ecuación está en función de la velocidad angular de la máquina ω_m , en esta ecuación aparecen dos constantes, ($k_1 = .00302$, $k_2 = 3.69$) estos valores fueron propuestos de tal manera de, que cuando la velocidad angular de la máquina alcanza las 1000 r/min, el par de carga del electrodinamómetro será igual al par nominal de la máquina.

$$T_e = k_1 \cdot \omega_m^2 + k_2 \quad (5.1)$$

En la figura 5.1 se muestran las gráficas de la velocidad en la simulación e implementación.



A) Comportamineto de la velocidad de la MSIP en la implementación. B) Comportamineto de la velocidad de la MSIP en la simulacion.

Figura 5. 1 Velocidad de la máquina motriz en la implementación.

Para lograr un comportamiento similar en la máquina motriz en simulación e implementación, se asignó una señal de referencia de velocidad en la implementación igual a la señal de referencia de velocidad de la máquina motriz que se utilizó en la simulación, de esta manera se pudo obtener un resultado aceptable, si se comparan las dos señales de velocidad.

Una vez mostrados los resultados obtenidos, del comportamiento de la velocidad, se continúa con el análisis del par de la máquina motriz T_{em} , del par del electrodinamómetro $T_{e_{el}}$, y el par de referencia del electrodinamómetro $T_{e_{el}}^*$, los cuales pueden observarse en la figura 5.2 y 5.3.

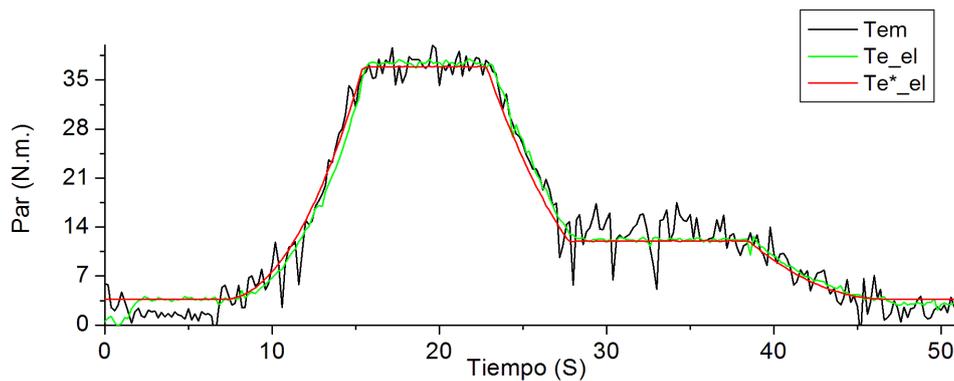


Figura 5. 2 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultados experimentales).

En la figura 5.2 se muestra el comportamiento de los pares electromagnéticos que se obtuvieron en la implementación, en esta gráfica se puede observar que, el par de la máquina motriz T_{em} experimenta fluctuaciones, esto se atribuye a que la señal es adquirida de un DSP el cual se encarga de hacer el control de la máquina motriz por lo que esta variable no es calculada en la plataforma de pruebas, solo se adquiere para visualizar esta variable. Sin embargo si se compara el comportamiento de las señales de referencia de par del electrodinamómetro $T_{e_{el}}^*$, y la señal de par del electrodinamómetro $T_{e_{el}}$ de las figuras 5.2 y 5.3, se puede observar que el comportamiento es similar sin embargo las pequeñas diferencias entre el par $T_{e_{el}}^*$ y $T_{e_{el}}$ que aparecen en la figura 5.2 tienen un error aproximado de $\pm 0.82\%$ y se debe al tiempo de muestreo que es de 200 ms , sin embargo se puede considerar que en tiempo y magnitud son similares, lo que significa que los resultados obtenidos en la implementación fueron los esperados.

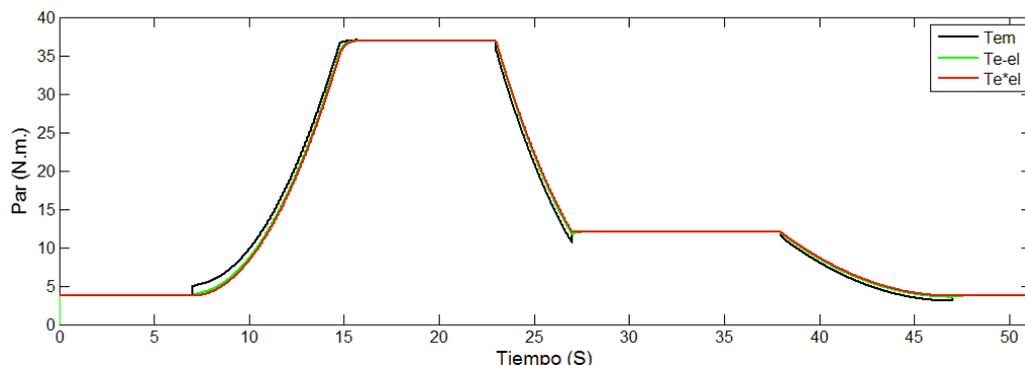


Figura 5. 3 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultado de simulación).

Un parámetro muy importante que debe ser mencionado es la potencia del electrodinamómetro, ya que hay que considerar que este sistema es capaz de regresar la potencia que genera el electrodinamómetro a las líneas de alimentación de C.A. cuando la MSIP se encuentra trabajando como generador. En las figuras 5.4 y 5.5 se muestra la potencia del electrodinamómetro en la simulación e implementación.

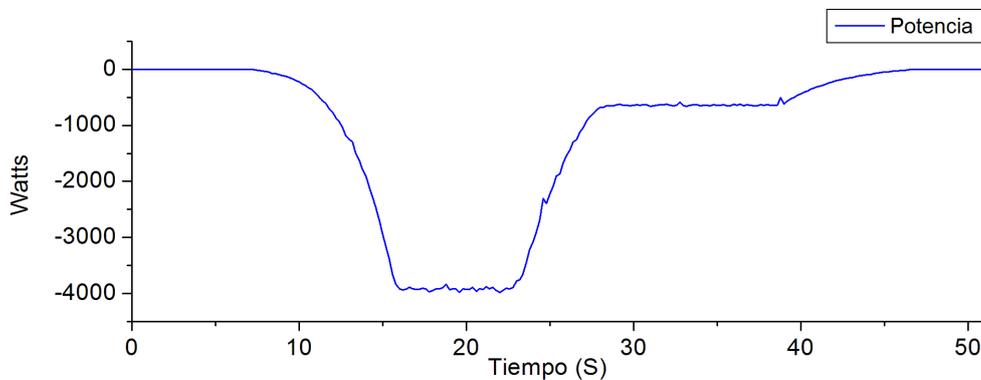


Figura 5.4 Potencia en la flecha de la máquina de carga (Resultado experimental).

