



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

ESTUDIO DE TRES PROTOTIPOS DE  
GENERADORES ELÉCTRICOS DE FLUJO  
AXIAL E IMANES PERMANENTES EN  
BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.

Autor:

FERNÁNDEZ JUÁREZ, HÉCTOR

Tutor:

PÉREZ GARCÍA, JULIÁN MANUEL

Departamento de Ingeniería  
Eléctrica

Valladolid, julio del 2018.





## ÍNDICE GENERAL.

ÍNDICE GENERAL.....	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	9
<b>1 RESUMEN.....</b>	<b>11</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3 BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.....</b>	<b>15</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	15
3.2 DESCRIPCIÓN BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.....	15
3.3 ACONDICIONAMIENTO BANCO DE ENSAYOS.....	16
3.3.1 <i>INSTALACIÓN TRANSDUCTOR DE PAR (LEBOW)</i> .....	16
3.3.2 <i>INSTALACIÓN UNIDAD DIGITAL DE CONTROL DE PAR (VIBRO-METER DCU 285)</i> ....	16
3.3.3 <i>PREPARACIÓN TERMO-RESISTENCIAS PT100</i> .....	17
3.3.4 <i>INSTALACIÓN CONVERTIDORES DE TEMPERATURAS</i> .....	17
3.3.5 <i>INSTALACIÓN CARGA ELECTRÓNICA Y VATÍMETRO</i> .....	18
3.3.5.1 PROBLEMA CON LA CARGA ELECTRÓNICA.....	19
3.3.5.2 COMPROBACIÓN CANALES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	19
3.3.6 <i>IDENTIFICACIÓN DE CANALES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS</i> .....	21
3.3.7 <i>PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LAS SONDAS DE CORRIENTE</i> .....	24
3.3.7.1 FUNCIONAMIENTO BLOQUE RMS.....	27
3.3.7.2 PROBLEMAS CON LAS SONDAS DE INTENSIDAD.....	27
3.3.8 <i>COMPROBACIÓN DE LOS CANALES QUE NO FUNCIONABAN DEL SISTEMA DE</i> <i>ADQUISICIÓN DE DATOS</i> .....	29
3.3.9 <i>PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LAS SONDAS DE TENSIÓN</i> .....	30
3.3.9.1 DISEÑO DEL ATENUADOR.....	30
<b>4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.....</b>	<b>33</b>
4.1 MOTOR DE ARRASTRE.....	33
4.1.1 <i>SERVOMOTOR</i> .....	33
4.1.2 <i>VARIADOR UNI3403 (22 KW)</i> .....	34
4.2 MEDIDOR DE PAR (LEBOW).....	35
4.3 EQUIPO ADICIONAL.....	37
4.3.1 <i>RECTIFICADOR</i> .....	37
4.3.2 <i>CARGA ELECTRÓNICA</i> .....	38
4.3.3 <i>CONFIGURACIÓN CARGA ELECTRÓNICA</i> .....	39
4.4 MULTIPLICADORA.....	40
<b>5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....</b>	<b>43</b>
5.1 SONDAS DE TENSIÓN.....	43
5.1.1 <i>PROCEDIMIENTO DE UTILIZACIÓN</i> .....	44
5.1.2 <i>RELACIÓN DE ATENUACIÓN</i> .....	44
5.2 SONDAS DE CORRIENTE.....	44
5.2.1 <i>PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN Y AJUSTE DEL CERO</i> .....	45



5.2.2	RELACIÓN DE ATENUACIÓN. ....	46
5.3	SONDAS DE TEMPERATURA. ....	46
5.3.1	TERMO-RESISTENCIAS PT100. ....	47
5.3.2	CONVERTIDOR DE SEÑAL DE TEMPERATURA MP82800-R. ....	47
5.3.3	CABLEADO TIPO BNC. ....	48
5.3.4	CONVERSIÓN DE TEMPERATURAS. ....	49
5.4	VATÍMETRO. ....	50
5.4.1	INSTALACIÓN DE LAS PINZAS. ....	51
5.4.2	CONFIGURACIÓN VATÍMETRO Y RELACIONES DE CONVERSIÓN. ....	52
<b>6</b>	<b>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. ....</b>	<b>55</b>
6.1	TARJETA DE ADQUISICIÓN. ....	55
6.2	ORDENADOR. ....	56
<b>7</b>	<b>SOFTWARE. ....</b>	<b>57</b>
7.1	SIMULINK. ....	57
7.1.1	RUTINAS SIMULINK. ....	57
7.1.1.1	REGIÓN I: SONDAS DE CORRIENTE. ....	59
7.1.1.2	REGIÓN II: SONDAS DE TENSIÓN. ....	59
7.1.1.3	REGIÓN III: POSICIÓN Y VELOCIDAD. ....	60
7.1.1.4	SUBSISTEMA TEMPERATURAS. ....	60
7.1.1.5	SUBSISTEMA VATÍMETRO. ....	61
7.1.1.6	SUBSISTEMA CONTROL UNIDRIVE 22kW. ....	62
7.1.1.7	SUBSISTEMA CARGA. ....	64
7.1.1.8	CONSTRUCCIÓN DEL PROGRAMA. ....	65
7.2	CONTROLDESK. ....	67
7.2.1	MANEJO DE CONTROLDESK. ....	67
7.2.1.1	DISEÑO DE LAYOUT. ....	68
7.2.1.2	LAYOUT ENSAYO EN VACÍO. ....	71
7.2.1.3	LAYOUT ENSAYO EN CARGA. ....	72
7.2.1.4	LAYOUT ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. ....	73
7.2.1.5	LAYOUT ENSAYO DE RELUCTANCIA. ....	74
7.2.1.6	CARGAR LAYOUT. ....	75
7.2.1.7	CAPTURA DE DATOS. ....	77
7.3	MATLAB. ....	78
<b>8</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS GENERADORES A ENSAYAR. ....</b>	<b>80</b>
8.1	INTRODUCCIÓN. ....	80
8.1.1	CONCEPTOS PREVIOS. ....	80
8.1.2	MÁQUINAS DE FLUJO AXIAL. ....	80
8.2	DESCRIPCIÓN GENERADORES. ....	81
8.2.1	CARACTERÍSTICAS GENERADORES. ....	83
<b>9</b>	<b>ENSAYOS REALIZADOS. ....</b>	<b>92</b>
9.1	ENSAYO EN VACÍO. ....	92
9.2	ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. ....	93
9.3	ENSAYO EN CARGA. ....	95
9.4	ENSAYO DE RELUCTANCIA. ....	96
9.4.1	PRINCIPIO TEÓRICO. ....	96
9.4.2	PUESTA A PUNTO DEL BANCO. ....	100



<b>10</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>102</b>
10.1	ENSAYO EN VACÍO.....	102
10.1.1	GENERADOR DE 27 RANURAS.....	102
10.1.2	GENERADOR DE 24 RANURAS.....	103
10.1.3	GENERADOR DE 24 RANURAS DESFASADAS.....	105
10.2	ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.....	107
10.2.1	GENERADOR 27 RANURAS.....	107
10.2.2	GENERADOR 24 RANURAS.....	108
10.2.3	GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.....	109
10.3	ENSAYO EN CARGA.....	110
10.3.1	GENERADOR DE 27 RANURAS.....	110
10.3.2	GENERADOR 24 RANURAS.....	114
10.3.3	GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.....	117
10.4	ENSAYO DE RELUCTANCIA.....	119
10.4.1	GENERADOR DE 27 RANURAS.....	121
10.4.1.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.....	121
10.4.1.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.....	122
10.4.2	GENERADOR 24 RANURAS.....	123
10.4.2.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.....	123
10.4.2.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.....	124
10.4.3	GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.....	125
10.4.3.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.....	125
10.4.3.1	ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.....	126
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>127</b>
11.1	ENSAYO DE VACÍO.....	127
11.2	ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.....	129
11.3	ENSAYO EN CARGA.....	131
11.3.1	COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS.....	131
11.3.2	COMPARACIÓN POTENCIA MECÁNICA.....	134
11.3.3	COMPARACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA.....	135
11.3.4	COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS.....	136
11.4	ENSAYO DE RELUCTANCIA.....	137
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>139</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