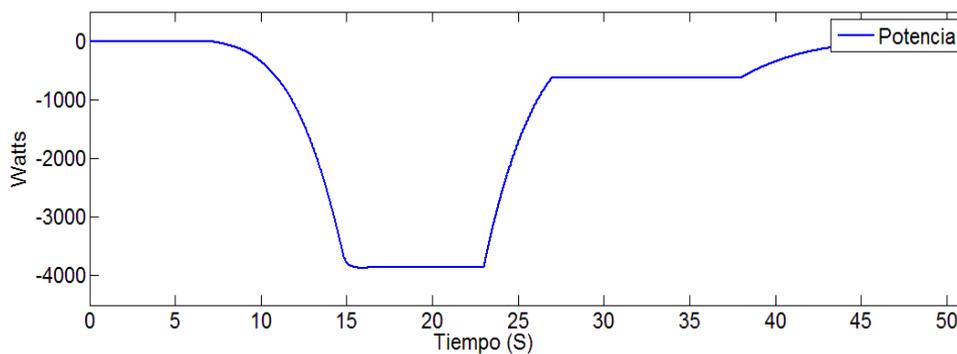


Figura 5.5 Potencia en la flecha de la máquina de carga (Resultado de simulación).

Para iniciar el análisis de la potencia en la máquina de carga se citara la ecuación que la describe [3].

$$P = T_{em} * \omega_m \quad (5.2)$$

La velocidad de la máquina de carga es igual a la máquina motriz pero con signo negativo esto se debe a que las máquinas se encuentran acopladas una frente a otra por lo tanto la velocidad de la máquina de carga es igual a la gráfica 5.1 pero con signo negativo y el par de la máquina de carga que se muestra en las figuras 5.2 y 5.3 es positivo por lo tanto al utilizar la ecuación 5.2 y multiplicar el par por la velocidad angular se obtiene que la potencia del electrodinamómetro es negativa de tal manera que a través del sistema regen que se muestra en la figura 3.3 la potencia que aparece en la figura 5.4 se está regresando al suministro de energía eléctrica, haciendo de esta plataforma de pruebas más eficiente.

Para comprobar que los algoritmos de escalamiento utilizados para calcular la potencia del electrodinamómetro son correctos, se realizó una medición con un analizador trifásico de la calidad de la energía marca AEMC modelo 3945-B, el cual obtuvo una medición de 129 watts de potencia, esta medición se puede observar en la figura 5.6 y se comparó con la medición que se hace por medio del software de control del electrodinamómetro en la que se obtuvo una medición de potencia de 128.061 watts, esta medición se puede observar en la figura 5.7.



Figura 5. 6 Mediciones de potencias en las terminales del electrodinamómetro con un AEMC instruments 3945-B.

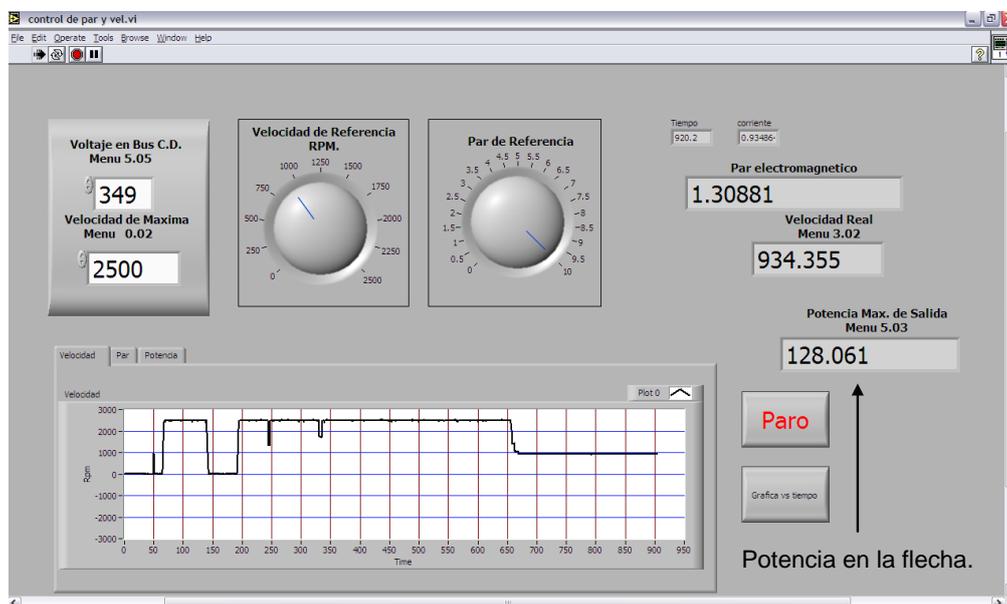


Figura 5. 7 Medición de potencia activa en la flecha del electrodinamómetro.

En la medición que se hace en la figura 5.6 y 5.7, existe una diferencia pero, hay que tomar en cuenta que, en la medición de la figura 5.7, no se consideran las pérdidas en el estator, porque es la potencia en la flecha, a diferencia de la medición que aparece en la figura 5.6 que mide la potencia que consume el electrodinamómetro también cabe mencionar que la máquina se encuentra en vacío en el momento de la medición, por lo tanto se puede considerar que la medición que se muestra en la figura 5.7 es correcta si se toma en consideración lo anterior.

5.3 Comparación de resultados experimentales y simulación en modo vehículo

Uno de los modos de trabajo del electrodinamómetro es en el cual el sistema emula una carga de un vehículo, para poder emular este tipo de carga se utiliza la ecuación (2.29) descrita anteriormente en el capítulo dos, esta ecuación necesita la velocidad del vehículo en m/s y es calculada con la ecuación 2.28, después de obtener la velocidad del vehículo en m/s se hace la conversión a Km/h para que posteriormente el usuario visualice la velocidad en Km/h por medio del panel frontal que se muestra en la figura 4.37.

Después de haber realizado una prueba experimental en la cual el sistema es configurado en el modo vehículo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 5.8 y este resultado se puede comparar con los resultados de simulación que se ilustran en la figura 5.9.

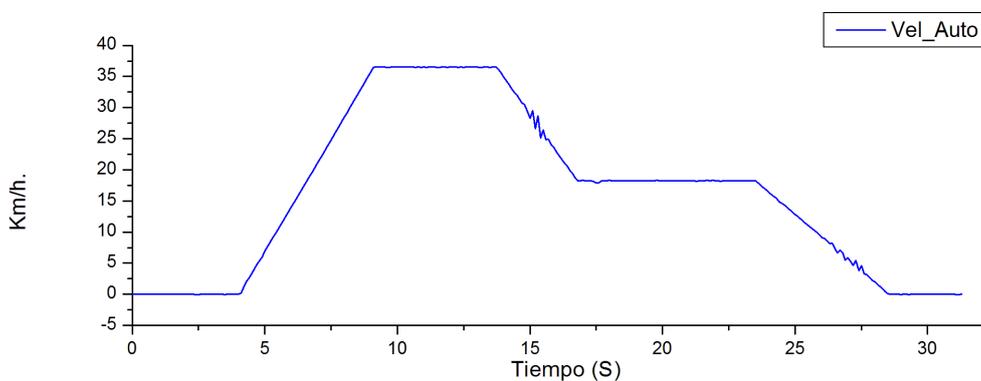


Figura 5. 8 Velocidad del vehículo en Km/h (Resultado experimental).

En la figura 5.8 se observan unas perturbaciones en la velocidad del vehículo, esto se debe a la respuesta del control de la máquina motriz, que es de esta manera responde al cambio de carga en la flecha, sin embargo el control de la máquina corrige las perturbaciones para seguir fielmente la señal de referencia lo que significa que el control tiene una respuesta satisfactoria.

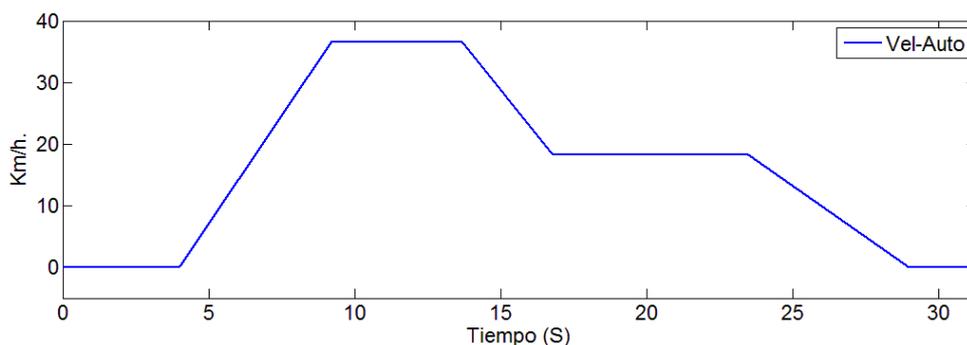


Figura 5. 9 Velocidad del vehículo en Km/h (Resultados de simulación).

Los resultados de las pruebas experimentales coinciden con los resultados que se habían obtenido previamente a través de la simulación, también es necesario mencionar que la señal de referencia de velocidad de la simulación es igual a la utilizada en la implementación, esto es con la finalidad de poder realizar la comparación.

La ecuación 2.29 calcula el par de referencia del electrodinamómetro $T_{e_el}^*$, esta referencia de par depende de la velocidad y aceleración del vehículo, por lo tanto el par de carga que se ilustra en la figura 5.10 está en función de la velocidad que se muestra en la figura 5.8 y también de la aceleración del vehículo. En la figura 5.10 y 5.11 se observa el par de la maquina motriz T_{em} , el par del electrodinamómetro T_{e_el} y el par de referencia del electrodinamómetro $T_{e_el}^*$.

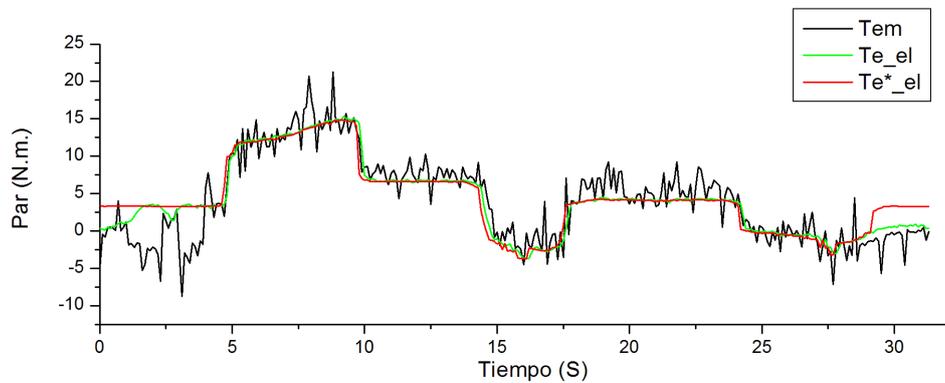


Figura 5. 10 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultados experimentales).

En la figura 5.10 se muestran tres pares T_{em} , T_{e_el} y $T_{e_el}^*$, en estas señales se puede observar que nuevamente el par de la máquina motriz T_{em} presenta muchas fluctuaciones, sin embargo el par del electrodinamómetro T_{e_el} y el par de referencia del electrodinamómetro $T_{e_el}^*$ se comportan de una manera similar al resultado obtenido en la simulación, y las pequeñas perturbaciones que aparecen en estas señales tiene un error aproximado del $\pm 3.53\%$ en esta prueba se incrementa el porcentaje de error debido a que la prueba contiene más transitorios en el par de carga.

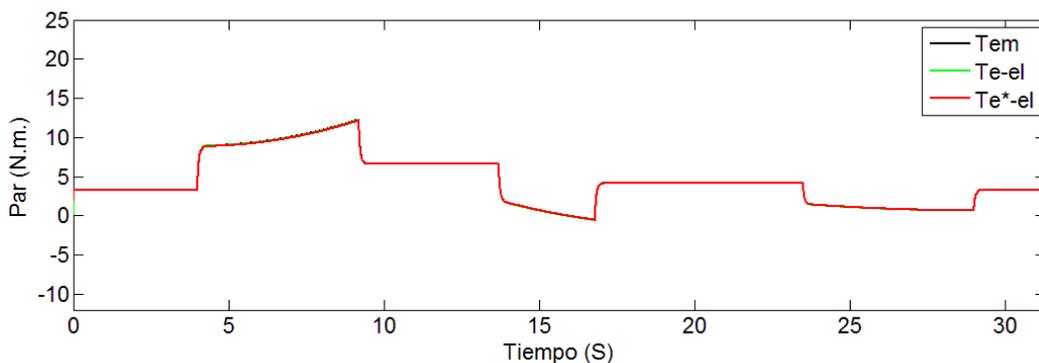


Figura 5. 11 Pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro (Resultado de simulación).

En la figura 5.11 se muestra el comportamiento de los pares del sistema máquina motriz-electrodinamómetro, estos pares se encuentran dentro de los límites físicos de la máquina utilizada en la implementación, ya que el par nominal de la máquina síncrona de imanes permanentes es de ± 36.9 Nm. Se puede comprobar en figura 5.11 que el par máximo de carga es menor al límite de la máquina. Esto se debe a que la configuración de los parámetros del vehículo fueron seleccionados de tal manera de que cumplan con este requisito.