ILUSTRACIÓN 1: COMPONENTES DEL BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.....	16
ILUSTRACIÓN 2: PROCESO DE SOLDADURA DE TERMINALES.....	17
ILUSTRACIÓN 3: CONVERTIDOR DE TEMPERATURAS.....	18
ILUSTRACIÓN 4: BLOQUE SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	20
ILUSTRACIÓN 5: LAYOUT DE COMPROBACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.....	20
ILUSTRACIÓN 6: CIRCUITO INTEGRADO DE UNA SONDA DE CORRIENTE.....	25
ILUSTRACIÓN 7: COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SONDA DE CORRIENTE.....	26
ILUSTRACIÓN 8: PROGRAMACIÓN DE LAS SONIDAS DE CORRIENTE EN SIMULINK.....	27
ILUSTRACIÓN 9: FUENTE DE ALIMENTACIÓN EXTERNA.....	29
ILUSTRACIÓN 10: DISEÑO DEL ATENUADOR MEDIANTE LTSPICE IV.....	31
ILUSTRACIÓN 11: SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ATENUADOR MEDIANTE LTSPICE IV. .....	31
ILUSTRACIÓN 12: ATENUADOR DE TENSIÓN.....	32
ILUSTRACIÓN 13: SERVOMOTOR 190UMD200HACAA.....	34
ILUSTRACIÓN 14: VARIADOR UNI3403 (22KW).....	35
ILUSTRACIÓN 15: MEDIDOR DE PAR LEBOW.....	37
ILUSTRACIÓN 16: RECTIFICADOR.....	38
ILUSTRACIÓN 17: CARGA ELECTRÓNICA HP N3300A.....	40
ILUSTRACIÓN 18: MULTIPLICADORA SFN44B.....	41
ILUSTRACIÓN 19: CAJA DE ALOJAMIENTO DE LOS CONVERTIDORES DE SEÑAL DE TEMPERATURA. .....	49
ILUSTRACIÓN 20: ESQUEMA CONEXIÓN VOLTÍMETRO Y AMPERÍMETRO DEL VATÍMETRO.....	51
ILUSTRACIÓN 21: CONFIGURACIÓN VATÍMETRO.....	53
ILUSTRACIÓN 22: TARJETA DE ADQUISICIÓN DS1103.....	56
ILUSTRACIÓN 23: PROGRAMACIÓN DE BLOQUE CON SIMULINK. VISTA GENERAL.....	58
ILUSTRACIÓN 24: PROGRAMACIÓN DE BLOQUE CON SIMULINK. SUBSISTEMA TEMPERATURAS.....	61
ILUSTRACIÓN 25: PROGRAMACIÓN DE BLOQUE CON SIMULINK. SUBSISTEMA VATÍMETRO.....	62
ILUSTRACIÓN 26: PROGRAMACIÓN DE BLOQUE CON SIMULINK. SUBSISTEMA CONTROL UNIDRIVE. .....	63
ILUSTRACIÓN 27: PROGRAMACIÓN DE BLOQUE CON SIMULINK. SUBSISTEMA CARGA.....	65
ILUSTRACIÓN 28: CUADRO DE DIÁLOGO PARÁMETROS DE SIMULACIÓN. REAL-TIME WORKSHOP. .....	66
ILUSTRACIÓN 29: CUADRO DE DIÁLOGO PARÁMETROS DE SIMULACIÓN. SOLVER.....	66
ILUSTRACIÓN 30: PROCESO DE ASIGNACIÓN DE VARIABLES EN CONTROLDESK.....	69
ILUSTRACIÓN 31: INTERFAZ GRÁFICO. ENSAYO EN VACÍO.....	71
ILUSTRACIÓN 32: INTERFAZ GRÁFICO. ENSAYO EN CARGA.....	72
ILUSTRACIÓN 33: INTERFAZ GRÁFICA. ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.....	73
ILUSTRACIÓN 34: INTERFAZ GRÁFICA ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.....	74
ILUSTRACIÓN 35: PROCEDIMIENTO DE CARGA DE LA APLICACIÓN.....	76
ILUSTRACIÓN 36: INTERFAZ GRÁFICA. CAPTURA DE DATOS.....	77
ILUSTRACIÓN 37: INTERFAZ GRÁFICA. MARCACIÓN DE VARIABLES.....	78
ILUSTRACIÓN 38: GENERADOR DE 24 RANURAS. CONJUNTO DE ROTOR Y ESTATOR.....	82
ILUSTRACIÓN 39: GENERADOR DE 27 RANURAS.....	82
ILUSTRACIÓN 40: ESQUEMA DE CONEXIÓN. ENSAYO EN VACÍO.....	93
ILUSTRACIÓN 41: ESQUEMA DE CONEXIÓN. ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.....	94



ILUSTRACIÓN 42: ESQUEMA DE CONEXIÓN. ENSAYO EN CARGA. ....	95
ILUSTRACIÓN 43: IMÁN LIBRE DE GIRAR EN EL INTERIOR DE UN ANILLO. ( <b>"BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTOR DESING", POR DUANE C. HANSELMAN. EDITORIAL MCGRAW-</b> .....	97
ILUSTRACIÓN 44: PAR EXPERIMENTADO POR EL IMÁN DE LA ILUSTRACIÓN 43. ( <b>"BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTOR DESING", POR DUANE C. HANSELMAN. EDITORIAL MCGRAW-</b> .....	98
ILUSTRACIÓN 45: MOTOR BRUSHLESS DE 12 RANURAS RECTAS Y 4 POLOS. ( <b>"BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTOR DESING", POR DUANE C. HANSELMAN. EDITORIAL MCGRAW-</b> .....	98
ILUSTRACIÓN 46: CURVA PAR-POSICIÓN. ....	99
ILUSTRACIÓN 47: A) EXTRACCIÓN DEL ENGRANAJE MEDIANTE EL EXTRACTOR. B) MONTAJE DEL BANCO DE ENSAYOS SIN LA MULTIPLICADORA. C) SEPARACIÓN DE LOS ESTÁTORES DEL GENERADOR PARA DESFASAR EL RANURADO. D) MONTAJE DEL BANCO DE ENSAYOS CON LA MULTIPLICADORA. ....	101
ILUSTRACIÓN 48: GENERADOR DE 24 RANURAS. ENSAYO EN VACÍO. ....	102
ILUSTRACIÓN 49: RAMPA TENSIÓN-VELOCIDAD. GENERADOR 27 RANURAS. ENSAYO EN VACÍO. .....	103
ILUSTRACIÓN 50: GENERADOR 24 RANURAS. ENSAYO EN VACÍO. ....	103
ILUSTRACIÓN 51: RAMPA TENSIÓN-VELOCIDAD. GENERADOR 24 RANURAS EN FASE. ENSAYO EN VACÍO. ....	104
ILUSTRACIÓN 52: GENERADOR DE 24 RANURAS DESFASADAS. ENSAYO EN VACÍO. ....	105
ILUSTRACIÓN 53: RAMPA VELOCIDAD-TENSIÓN (ARRIBA IZQUIERDA). TENSIÓN-VELOCIDAD DEL PLATO 1 Y 2 Y SUMA DE AMBOS; FASE 1 (ARRIBA DERECHA). TENSIÓN-VELOCIDAD DEL PLATO 1 Y 2 Y SUMA DE AMBOS; FASE 2 (ABAJO IZQUIERDA). TENSIÓN-VELOCIDAD DEL PLATO 1 Y 2 Y SUMA DE AMBOS; FASE 3 (ABAJO DERECHA). ....	106
ILUSTRACIÓN 54. TENSIONES-TIEMPO (IZQUIERDA). CORRIENTES-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. GENERADOR 27 RANURAS. ....	107
ILUSTRACIÓN 55. TENSIÓN-TIEMPO (IZQUIERDA). INTENSIDAD-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. GENERADOR 24 RANURAS. ....	108
ILUSTRACIÓN 56: TENSIÓN-TIEMPO (IZQUIERDA). INTENSIDAD-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS. ....	109
ILUSTRACIÓN 57: TENSIÓN/INTENSIDAD-TIEMPO (IZQUIERDA). POTENCIA-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 27 RANURAS. ....	110
ILUSTRACIÓN 58: RAMPA POTENCIA-VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 27 RANURAS. .....	111
ILUSTRACIÓN 59: RENDIMIENTO APLICANDO UNA RAMPA DE VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 27 RANURAS. ....	112
ILUSTRACIÓN 60: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR DE 27 RANURAS. ....	113
ILUSTRACIÓN 61: RAMPA POTENCIA-VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS. .....	115
ILUSTRACIÓN 62: RENDIMIENTO APLICANDO UNA RAMPA DE VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS. ....	115
ILUSTRACIÓN 63:EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR DE 24 RANURAS. ....	116