En algunos momentos en esta prueba el electrodinamómetro deja de trabajar como generador para trabajar como motor siendo en ese instante en el cual la máquina motriz se comporta como generador, por lo tanto la potencia del electrodinamómetro deja de ser negativa para convertirse en positiva esto se puede observar en el resultado de la implementación que ilustra la figura 5.12. En el momento en el que se logra la regeneración es cuando la máquina comienza a desacelerar esto ocurre entre los segundos quince y dieciocho aproximadamente.

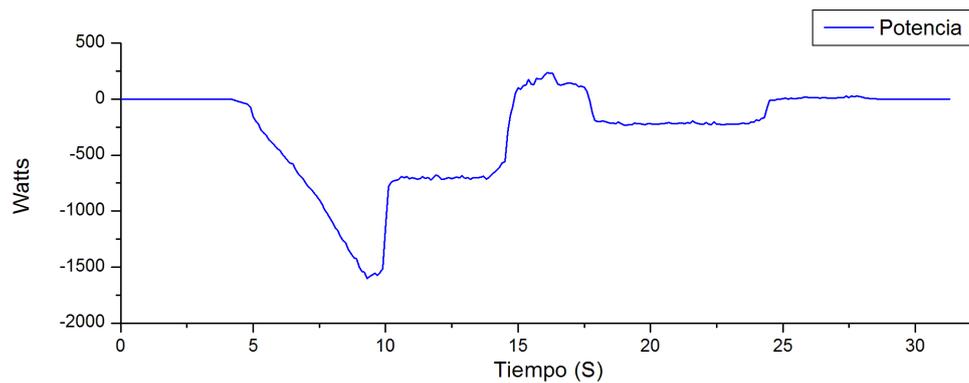


Figura 5. 12 Potencia en el electrodinamómetro (Resultado experimental).

En la figura 5.12 se puede observar que en el lapso de tiempo de catorce a dieciocho segundos aproximadamente, la potencia en el electrodinamómetro es positiva, sin embargo se trato de evitar que la potencia en el electrodinamómetro sea positiva debido a que esta energía se almacena en el bus de CD y no se cuenta con resistencia de frenado para disipar la energía en forma de calor.

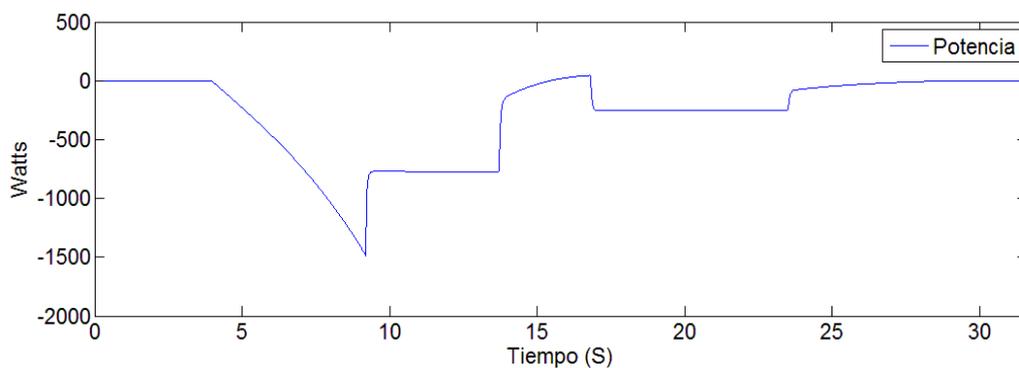


Figura 5. 13 Potencia en el electrodinamómetro (Resultado de simulación).

En la figura 5.13 se muestra el comportamiento de la potencia en la flecha del electrodinamómetro como resultado de la simulación, en la cual se puede observar como la máquina motriz en un instante empieza regenerar energía, esto provoca un aumento de voltaje en el bus, Las pequeñas diferencias que se pueden observar en el comportamiento de la potencia son atribuidas a la diferencia que existe en los pares de las figura 5.10 y 5.11, y esto es debido a que el control que utiliza el accionamiento Unidrive SP3201 no es exactamente igual al que se está simulando debido a que se desconoce el algoritmo exacto que este utiliza y también se debe al tiempo de computo del algoritmo al momento de ser implementado.

Para demostrar que efectivamente existe un instante en el cual la máquina motriz trabaja como generador se decidió medir el voltaje en el bus de CD lo cual dio como resultado la figura 5.14 en la cual se puede observar que el bus incrementa su voltaje a más de 340 volts.

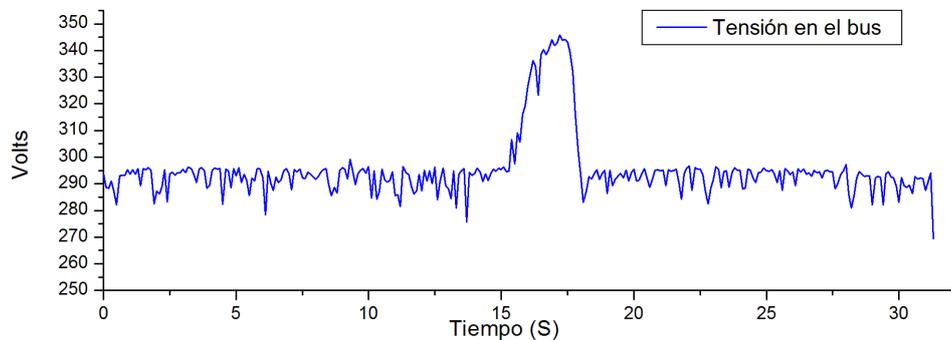


Figura 5. 14 Comportamiento del voltaje en el bus de CD (Resultado experimental).

En la figura 5.14 se puede observar que el bus de corriente directa tiene un voltaje de 290 volts con una variación del $\pm 2\%$ en estado estable sin embargo cuando la maquina motriz trabaja como generador el voltaje en el bus alcanza un voltaje mayor a 340 volts y esto se debe a que no se cuenta con la resistencia de frenado la cual se encargaría de disipar esta energía en forma de calor.

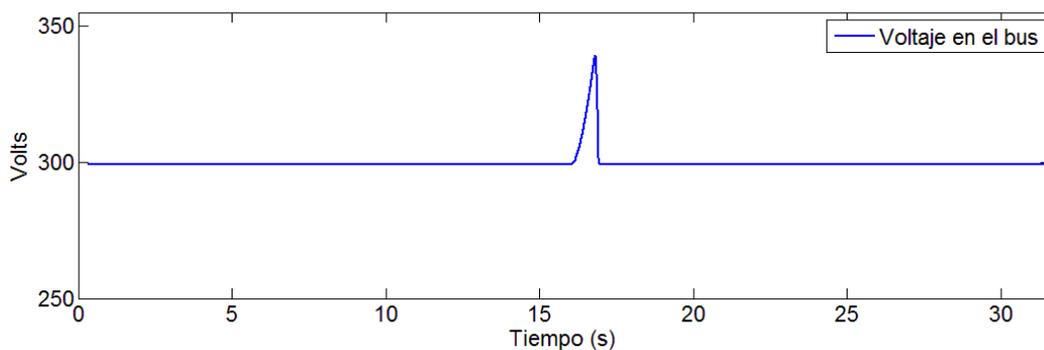


Figura 5. 15 Comportamiento del voltaje en el bus de CD (Resultado de simulación).

En la figura 5.15 se observa el comportamiento del bus de CD en la simulación, en la cual también se puede observar un incremento de voltaje en el bus debido a la regeneración por parte de la máquina motriz, demostrando de esta manera que el comportamiento que se ilustra en la figura 5.14 es el que se esperaba previamente a la prueba experimental desarrollada en la plataforma de pruebas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Introducción

En este capítulo se hará mención de las conclusiones que se obtuvieron después de haber finalizado la simulación e implementación de la plataforma de pruebas del electrodinamómetro, también se hacen las recomendaciones que pueden ser valoradas para un trabajo futuro.

6.2 Conclusiones

1. Se cumplió con el objetivo de la tesis de implementar en el laboratorio una plataforma de pruebas experimentales la cual es capaz de emular cargas mecánicas dinámicas.
2. El haber realizado la simulación del sistema máquina motriz-electrodinamómetro, permitió conocer el comportamiento del sistema previo a su implementación.
3. Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas con el sistema máquina motriz-electrodinamómetro, demuestran que el sistema tiene la capacidad de emular diferentes tipos de carga de manera satisfactoria ya que el error el par del electrodinamómetro es de $\pm 0.82\%$ en el modo manual y de $\pm 3.53\%$ en el modo vehículo.
4. En base a los resultados obtenidos en la simulación del control de la máquina motriz que se encuentra en el capítulo dos, se demuestra la efectividad del anti windup para eliminar los sobretiros en la velocidad debido a que reduce la saturación en el controlador PI.
5. Con el modelo del vehículo eléctrico utilizado en el sistema máquina motriz-electrodinamómetro se lograron resultados satisfactorios de acuerdo con los resultados presentados en el capítulo cinco.
6. El tiempo de cómputo del algoritmo de cálculo del par de referencia puede disminuirse, utilizando un software que trabaje en tiempo real, lo que permitiría una mejora en el desempeño en la emulación del vehículo, ya que al disminuir este tiempo se podría emular la inercia del vehículo con mejores resultados.
7. Al utilizar la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211 para adquirir las señales de la corriente i_q de la máquina motriz, i_q de la máquina de carga, y el voltaje en el bus de CD, la velocidad de muestreo de 250 kS/s se tiene que dividir entre los canales utilizados, obteniéndose una velocidad de muestreo máxima de 80 kS/s en cada canal, lo que provoca la disminución de la resolución en el muestreo.
8. Al utilizar el electrodinamómetro para realizar pruebas a los algoritmos de control de la máquina motriz, se puede determinar si el control de la máquina motriz tiene una respuesta satisfactoria cuando experimenta cambios en la carga.
9. El utilizar un software que trabaja en un ambiente de programación gráfico como LabView, ayuda de manera considerable en el diseño una interfaz gráfica amigable para el usuario.

10. Se continuará utilizando software de National Instruments como LabView para realizar algoritmos de control y automatización en trabajos futuros, debido a las grandes ventajas que ofrece programar algoritmos en un ambiente grafico.
11. La utilización de protocolos de comunicación en la automatización de pruebas, tiene grandes ventajas ya que se pueden obtener mediciones digitales o analógicas de alta resolución y también de alta velocidad entre otras ventajas.

6.3 Recomendaciones

1. Estudiar la viabilidad de implementar algoritmos de control avanzado, como lógica difusa o redes neuronales, en el control de la máquina motriz y evaluar su desempeño.
2. Incluir en la simulación la modulación por vectores espaciales en el bloque del inversor fuente de voltaje (VSI).
3. Utilizar el modulo LabView DSC, para desarrollar un instrumento virtual que sea fácil de usar y que sea capaz de configurar el Unidrive desde la HMI por medio del protocolo de comunicación Modbus RTU.
4. Utilizar el software de programación de National Instruments LabView Real time, para que los algoritmos de control se ejecuten en una plataforma determinista.
5. Cambiar la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6211, por una plataforma de hardware más robusta como la PXI para el control del electrodinamómetro, ya que en esta plataforma es compatible con el software LabView real time.
6. Implementar el control vectorial de la maquina motriz bajo la plataforma de National Instruments PXI y evaluar el desempeño del hardware y su confiabilidad.
7. Probar otras ecuaciones que modelen el comportamiento del vehículo y evaluar con cuál de las ecuaciones se obtienen mejores resultados.
8. Trabajar en conjunto con el programa de posgrado en ciencias en ingeniería mecánica para lograr mejoras en el sistema en el aspecto mecánico como, la alineación de las máquinas y rediseño del acoplamiento mecánico entre otras cosas.

REFERENCIAS

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive" Presented at the IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 25, NO. 2, MARCH/APRIL 1989.
- [2] R. Krishnan "Electric Motor Drives Modeling, Analysis and control" Prentice Hall, inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- [6] E.R. Collins and Y. Huang, "A programmable Dynamometer for testing rotating machinery using a three phase induction Machine" IEEE Trans Energy Conversion, Vol 9 pp 521- 527 sep 1994.
- [4] Bimal K. Bose "Modern Power Electronics and AC drivers" Prentice Hall PTR, October 2001.
- [5] Z. MihailoviC, Himamshu V. Prasad and DuSan BorojeviC "Computer Modeling and Analysis of VSI Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Systems with Adjustable Levels of Complexity"
- [6] Jordi Espina, Toni Arias, Josep Balcells y Carlos Ortega. "Speed Anti-windup strategies review for field oriented control of permanent magnet synchronous machine".
- [7] User Guide Unidrive SP model 0 to 6 Universal Variable Speed AC Drive for induction and servo motors Part Number: 0471-0000-12 Issue: 12. <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/controltechniques/downloads/userguidesandsoftware/Pages/unidrivesppanelmount.aspx>
- [8] Guia de instalacion Unidrive SP regen 200V, 400V, 575V, 690V N° de referencia: 0471-0121-02, Versión: 2 <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/controltechniques/downloads/userguidesandsoftware/Pages/unidrivesppanelmount.aspx>
- [9] User Guide advanced Universal Variable Speed AC Drive for induction and servo motors Part Number: 0471-0002-09 Issue: 9 <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/controltechniques/downloads/userguidesandsoftware/Pages/unidrivesppanelmount.aspx>
- [10] Phil March and Matthew Turner "Anti-windup compensator designs for permanent magnet synchronous motor speed regulation" This work was supported by the UK engineering and physical sciences research council and TRW automotive.
- [11] C. Bohn and D. P. Atherton "A Simulink package for comparative studies of PID Antiwind-up strategies"
- [12] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao and Ali Emadi "Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles fundamentals, theory and design" second edition CRC press Taylor and Francis group.
- [13] C.R. Hewson G.M. Asher M. Summer, "Dynamometer control for emulation of mechanical loads", IEEE Trans. On Industri Applications, pp 1511-1518 1998.