ILUSTRACIÓN 64: TENSIÓN/INTENSIDAD-TIEMPO (IZQUIERDA). POTENCIA-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS. ....	117
ILUSTRACIÓN 65: RAMPA POTENCIA-VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS. ....	118
ILUSTRACIÓN 66: RENDIMIENTO APLICANDO UNA RAMPA DE VELOCIDAD. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS. ....	119
ILUSTRACIÓN 67: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA. ENSAYO EN CARGA. GENERADOR DE 24 RANURAS DESFASADAS. ....	119
ILUSTRACIÓN 68: PAR- POSICIÓN. ENSAYO DE RELUCTANCIA. GENERADOR DE 27 RANURAS. ....	121
ILUSTRACIÓN 69: PAR-POSICIÓN. ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA. GENERADOR 27 RANURAS. ....	122
ILUSTRACIÓN 70: PAR- POSICIÓN. ENSAYO DE RELUCTANCIA. GENERADOR DE 24 RANURAS. ....	123
ILUSTRACIÓN 71: PAR-POSICIÓN. ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA. GENERADOR 24 RANURAS. ....	124
ILUSTRACIÓN 72: PAR- POSICIÓN. ENSAYO DE RELUCTANCIA. GENERADOR DE 24 RANURAS DESFASADAS. ....	125
ILUSTRACIÓN 73: ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA. GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS. ....	126
ILUSTRACIÓN 74: COMPARACIÓN DE LA TENSIÓN DE LÍNEA DE CADA GENERADOR. ENSAYO EN VACÍO. ....	128
ILUSTRACIÓN 75: COMPARACIÓN TENSIÓN DE LÍNEA ANTE UNA RAMPA DE VELOCIDAD. ENSAYO EN VACÍO. ....	129
ILUSTRACIÓN 76: COMPARACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LÍNEA DE CADA GENERADOR. ENSAYO EN CORTOCIRCUITO. ....	130
ILUSTRACIÓN 77: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL BOBINADO. ENSAYO EN CARGA LARGA. ....	131
ILUSTRACIÓN 78: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CARCASA EXTERIOR. ENSAYO EN CARGA LARGA. ....	132
ILUSTRACIÓN 79: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ESTATOR. ENSAYO EN CARGA LARGA. ....	133
ILUSTRACIÓN 80: COMPARACIÓN DE POTENCIA MECÁNICA. ENSAYO EN CARGA. ....	134
ILUSTRACIÓN 81: COMPARACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA. ENSAYO EN CARGA. ....	135
ILUSTRACIÓN 82: CURVA DE RENDIMIENTOS. ENSAYO EN CARGA. ....	136
ILUSTRACIÓN 83: COMPARACIÓN PAR DE RELUCTANCIA. ENSAYO CON MULTIPLICADORA. ....	137





## ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1: DESCRIPCIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL BLOQUE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	22
TABLA 2: DESCRIPCIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	23
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS SERVOMOTOR 190UMD200HACAA.	34
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS VARIADOR UNI3403 (22KW).	35
TABLA 5: CARACTERÍSTICAS MEDIDOR DE PAR LEBOW.	36
TABLA 6: COMPONENTES PRINCIPALES DEL RECTIFICADOR.	38
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS CARGA ELECTRÓNICA HP N3300A.	39
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS SONDAS DE TENSIÓN DP 25.	44
TABLA 9: RELACIÓN DE ATENUACIÓN SONDAS DE TENSIÓN.	44
TABLA 10: CARACTERÍSTICAS SONDAS DE CORRIENTE HZ56-2.	45
TABLA 11: RELACIÓN DE ATENUACIÓN SONDAS DE CORRIENTE.	46
TABLA 12: CONVERTIDOR SEÑAL DE TEMPERATURA MP 82800-R.	48
TABLA 13: RELACIÓN DE ATENUACIÓN CONVERTIDORES TEMPERATURA.	50
TABLA 14: RELACIÓN ATENUACIÓN VATÍMETRO.	52
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS TARJETA DE ADQUISICIÓN DS1103.	55
TABLA 16: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS MÁQUINAS DE FLUJO AXIAL FRENTE A LAS DE FLUJO RADIAL.	81
TABLA 17: CARACTERÍSTICAS GENERADOR 27 RANURAS.	85
TABLA 18: CARACTERÍSTICAS GENERADOR 27 RANURAS II.	86
TABLA 19: CARACTERÍSTICAS GENERADOR 24 RANURAS.	88
TABLA 20: CARACTERÍSTICAS GENERADOR 24 RANURAS II.	90
TABLA 21: CONDICIONES DE ENSAYO Y DATOS A OBTENER. ENSAYO EN VACÍO.	93
TABLA 22: CONDICIONES DE ENSAYO Y DATOS A OBTENER. ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.	94
TABLA 23: CONDICIONES DE ENSAYO Y DATOS A OBTENER. ENSAYO EN CARGA.	96
TABLA 24: PERIODO EN FUNCIÓN DE LAS RANURAS DE CADA MOTOR.	99

## ÍNDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 1: VALOR EFICAZ.	27
ECUACIÓN 2: RELACIÓN ATENUACIÓN TEMPERATURAS.	50
ECUACIÓN 3: PERIODO DEL PAR DE LA RELUCTANCIA.	99
ECUACIÓN 4: CÁLCULO VALOR EFICAZ.	102
ECUACIÓN 5: CÁLCULO DEL RENDIMIENTO.	110
ECUACIÓN 6: TENSIÓN/INTENSIDAD-TIEMPO (IZQUIERDA). POTENCIA-TIEMPO (DERECHA). ENSAYO EN CARGA. GENERADOR 24 RANURAS.	114





## 1 RESUMEN.

El propósito del presente trabajo fin de grado es el estudio detallado de tres generadores eléctricos de flujo axial e imanes permanentes empleando un banco de ensayos dinamométrico. Se utilizarán tres prototipos de estas máquinas eléctricas diseñadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Se pretende dar continuidad a la línea de investigación llevada a cabo por el Departamento de Ingeniería Eléctrica además de proporcionar una prolongación a los trabajos de fin de estudios de años anteriores.

Se llevará a cabo una serie de ensayos para analizar, entre otros parámetros, el par de reluctancia, tensión en circuito abierto, corriente de cortocircuito y su funcionamiento en carga. Empleando para ello software como Matlab y Simulink además de software específico de la instrumentación de la que dispone el banco de ensayos (ControlDesk).

### **PALABRAS CLAVE**

Generador, banco de ensayos dinamométrico, reluctancia, imanes permanentes, dSPACE.





## 2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

El objetivo del trabajo fin de grado es el realizar un estudio detallado de tres generadores de flujo axial e imanes permanentes empleando un banco de ensayos dinamométrico. En particular, se pretende analizar el par de reluctancia, la tensión en circuito abierto, la corriente en cortocircuito y su funcionamiento en carga. Para ello se llevarán a cabo los ensayos necesarios para detallar dichos parámetros.

Se empleará Matlab y Simulink, el primero como herramienta de software matemático que nos permitirá la representación y procesamiento de datos y funciones. El segundo nos proporciona un entorno de programación visual sobre el entorno de programación del anterior.

Utilizaremos software específico de la instrumentación de la que dispone el banco de ensayos, como es dSPACE y ControlDesk. DSPACE como sistema de adquisición de datos, ControlDesk como software para la visualización de esos datos.

Para realizar las medidas se empleará la instrumentación disponible en el laboratorio como sondas de tensión, vatímetros, sondas de temperaturas, medidores de par, una carga electrónica, encoders, etc.

Una vez adquiridos los datos por medio de los instrumentos de medida y de su representación mediante el software anteriormente citado estaremos en disposición de obtener las conclusiones que son objeto de este trabajo fin de grado.

Se describirá los sistemas y equipos utilizados, así como los principios teóricos en los que se fundamenta cada ensayo. Se dará una explicación al comportamiento de los motores en cuanto a par de reluctancia, tensión en circuito abierto, corriente en cortocircuito y su funcionamiento en carga.

Desde el punto de vista práctico, este estudio nos permitirá conocer determinadas características de los diferentes generadores para su puesta en funcionamiento como generador, por ejemplo, generador eólico o generador hidráulico.

Se ha hecho gran esfuerzo en la puesta a punto de los equipos de medida de tal forma que podemos afirmar que las medidas tomadas son las correctas. Esta es una etapa primordial en el desarrollo del presente trabajo puesto que adquiridos los datos de forma precisa podemos obtener unas conclusiones adecuadas.



El hecho de afirmar que los valores tomados son los correctos, parte de contrastar dichos valores con los obtenidos de los principios teóricos, así como de compararlos con las especificaciones establecidas en el proceso de diseño.



### **3 BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.**

Este apartado englobará los resultados obtenidos del estudio. Previamente a este proceso se describirá los elementos utilizados en dicho estudio, así como los ensayos llevados a cabo. Con todo esto se obtendrán una serie de conclusiones objeto de este proyecto fin de grado.

#### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

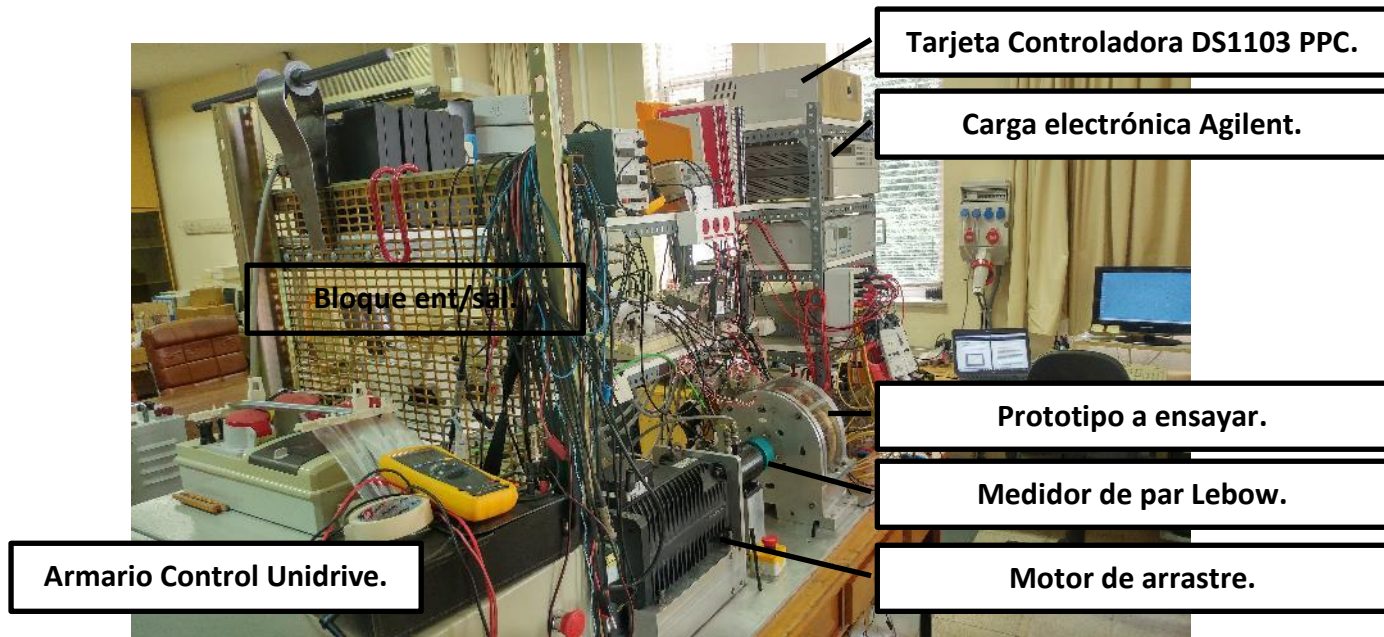
Diseñado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, tiene por objeto poder ensayar máquinas eléctricas rotativas y conocer magnitudes tales como velocidades de giro, pares transmitidos, posiciones, etc. Además, a través de los ensayos permite conocer magnitudes físicas propias de los generadores como intensidades, corrientes, potencias, etc.

#### **3.2 DESCRIPCIÓN BANCO DE ENSAYOS DINAMOMÉTRICO.**

Disponemos de dos bancos de ensayos ambos basados en los mismos principios, la diferencia entre los dos es que en uno de ellos incorporaremos un nuevo elemento: la multiplicadora. Mediante este elemento podremos controlar de una forma más segura el par residual que presenta el motor.

El banco de ensayos cuenta con los siguientes elementos:

- ✓ Accionamiento de velocidad variable universal para motores de inducción y servomotores (Unidrive).
- ✓ Motor de arrastre controlado por el anterior.
- ✓ Medidor de par y velocidad.
- ✓ Generador para ensayar.
- ✓ Sistema de adquisición de datos.



*Ilustración 1: Componentes del banco de ensayos dinamométrico.*

### 3.3 ACONDICIONAMIENTO BANCO DE ENSAYOS.

Antes de realizar cualquier ensayo y de adquirir los datos necesarios de este estudio, es fundamental realizar la instalación de los elementos anteriormente citados.

#### 3.3.1 INSTALACIÓN TRANSDUCTOR DE PAR (LEBOW).

En primer lugar, se ha procedido a la instalación del transductor de par Lebow, se han acoplado mediante una serie de engranajes el motor de arrastre (190UMD200HACAA), en la parte izquierda de la instalación, mientras que en la parte derecha se ha acoplado el generador.

Se han fijado todos los elementos de unión de la instalación para poder realizar los ensayos en unas condiciones seguras. Evitando, en la medida de lo posible, vibraciones y movimientos no deseados. Además de esto, se han asegurado todos los cables (hilos termopar, cables de sondas tanto amperimétricas como voltimétricas, etc.) con el fin de evitar que se enreden en el eje de la instalación.

#### 3.3.2 INSTALACIÓN UNIDAD DIGITAL DE CONTROL DE PAR (VIBRO-METER DCU 285).

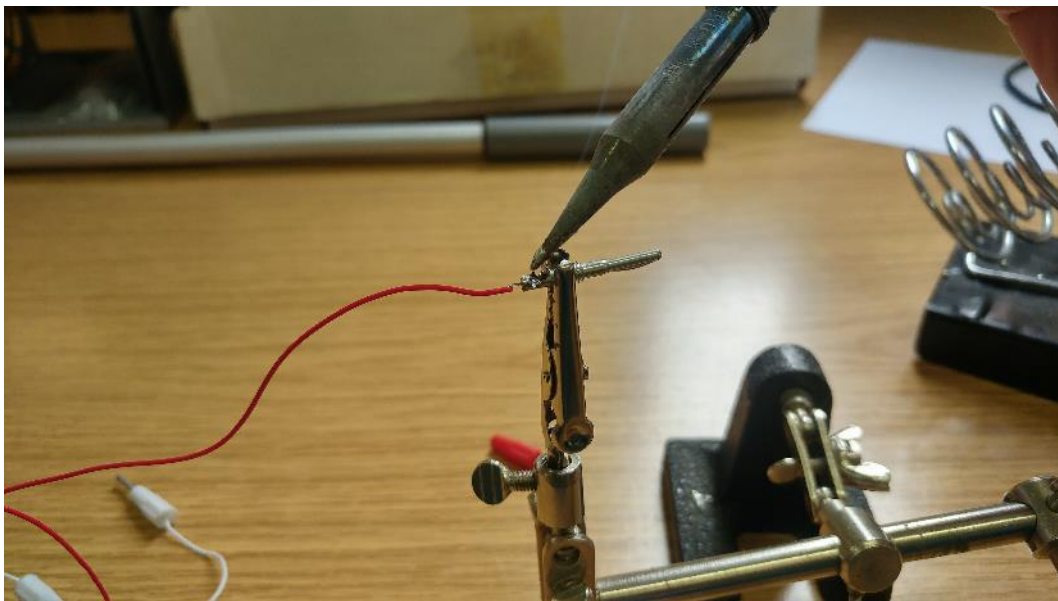
Posteriormente, se procedió a la instalación de la unidad digital de control de par (vibro-meter DCU 285) pero tras varios intentos de configuración del dispositivo y tras comprobar que mostraba medidas de par incoherentes, se llegó a la



conclusión de que el transductor de par (Lebow) y la unidad de control eran incompatibles.

### 3.3.3 PREPARACIÓN TERMO-RESISTENCIAS PT100.

A continuación, se incorporó a la instalación las termo-resistencias PT100 con el fin de medir la temperatura de la carcasa, bobinado y estátor del generador. Algunas de ellas funcionan a tres hilos mientras que otras a cuatro. La unión entre los hilos procedentes del generador y los del convertidor se realizador mediante una serie de terminales, estos se soldaron al hilo tal y como muestra la siguiente figura.



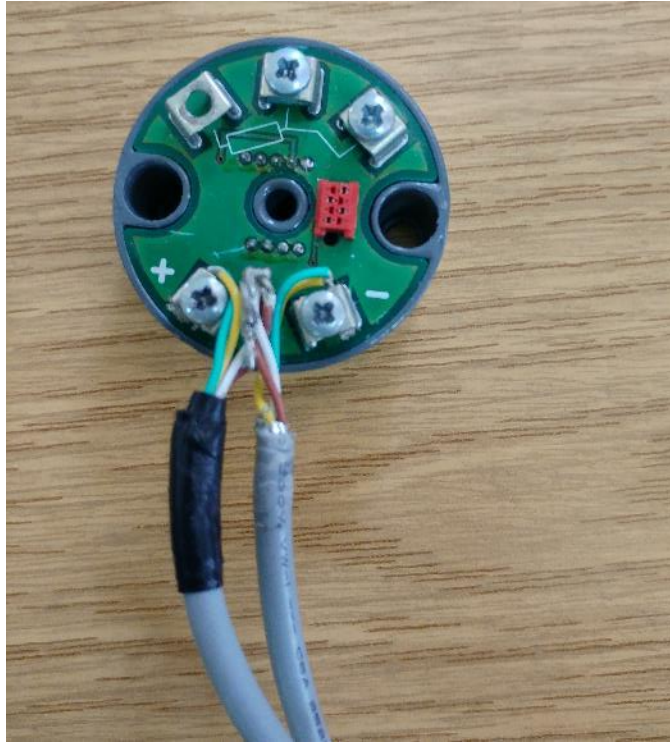
*Ilustración 2: Proceso de soldadura de terminales.*

### 3.3.4 INSTALACIÓN CONVERTIDORES DE TEMPERATURAS.

Se instalaron tres convertidores de temperatura cuyo objetivo era convertir una temperatura obtenida por las termo-resistencias PT100 en una señal de tensión continua. En la puesta en funcionamiento de estos dispositivos surgió un problema, uno de los convertidores no mostraba la temperatura en el display apareciendo una serie de líneas discontinuas. Tras verificar que no era fallo del display procedimos a desmontar el convertidor realizando las siguientes comprobaciones:

- ✓ No continuidad entre positivo y masa del cable BNC asegurando así la no existencia de algún tipo de cortocircuito.
- ✓ Continuidad entre los hilos de las termo-resistencias PT100, entre el convertidor y sus terminales.