- [14] E.R. Collins and Y. huang, “ A programmable Dynamometer for testing rotating machinery using a three phase induction Machine” IEEE Trans Energy Conversion, Vol 9 pp 521- 527 sep 1994.
- [15] R.e. Betz, H.B. Penfold,R.W. Newton. “Local vector control of an AC drive system load simulator” in Proc IEEE Conf. Control Aplicacion,Vol 1 I.P 721-726 1994.
- [16] C.R. Hewson, G.M.Asher, M. Summer, “ Adynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of AC Inverters” power electronics and variable speed drives conference publication N° 456 sep 1998.
- [17] Z.H. Akpolant, G.M. Asher and J. C. Clare “Dynamic emulation of mechanical loads using a vector controlled induction motor-generator set.” IEEE Trans. Ind electron vol 46 pp 370-379 april 1999.
- [18] Miran Rodic, Karel Jezernick, Mladen Trlep “Dynamic emulation of mechanical loads: an advanced approach ”, proceedings of IEEE , University of Maribor, Maribor Slovenia.
- [19] Slotine, J.J. E., y Li, W “Applied nonlinear control” (Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991).
- [20] Craig, J.J “Adaptive control of mechanical manipulators” (Addison-Wesley, MA, 1988).
- [21] En el 2008 I. Alcalá, A. Claudio, G. Guerrero “Test bench to emúlate an electric vehicle through equivalent inertia and machine dc” Power Electronics Congress, 2008. CIEP 2008. 11th IEEE International.
- [22] Ned Mohan, "Electric Drives an Integrative Approach", Mnpere, 2003.

APÉNDICE A

SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PI.

A.1 Ecuaciones de la MSIP

Para iniciar el cálculo de las ganancias de los controladores es necesario describir el modelo matemático de la MSIP en el dominio de la frecuencia.

$$v_q = sL_q i_q + R_s i_q + \psi_{pm} \omega_e \quad (A.1)$$

$$v_d = sL_d i_d + R_s i_d \quad (A.2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} i_q p \psi_{pm} \quad (A.3)$$

$$s\omega_e = \frac{p}{J} T_e \quad (A.4)$$

Para utilizar el siguiente modelo se toman las siguientes consideraciones:

- Las componentes de secuencia cero son despreciadas.
- Se considera que la compensación del acoplamiento existente entra cada una de las ecuaciones es perfecta.

Después de conocer bajo que consideraciones se utiliza el modelo de la MSIP se convierten las ecuaciones A.1, A.2, A.3 y A.4 a las funciones de transferencia del modelo.

A.2 Diagrama de bloques de las funciones de transferencia de la MSIP.

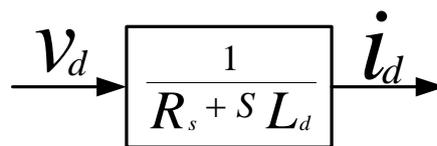


Figura A. 1 Diagrama de bloques de la Función de Transferencia de $\frac{i_d}{v_d}$.

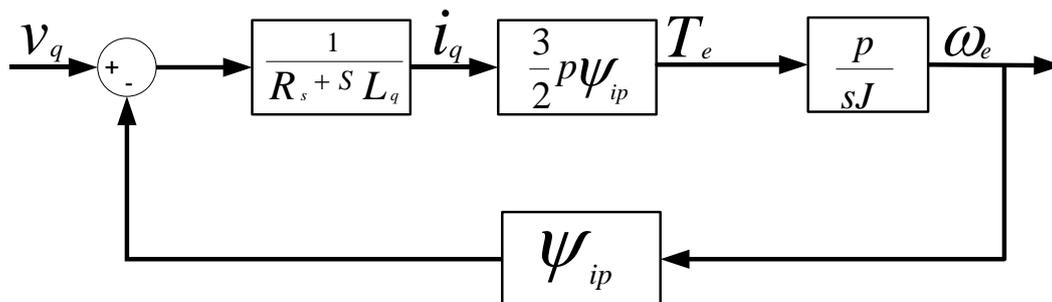


Figura A. 2 Diagrama de bloques de la Función de Transferencia de la MSIP.

A.3 Diseño del lazo de control del par electromagnético

Pasos a seguir en el diseño de un controlador:

1. Asumir que cerca del punto de operación en estado estable los cambios en la referencia y los disturbios en la carga son pequeños. Tal y como se hace en el análisis de pequeña señal, todo el sistema puede asumirse como un sistema lineal cerca del punto de operación en estado estable, esto nos permite poder aplicar a los conceptos básicos de la teoría del control clásico.
2. Ya diseñados los controladores, el sistema completo puede ser sometido a condiciones de grandes señales para evaluar el desempeño del controlador, además el controlador debe ser ajustado apropiadamente para cumplir con los objetivos de diseño

Esto quiere decir que es necesario considerar a nuestro sistema como un sistema lineal, para esto, haremos algunas suposiciones y asumiremos que no existen variaciones en los parámetros de la MSIP [22].

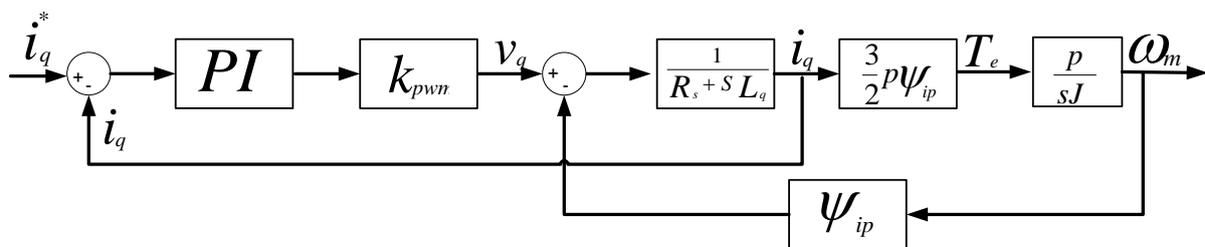


Figura A. 3 Diagrama de bloques utilizando la función de transferencia de la planta.