- ✓ Alimentación del convertidor.
- ✓ Aplicación de una señal continua mediante una fuente de tensión para conocer la respuesta del convertidor.



*Ilustración 3: Convertidor de temperaturas.*

**Conclusión:** el convertidor no funcionaba correctamente. No mostraba la temperatura deseada.

**Solución:** adquisición de un nuevo convertidor con las mismas prestaciones.

### 3.3.5 INSTALACIÓN CARGA ELECTRÓNICA Y VATÍMETRO.

El siguiente paso por dar fue la instalación de la carga electrónica (Agilent N3300A) y del vatímetro (LMG 450), el proceso llevado a cabo en ambos fue el siguiente:

- ✓ Lectura del manual de usuario de los dos dispositivos.
- ✓ Configuración de los dispositivos según nuestras necesidades.
- ✓ Comprobación del funcionamiento de canales y pinzas.
- ✓ Medición de magnitudes mediante el uso del polímetro y comparación con las mostradas por los dispositivos.
- ✓ Puesta en funcionamiento.



### 3.3.5.1 PROBLEMA CON LA CARGA ELECTRÓNICA.

Aparecen una serie de inconvenientes a la hora de utilizar la carga electrónica. Cuando se quiere establecer las condiciones nominales del generador 400 rpm y 7,73 A se produce un pico de intensidad en la carga electrónica que provoca la activación de las protecciones del servomotor. Se realiza el siguiente análisis para determinar las causas de este comportamiento:

1. Se mide la tensión, mediante el polímetro, en los canales de salida en la que hemos conectado la señal de la carga electrónica en este caso estaba conectado en la salida DAC7, se obtiene un valor de 11,60 V que provienen de la tarjeta dSpace cuando ésta se conecta a la red. Debido a que se da ese valor de tensión y que el sistema solo admite valores de más menos 10 V es normal el comportamiento de la carga electrónica pero no conocemos el origen de esta tensión.
2. Prueba I: cambio de canal, con el correspondiente cambio en el software de simulink, en este caso utilizaremos el DAC3. Se mide la tensión del canal con el polímetro siendo 0 V. Me dispongo a establecer las condiciones nominales del generador consiguiendo alcanzar los valores anteriormente mencionados, pero a la hora de disminuir la señal de carga electrónica ésta se dispara produciendo otro pico y haciendo actuar a las protecciones del servomotor.
3. Prueba II: repito el procedimiento anterior, pero en este caso bajo primero la señal de velocidad del unidrive sin que se activen las protecciones del servomotor.

**Conclusión:** se piensa que puede existir algún tipo de problema en el sistema de adquisición de datos debido al inexplicable valor que se genera en alguno de los canales de salida.

**Solución:** apertura del bloque de canales del sistema de adquisición de datos, dicho trabajo se realizará una vez finalizado el presente trabajo fin de grado. Desarrollaremos el trabajo mediante las entradas/salidas, que tras las comprobaciones que se realizan a continuación, estén en disposición de ser usadas.

### 3.3.5.2 COMPROBACIÓN CANALES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Debido a la incoherencia de algunas de las magnitudes mostradas por pantalla a través de la aplicación ControlDesk, se decidió comprobar y verificar el correcto funcionamiento de los canales analógicos-digitales de la tarjeta de adquisición de

datos DS1103. Para ello se dispuso de una fuente de tensión continua que emitía una señal constante.



Ilustración 4: Bloque sistema de adquisición de datos.

Mediante un cable BNC conectado a la fuente de tensión se aplicó una señal de 5V para ello se creó una rutina (layout) específica para realizar dicha comprobación así como un archivo .mdl (simulink) que nos permitiera ejecutar la aplicación en Control Desk.

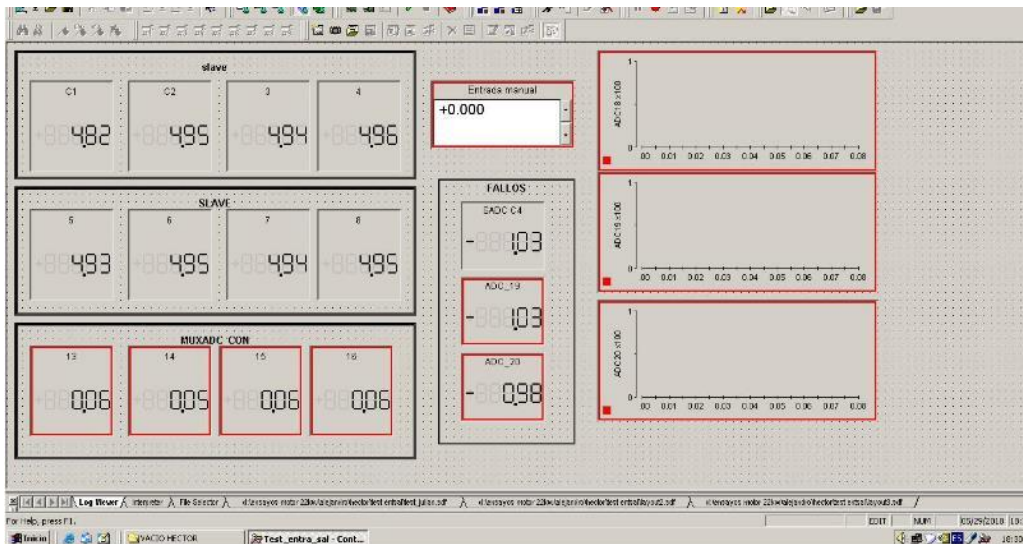


Ilustración 5: Layout de comprobación de entradas y salidas.

Tras realizar dicha comprobación llegamos a la conclusión que las salidas ADC19, SADC4 y MUXADC10 se comportaban de manera incoherente mostrando por



pantalla datos diferentes a las de otras salidas por lo que podemos afirmar que esas salidas estaban defectuosas por lo que evitaremos posteriormente su uso.

### **3.3.6 IDENTIFICACIÓN DE CANALES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

La tarjeta de adquisición de datos modelo DS1103 consta de una serie de canales que permiten la adquisición de los datos de los diferentes sensores que posee el banco de ensayos mediante una transformación analógica-digital, todo esto se recoge en una caja física con los siguientes canales que se muestran en la siguiente tabla.

Con el objeto de esclarecer los datos que adquiere cada canal para mostrarlo por pantalla se han identificado cada uno de estos canales que nos permitirán, a través de la aplicación de ControlDesk, visualizar cada uno de los parámetros que posee el banco de ensayo.

Los canales de entrada multiplexados funcionan en un rango que va desde los -10 V hasta los 10 V, mientras que las entradas esclavo poseen un rango de acción de 0V a 5V.



Ent/Sal	Función	Tipo	Nº	Descripción
ENTRADAS	CONTROL UNIDRIVE	MUXADC	1	RPM EJE
			2	SEÑAL PAR UNIDRIVE
			3	SEÑAL RPM UNIDRIVE
			4	SEÑAL PAR TRANSDUCTOR
ENTRADAS	TENSIONES	MUXADC	5	SONDA DE TENSIÓN U
			6	SONDA DE TENSIÓN V
			7	FUNCIONAMIENTO INCORRECTO
			8	SONDA TENSIÓN RECTIFICADA
ENTRADAS	CORRIENTES	MUXADC	9	SONDA DE CORRIENTE U
			10	NO FUNCIONA
			11	SONDA DE CORRIENTE V
			12	SONDA DE CORRIENTE W
ENTRADAS	VATÍMETRO	MUXADC	13	POTENCIA ACTIVA
			14	POTENCIA REACTIVA
			15	POTENCIA APARENTE
			16	FACTOR DE POTENCIA
SALIDAS	SALIDAS CONTROL	DAC	1	SEÑAL VELOCIDAD UNIDRIVE
			2	CONTROL PAR UNIDRIVE
			3	CONTROL CARGA ELECTRÓNICA
			4	
			5	
			6	
			7	
			8	

Tabla 1: Descripción de las entradas y salidas del bloque de adquisición de datos.





Ent/Sal	Función	Tipo	Nº	Descripción
ENTRADAS	SONDAS	ADC	17	SONDA DE CORR. RECTIFICADA
			18	SONDA DE TENSIÓN W
			19	NO FUNCIONA
			20	
ENTRADAS	TEMPERATU.	SADC	1	TEMPERATURA BOBINADO
			2	TEMPERATURA ESTATOR
			3	TEMPERATURA CARCASA
			4	NO FUNCIONA
ENTRADAS		SADC	5	
			6	
			7	
			8	
ENTRADAS		SADC	9	
			10	
			11	
			12	
ENTRADAS		SADC	13	
			14	
			15	
			16	

Tabla 2: Descripción de las entradas y salidas del sistema de adquisición de datos.

Muchas de las entradas SADC no ha sido utilizadas eso no quiere decir que no funcionen ya que se comprobó su correcto funcionamiento, así como con las salidas pasa algo parecido. Las entradas que no se comportaban de forma correcta están anotadas en la tabla anterior con el fin de arreglarse en un futuro próximo.



### 3.3.7 PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LAS SONDAS DE CORRIENTE.

Se procedió a la instalación e incorporación de las sondas de corriente con fuentes de alimentación externa al banco de ensayos con el propósito de medir las corrientes del generador objeto de estudio.

En un primer intento de la puesta de funcionamiento de las sondas amperimétricas se observó un calentamiento excesivo en la zona central-inferior de las sondas, además el valor que mostraba por pantalla era incoherente ya que se comparó con la ofrecida con el polímetro y no coincidían.

Para averiguar el origen del problema de las sondas se realizó las siguientes comprobaciones y/o análisis:

1. En un primer momento, se comprobó que el calentamiento de la sonda no era producido por la fuente de alimentación exterior, debido a que sólo conectando la alimentación no se calentaba. El cable BNC de adquisición de datos lo habíamos desconectado.
2. Se verificó la correcta operabilidad de los canales de entrada/salida del sistema de adquisición de datos.
3. Se procedió a la apertura de las sondas para examinar los elementos y comprobar que ninguno de ellos estaba quemado debido al exceso de temperatura al que habían sido sometidos.
  - a. Se realizó el montaje de la sonda y se conectó a un canal diferente al que estaba conectado en un principio (SADC). Se observó lo siguiente:
    - i. No calentamiento en exceso.
    - ii. En el software de simulink se aplicó una ganancia de 1 siendo el valor mostrado por pantalla inestable y tardaba en alcanzar el valor relativamente poco.
    - iii. Se cambió la ganancia a 5 siendo la adquisición de datos lenta.
    - iv. Ganancia 2: adquisición de datos lenta.
    - v. En todos los casos valores incoherentes.





*Ilustración 6: Circuito integrado de una sonda de corriente.*

4. Se realizó la identificación de cada terminal en el bloque de canales del sistema de adquisición de datos.
5. Se midió continuidad en los conectores tipo BNC para confirmar su correcto funcionamiento, así como en los conectores tipo hembra BNC de la caja del sistema de adquisición de datos.
6. Se conectó la sonda en otros canales con la intención de descartar el incorrecto funcionamiento del canal en el cual estaba conectado en un principio.
7. Se constató el buen funcionamiento de las sondas midiendo un valor conocido (procedente del vatímetro) y conectándolo al polímetro para verificar su correcto funcionamiento.



*Ilustración 7: Comprobación del funcionamiento de la sonda de corriente.*

**Conclusión:** Tras realizar el análisis anterior se llega a la conclusión que el problema en un primer momento era de software ya que los datos visualizados eran incoherentes además el valor mostrado por pantalla tardaba mucho en estabilizarse.

**Solución:** Se solucionó añadiendo al bloque RMS una señal de frecuencia dividiendo el sumatorio de señales obtenidas y actualizándose rápidamente el valor.

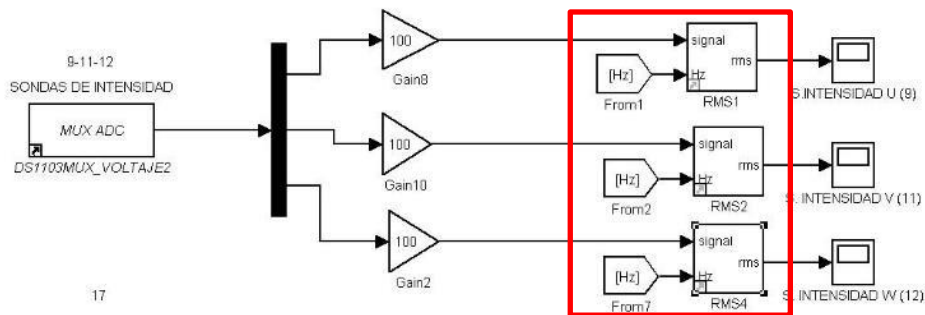


Ilustración 8: Programación de las sondas de corriente en Simulink.

En rojo se señala el bloque RMS con la señal de frecuencia.

### 3.3.7.1 FUNCIONAMIENTO BLOQUE RMS.

Matemáticamente hablando el valor RMS es la media cuadrática o valor medio cuadrático la cual es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Se rige por la siguiente ecuación:

$$y_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M u_{ij}^2}{M}}$$

Ecuación 1: Valor eficaz.

Siendo “u” los valores obtenidos mediante el sistema de adquisición de datos y “M” la frecuencia de giro del generador, de esta forma se divide la expresión progresivamente. A diferencia de lo anterior, que solo utilizaba el sumatorio y realizaba la raíz cuadrada.

### 3.3.7.2 PROBLEMAS CON LAS SONDAS DE INTENSIDAD.

Nuevamente se detectaron problemas con las sondas de intensidad, se observó un nuevo calentamiento en la misma zona que anteriormente había aparecido.

Una de las posibles causas antes de realizar un análisis o prueba es la de la existencia de una derivación con otros canales de entrada o salida del sistema de adquisición de datos.

Con el fin de constatar el origen de ese nuevo calentamiento se inició un nuevo análisis o serie de pruebas:

1. Se conectó una de las sondas de intensidad, hay que recordar que estas sondas son alimentadas a través de una fuente externa la cual transforma



un voltaje de 220 V (la obtiene de la red) en alterna a 12 V en continua, a uno de los canales de entrada multiplexados analógico-digital, en este caso el 9. Previamente se habían desconectado todos los conectores tipo BNC de la caja de adquisición de datos. En este punto se procedió a conectar nuevamente los conectores tipo BNC a los canales de entrada/salida del sistema de adquisición de datos con el objeto de localizar cuál de ellos generaba el calentamiento. Se observó el siguiente comportamiento:

- a. Se conectó MUXADC: 1, 2, 4 → No calentamiento.
- b. Se conectó DAC: 1, 2, 7 → No calentamiento.
- c. Se conectó MUXADC: 5, 6, 7, 8 → Calentamiento ligero tras 7 min. aproximadamente. Calentamiento notable tras 10 min.
- d. En principio el problema radicaba en el multiplexor de entrada analógico-digital numerado con 5, 6, 7, 8 donde estaban situadas las sondas de tensión con fuente de alimentación externa. Una vez localizado el problema se trató de concretar en cuál de los canales del multiplexor se encontraba el problema, se realizó el siguiente procedimiento:
  - i. Se desconectaron los canales MUXADC 5 y 6 quedando solo conectados MUXADC 7 y 8 → Calentamiento notable tras pocos minutos de conexión.
  - ii. Se conectaron MUXADC 5 y 6 únicamente → Calentamiento notable tras pocos minutos de conexión.
  - iii. Análisis canal a canal del multiplexor 5, 6, 7, 8:
    1. MUXADC5 → Temperatura elevada.
    2. MUXADC6 → Temperatura elevada.
    3. MUXADC7 → Temperatura elevada.
    4. MUXADC8 → Temperatura elevada.
  - iv. Se calienta en el multiplexor analógico-digital con los canales 5, 6, 7, 8. No se descarta un calentamiento en el resto de los canales.

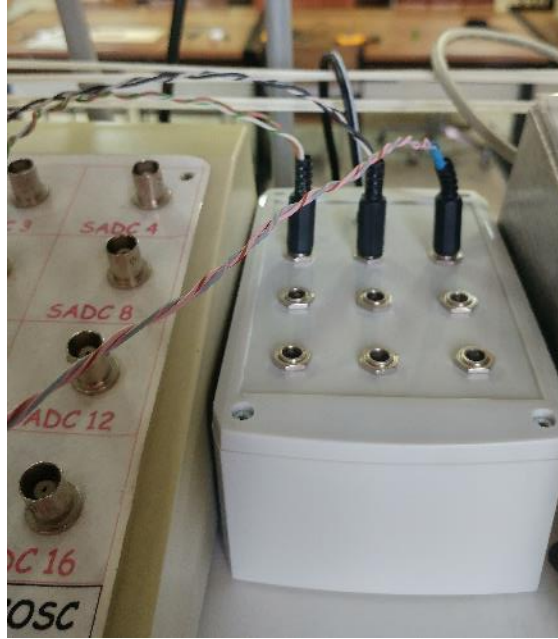


Ilustración 9: Fuente de alimentación externa.