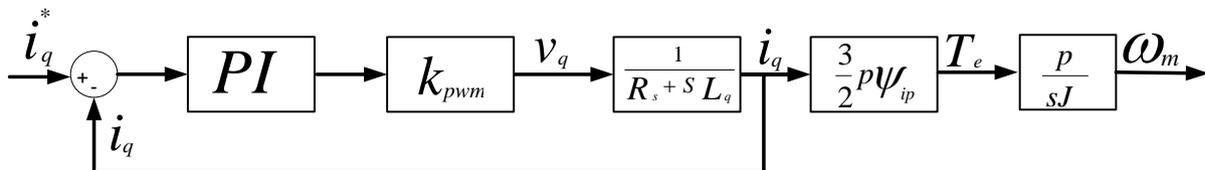


Figura A. 4 Diagrama de bloques reducido.

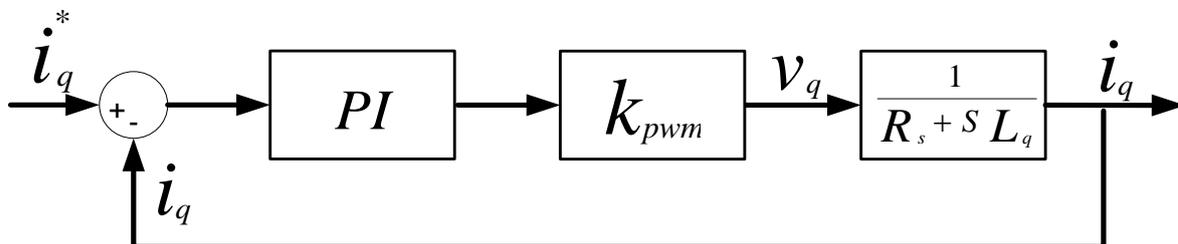


Figura A. 5 Diagrama de bloques del lazo de control de corriente i_q .

En la figura A.5 se elimina el término $\psi_{pm}\omega_e$, debido a que la respuesta del lazo de control de corriente es más rápida que la variable mecánica de velocidad y por esta razón el término $\psi_{pm}\omega_e$ no presenta una influencia considerable en el lazo de control de corriente.

En la figura A.5 se ilustra un controlador PI el cual tiene la siguiente función de transferencia.

$$G(s)_{pi} = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_i}{s} \left[1 + \frac{s}{k_i/k_p} \right] \quad (A.5)$$

Considerando un inversor PWM sinusoidal en la zona lineal la ganancia del inversor que se encuentra en la función de transferencia de la planta está definida por la ecuación (A.6).

$$k_{pwm} = \frac{v_{dc}}{\hat{v}_{tri}} \quad (A.6)$$

Donde:

v_{dc} = Voltaje en el bus de corriente directa.

\hat{v}_{tri} = Voltaje pico de la señal de control.

Con las ecuaciones de transferencia de la máquina síncrona, el inversor y el controlador PI se obtiene la función de transferencia en lazo abierto del sistema y se muestra en la ecuación (A.7).

$$G_{I,ol}(s) = \frac{k_{il}}{s} \left[1 + \frac{s}{k_{il}/k_{pl}} \right] k_{pwm} \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{s}{1/\tau_e}} \quad (A.7)$$

Donde:

$$\tau_e = \frac{L_q}{R_s} \quad (A.8)$$

k_{il} = Constante de integración del controlador del lazo de corriente.

k_{pl} = Constante proporcional del controlador del lazo de corriente.

k_{pwm} = Ganancia del convertidor.

τ_e = Constante de tiempo eléctrica del motor.

Para seleccionar las constantes del controlador PI del lazo de corriente de la **figura A.5** el procedimiento de diseño es simple el cual consiste en cancelar el cero del PI ($-k_{il}/k_{pl}$) con el polo del motor ($-R_s/L_q$) bajo esta condición:

$$k_{il}/k_{pl} = \frac{R_s}{L_q} \quad \text{ó} \quad k_{pl} = \tau_e k_{il} \quad (A.9)$$

Con la cancelación de polos y ceros la función de transferencia se describe como:

$$G_{I,ol}(s) = \frac{k_{I,ol}}{s} \quad (A.10)$$

Donde:

$$k_{I,ol} = \frac{k_{il} k_{pwm}}{R_s} \quad (A.11)$$

En la función de transferencia (A.11) la frecuencia de cruce $\omega_{fcl} = k_{I,ol}$ nosotros seleccionaremos la frecuencia de cruce $f_{fcl} = \left(\frac{\omega_{fcl}}{2\pi} \right)$ del lazo abierto de control de corriente uno

o dos órdenes de magnitud más pequeños que la frecuencia de conmutación con la finalidad de evitar interferencia entre el lazo de control de corriente y el ruido de la frecuencia de conmutación por lo que se obtiene la ecuación para calcular la constante de integración del controlador.

$$k_{il} = \frac{\omega_{fcl} R_s}{k_{pwm}} \quad (A.12)$$

Para el cálculos de las constantes del lazo de control de i_d se utilizan las mismas ecuaciones (A.9) y (A.12). Debido a que es similar al lazo de control que i_q .

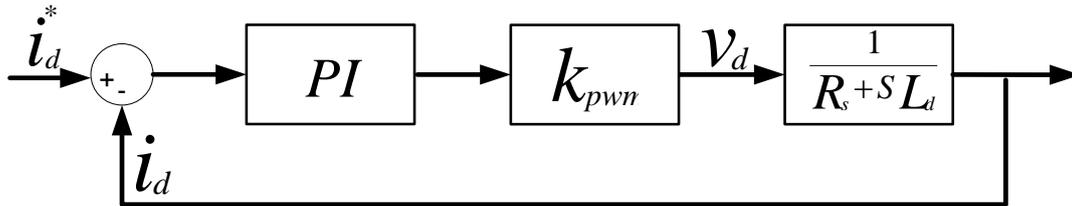


Figura A. 6 Lazo de control de corriente i_d .