**Conclusión:** tras la realización de las pruebas anteriormente descritas se llegó a la conclusión de que el calentamiento sólo aparecía con las sondas de tensión conectadas a través de la fuente de alimentación externa siempre y cuando también se conectarán las sondas de corriente desde la misma alimentación que las anteriores sondas. En el banco de adquisición de datos donde se encontraban todos los canales el negativo(masa) era común a todos, al conectar los datos de las sondas y su alimentación a la fuente forzábamos a que todo ello fuese común provocando una realimentación en las sondas de intensidad que hacía circular una intensidad elevada produciendo así un aumento de la temperatura en la circuitería de dichas sondas que incluso podría llegar a quemar el dispositivo si el tiempo de conexión era excesivo.

**Solución:** la alimentación de las sondas de corriente se realizó a través de una pequeña batería recargable evitando así los problemas descritos anteriormente.

### 3.3.8 COMPROBACIÓN DE LOS CANALES QUE NO FUNCIONABAN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Una vez encontrada la solución al problema del calentamiento de las sondas de intensidad procedimos a comprobar nuevamente los canales de entrada del sistema de adquisición de datos que no funcionaban correctamente. Realizamos los cambios oportunos descritos anteriormente. Hay que recordar que las entradas defectuosas eran MUXADC10, ADC19 y SADC4.



Procedimiento: alimentamos con una fuente de tensión continua las entradas/salidas que habíamos identificado como defectuosas comprobando que los datos coincidían con los proporcionados por la fuente. En este caso no se correspondían ambos valores.

Conclusión: los canales nombrados anteriormente estaban defectuosos por otras causas en las que se cree que sean las conexiones del bloque del sistema de adquisición de datos.

### 3.3.9 PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LAS SONDAS DE TENSIÓN.

Las sondas de tensión que recogían los datos de tensiones del generador funcionaban correctamente. Éstas estaban conectadas entre fases a la salida del generador.

Una de las sondas atenuadoras de la tensión procedente del rectificador mostraba un valor incoherente por pantalla, para descartar que el origen del problema era el canal al que estaba conectado se cambió de canal obteniéndose idénticos resultados.

Se procedió a extraer la sonda y realizar las siguientes comprobaciones:

1. Se aplicó una señal continua para conocer el valor de atenuación que presentaba mediante la medición con polímetro. No se obtuvo ningún valor por el display del polímetro.
2. Comprobación mediante el osciloscopio.

Conclusión: tras las comprobaciones anteriores podemos deducir que algunas sondas sólo pueden detectar la corriente alterna, de modo que, si hay que medir también la corriente continua (como es el caso), será necesaria una sonda de corriente CA/CC.

Solución: diseño de un atenuador que disminuya la tensión en el rectificador a valores inferiores dentro del rango con el que trabaja el bloque de adquisición de datos [-10 V, +10 V].

#### 3.3.9.1 DISEÑO DEL ATENUADOR.

Con el objetivo explicado anteriormente se ha diseñado un atenuador, que no es más que un divisor de tensión el cual consta de 10 resistencias en serie de igual valor por lo que la caída de tensión en cada resistencia es una décima parte de la total.

La tensión máxima del rectificador es de aproximadamente 55 V que se han tomado para realizar el diseño. Para que la corriente del atenuador no sea excesivamente alta y no dé lugar a calentamientos del conductor elevados el valor asignado a cada resistencia es de 1000 Ohmios con una tolerancia del 5% lo que supone una muy buena atenuación.

Para corroborar que es correcta la atenuación se ha comprobado con dos polímetros; uno que mida la tensión total del rectificador y otra la de una de las resistencias. En esta resistencia se conectará el conector tipo BNC que enviará la señal al bloque de entrada del sistema de adquisición de datos.

Además, previamente, el atenuador se ha diseñado mediante el software de LTspice IV. Se ha simulado su comportamiento con correctos resultados.

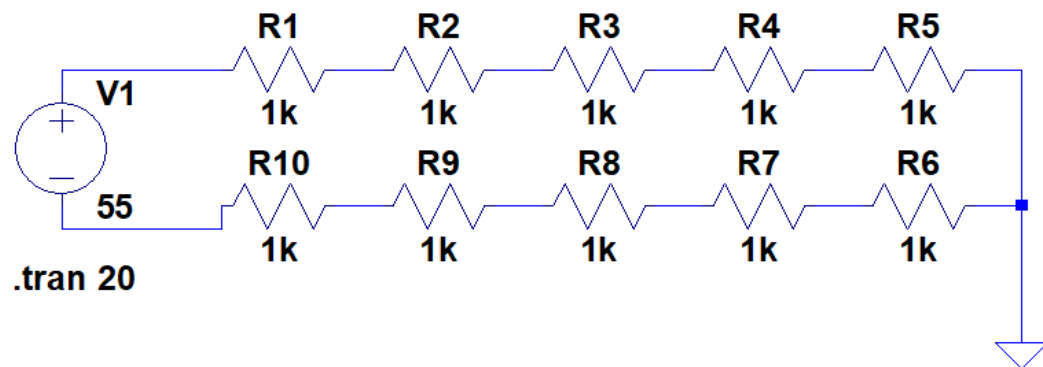


Ilustración 10: Diseño del atenuador mediante LTspice IV.

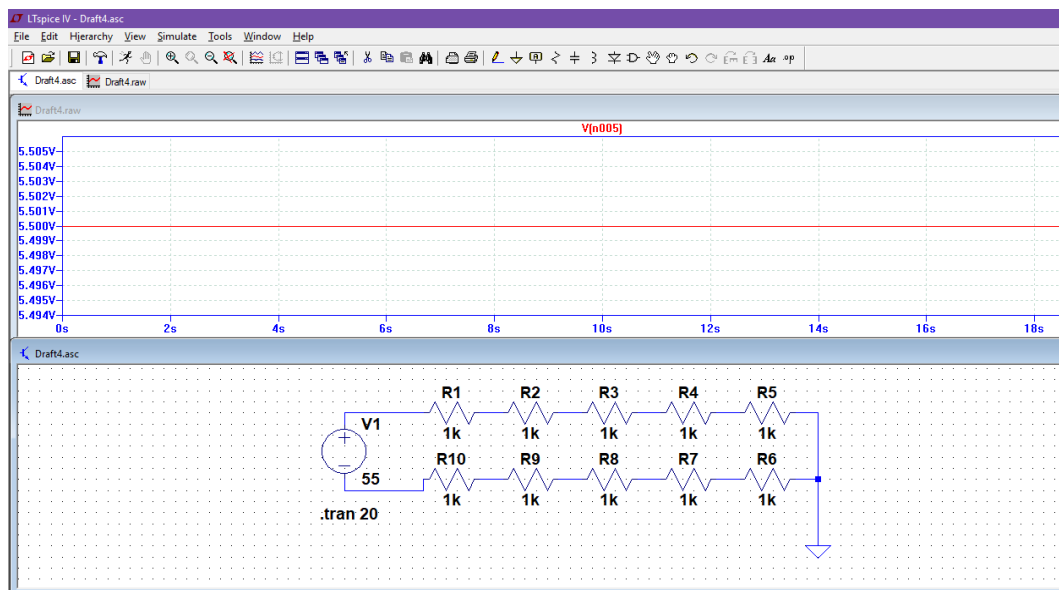
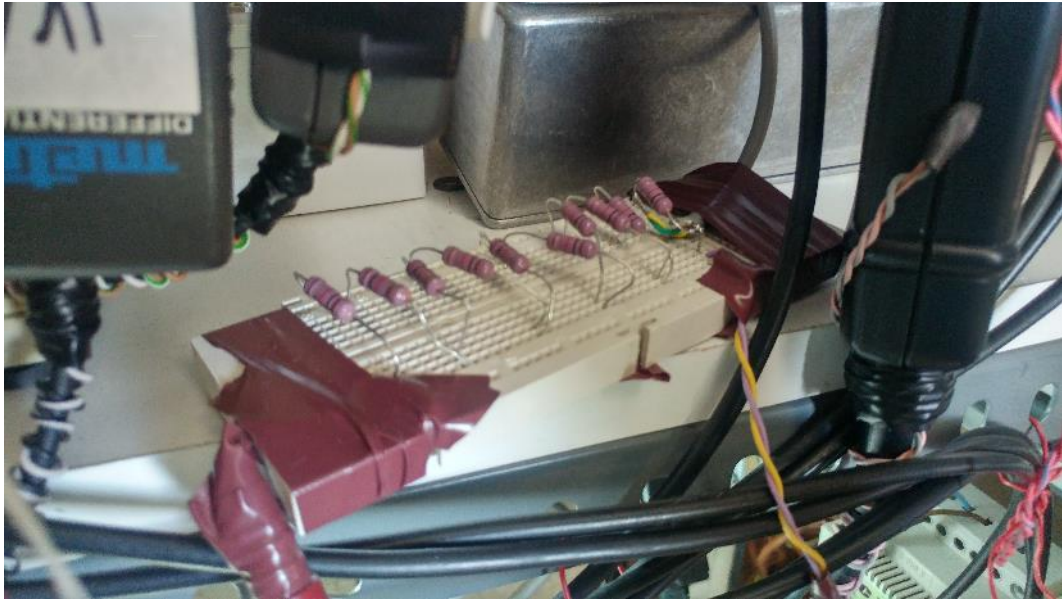


Ilustración 11: Simulación del funcionamiento del atenuador mediante LTspice IV.