A.4 Diseño del lazo de control de velocidad

Seleccionando un ancho de banda del lazo de velocidad un orden menor que el del lazo de control de corriente. Por lo tanto el lazo de control de corriente puede ser asumido y representado por la unidad esto con el propósito de diseño. El controlador de velocidad es un PI y la función de transferencia de lazo abierto del control de la velocidad es referenciado por el signo Ω .

$$G_{\Omega.ol}(s) = \frac{k_{i\Omega}}{s} \left[1 + s / \left(\frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right) \right] 1 \frac{k_T}{sJ} \quad (A.13)$$

Donde

$$k_T = \frac{3}{2} p^2 \psi_{ip} = \text{constante.}$$

p = Numero de par de polos.

ψ_{ip} = flujo del imán permanente.

J = inercia.

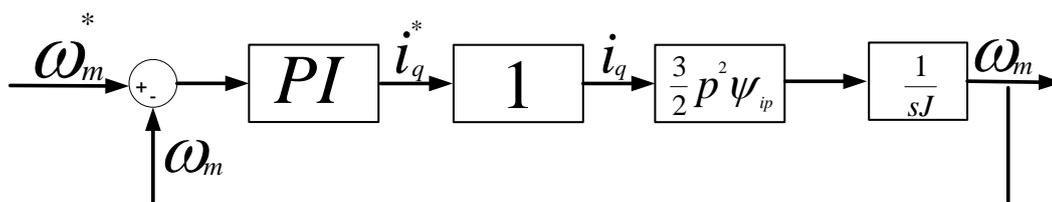


Fig. A.9 Diagrama de bloques del lazo de control de velocidad.

Y se puede describir de la siguiente manera:

$$G_{\Omega.ol}(s) = \left(\frac{k_{i\Omega} k_T}{J} \right) \frac{1 + s/(k_{i\Omega}/k_{p\Omega})}{s^2} \quad (A.14)$$

Para la sintonización del controlador de velocidad se recomienda elegir una frecuencia de cruce $\omega_{fc\Omega}$ que sea un orden menor que la frecuencia de cruce del lazo de control de corriente ω_{fcI} y de esta manera también se propone un valor razonable para el margen de fase.

Por lo tanto se obtienen dos ecuaciones las cuales se utilizan para calcular $k_{p\Omega}$ $k_{i\Omega}$, como es bien sabido el valor de la magnitud de la función de transferencia en lazo abierto evaluada en la frecuencia de cruce es igual a uno se tiene la ecuación A.15.

$$\left| \left(\frac{k_{i\Omega} k_T}{J} \right) \frac{1 + s/(k_{i\Omega}/k_{p\Omega})}{s^2} \right|_{s=j\omega_{fc\Omega}} = 1 \quad (A.15)$$

Teniendo en cuenta que el margen de fase φ es de 180° más el ángulo de fase ϕ de la función de transferencia en lazo abierto en la frecuencia de cruce se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\varphi = 180^\circ + \phi \quad (A.16)$$

$$\phi = \angle G_{ol}(s) \quad (A.17)$$

$$\varphi = 180 + \angle G_{ol}(s) \quad (A.18)$$

$$\angle G_{ol}(s) = \varphi - 180^\circ \quad (A.19)$$

$$\angle \left(\frac{k_{i\Omega} k_T}{J} \right) \frac{1 + s/(k_{i\Omega}/k_{p\Omega})}{s^2} \Big|_{s=j\omega_{fc\Omega}} = \varphi - 180^\circ \quad (A.20)$$

Después de un desarrollo algebraico de las ecuaciones (A.15) y (A.20) se deduce que la constante proporcional del controlador $k_{p\Omega}$ y la constante de integración $k_{i\Omega}$ pueden quedar expresados de la siguiente manera:

$$k_{i\Omega} = \frac{J\omega_{fc\Omega}^2}{\sqrt{1 + (\tan(\varphi - 180))}^2} K_T \quad (A.21)$$

$$k_{p\Omega} = \frac{\tan(\varphi - 180)k_{i\Omega}}{\omega_{fc\Omega}} \quad (A.22)$$

A.5 Cálculos numéricos de los controladores

Inductancia en el eje q	L_q	1.25	mH
Inductancia en el eje d	L_d	1.25	mH
Numero de par de polos	p	4	
Resistencia en el estator	R_s	.075	Ω
Flujo de los imanes permanentes	ψ_{ip}	0.1667	Wb
Frecuencia de conmutación	f_c	20	kHz
Valor pico de la señal de control del inversor	\hat{v}_{tri}	$1/\sqrt{3}$	V.
Voltaje de corriente directa del inversor	v_{cd}	300	V.
Inercia del rotor	J	.00864	Kg.m ²
Frecuencia de conmutación del inversor		10	kHz.

Tabla A. 1 Parámetros de la MSIP y el convertidor.

Teniendo los datos necesarios para el cálculo de las ganancias de los controladores se empieza por la ecuación (A.6).

$$k_{pwm} = \frac{v_{dc}}{\hat{v}_{tri}} = 300 / (1/\sqrt{3}) = 519.61$$

A.5.1 Cálculo numérico del lazo de control de corriente

Como la frecuencia de conmutación del inversor es de 10kHz la frecuencia de cruce que se toma para el cálculo de las constantes del lazo de control de corriente será de un orden menor, la cual será de 1kHz para este análisis las unidades de la frecuencia de cruce son rad/S .

$$\omega_{fcl} = 1000 * 2\pi.$$

$$k_{il} = \frac{\omega_{fcl} R_s}{k_{pwm}} = \frac{1000 * 2\pi * .075}{300 / (1/\sqrt{3})} = 0.9069$$

Para calcular la constante de integración es necesario calcular primero la constante de tiempo eléctrica de la MSIP esto se hace por medio de la ecuación (A.8).

$$\tau_e = \frac{L_q}{R_s} = \frac{.00125}{.075} = 0.1666$$

$$k_{pl} = \tau_e k_{il} = \frac{.00125}{.075} * .9069 = .0151$$

Estos cálculos se emplean para los dos lazos de control de corriente tanto para el controlador de i_q como para el de i_d ya que las dos inductancias iguales $i_q = i_d$.

A.5.2 Cálculo numérico del lazo de control de velocidad

Para este diseño se propone un margen de fase de 60° y la frecuencia de cruce de este controlador será de un orden menor que el de la frecuencia de cruce del lazo de control de corriente.

$$K_T = \frac{3}{2} p^2 \psi_{ip} = \frac{3}{2} * 4^2 * 0.1667 = 4.0008$$

$$k_{i\Omega} = \frac{J \omega_{fc\Omega}^2}{\sqrt{1 + (\tan(\varphi - 180))^2} K_T} = \frac{.00864 * (100 * 2\pi)^2}{\sqrt{1 + 1.732^2} * 4.0008} = 426.2910$$

$$k_{p\Omega} = \frac{\tan(\varphi - 180) k_{i\Omega}}{\omega_{fc\Omega}} = 1.1712$$