*Ilustración 12: Atenuador de tensión.*





## 4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.

A continuación, se describirán las características principales de los equipos utilizados.

### 4.1 MOTOR DE ARRASTRE.

Es el elemento que nos permite realizar los ensayos dotando al generador, objeto de estudio, de velocidad angular y par. Simula el comportamiento del viento o de otro elemento capaz de transmitirle las magnitudes anteriormente mencionadas. Dispone de los siguientes componentes:

- ✓ Servomotor Unimotor modelo 190UMD200HACAA.
- ✓ Variador UNI3403 (22 kW).

#### 4.1.1 SERVOMOTOR.

Motor síncrono trifásico tipo “brushless” sin escobillas de 8 polos de imanes permanentes. Poseen una fuerza contraelectromotriz senoidal, suministrando un gran par con un par de rizado mínimo. Posee un encoder incremental (4096 ppr) y termistores PTC.

Trasfiere la energía necesaria al generador proporcionando par y velocidad de giro entre otros.

Las características más destacables de este tipo de motores se muestran en la siguiente tabla:

SERVOMOTOR 190UMD200HACAA	
Potencia Nominal (kW)	11.46
Par nominal (Nm)	54.7
Par a rotor bloqueado (Nm)	73.2
Par de pico (Nm)	219.6
Velocidad de rotación nominal (r.p.m.)	2000
Peso (kg)	48
R fase-fase ( $\Omega$ )	0.24

L fase-fase (mH)	4.10
------------------	------

Tabla 3: Características servomotor 190UMD200HACAA.



Ilustración 13: Servomotor 190UMD200HACAA.

#### 4.1.2 VARIADOR UNI3403 (22 KW).

Permite el control del servomotor ajustando, mediante la interfaz de ControlDesk, en todo momento el par y la velocidad.

Entre sus características podemos destacar:

- ✓ Accionamiento universal de velocidad variable que puede operar en cinco modos: control tensión-frecuencia, control vectorial de lazo abierto, control vectorial de lazo cerrado, servo brushless AC y unidad regenerativa.
- ✓ Posee conjuntos de parámetros de aplicación preconfigurados, denominados Macros, que permiten una configuración del accionamiento en pocos minutos.

VARIADOR UNI3403 (22 kW)	
Potencia Nominal (kW)	22
Intensidad nominal (A)	46
Intensidad de pico para 4 s (A)	81.2
Sobreintensidad para 60 s (A)	68.5

Consumo de intensidad (A)	49
---------------------------	----

Tabla 4: Características variador UNI3403 (22kW).



Ilustración 14: Variador UNI3403 (22kW).

## 4.2 MEDIDOR DE PAR (LEBOW).

Este tipo de transductores miden la fuerza de torsión a la que se somete un eje durante las diferentes fases de su funcionamiento, bien sea en arranque, dinámico o parada. Se ensaya y estudia su comportamiento en los generadores de los que disponemos para este trabajo fin de grado.

Situado entre el generador y el motor de arrastre, consiste en un eje con unos sensores de par alineados, situado entre la fuente de potencia y la carga. Estos sensores miden la torsión que se produce en el eje a causa de las dos fuerzas que, en sentido contrario y separadas una determinada distancia, se establecen entre la carga y la fuente de potencia.



Los sensores de par están formados por galgas extensiométricas; que consisten en unas láminas metálicas que se deforman de la misma el eje. La resistencia eléctrica de la galga es proporcional a su deformación y por lo tanto a la carga del eje.

En definitiva, el transductor de par proporciona una variación mecánica en una eléctrica, en este caso una torsión se traduce en una variación de voltaje.

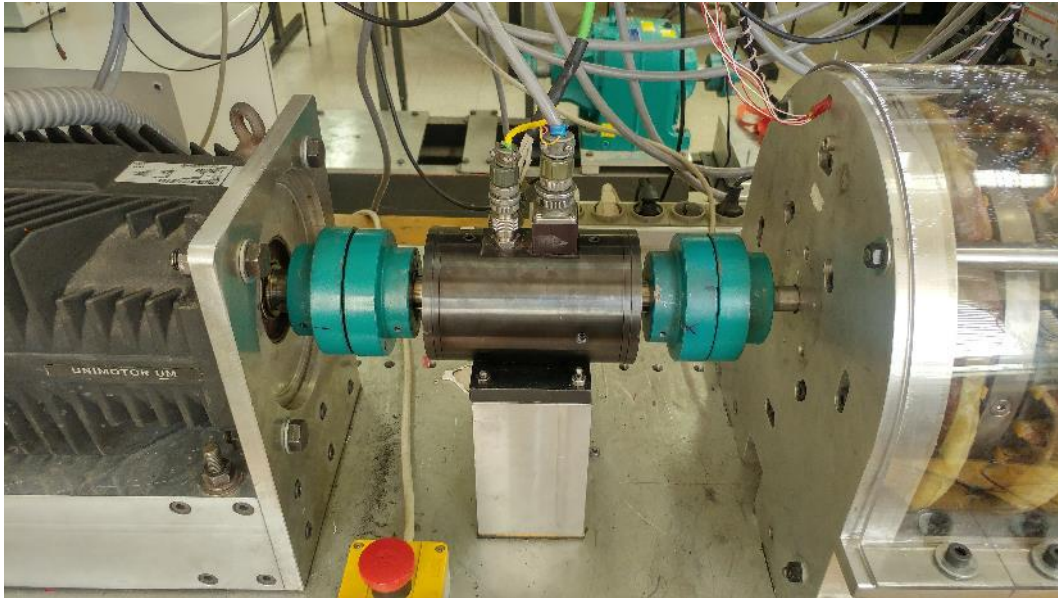
Además, dispone de un amplificador digital Daytronic 3278-F que permite visualizar el par en todo momento.

A través de dos salidas conectadas al medidor de par se puede conocer el par mecánico y la velocidad a la que trabaja. A demás, conocidos el número de revoluciones y el par, este dispositivo, nos permite conocer la potencia mecánica aplicada al generador.

Entre las características más destacables:

MEDIDOR DE PAR LEBOW.	
Modelo.	1804-155 N. M.
Capacidad nominal (Nm).	155
Sensor de señal.	Puente de galgas extensiométricas con 4 brazos.
Resistencia del puente ( $\Omega$ ).	350 nominal.
RPM.	27000.

Tabla 5: Características medidor de par Lebow.



*Ilustración 15: Medidor de par Lebow.*

### **4.3 EQUIPO ADICIONAL.**

Con el fin de realizar los ensayos, se dota al banco dinamométrico de un equipo adicional provisto de los siguientes elementos:

- ✓ Rectificador.
- ✓ Carga electrónica.

Concretamente se usa en el ensayo de carga. Exigiremos unas determinadas condiciones a la carga electrónica para conocer el comportamiento del generador a ensayar. Mediante la aplicación ControlDesk seremos capaces de variar la carga obteniendo diferentes resultados en el comportamiento del generador. En principio las condiciones que se han establecido son las nominales.

#### **4.3.1 RECTIFICADOR.**

Se basa en un convertidor de potencia de 20 kVA. Formado por un puente rectificador de trifásico de diodos, un puente trifásico de IGBTs y un “brake chopper”. Diseñado para proporcionar como máximo 30 A por fase.

Provisto de conectores tipo banana para conectar la carga. Además, se ha conectado el atenuador diseñado a los terminales tipo banana para mandar la señal.

Los componentes principales del rectificador son los siguientes:



COMPONENTES PRINCIPALES DEL RECTIFICADOR.
3 módulos SKM50GB123D.
1 IGBT brake chopper SKM 50GAL123D.
Puente rectificador trifásico de diodos SKD51/14.
Fuente de alimentación modelo D503.
Interruptores térmicos y demás protecciones.

Tabla 6: Componentes principales del rectificador.

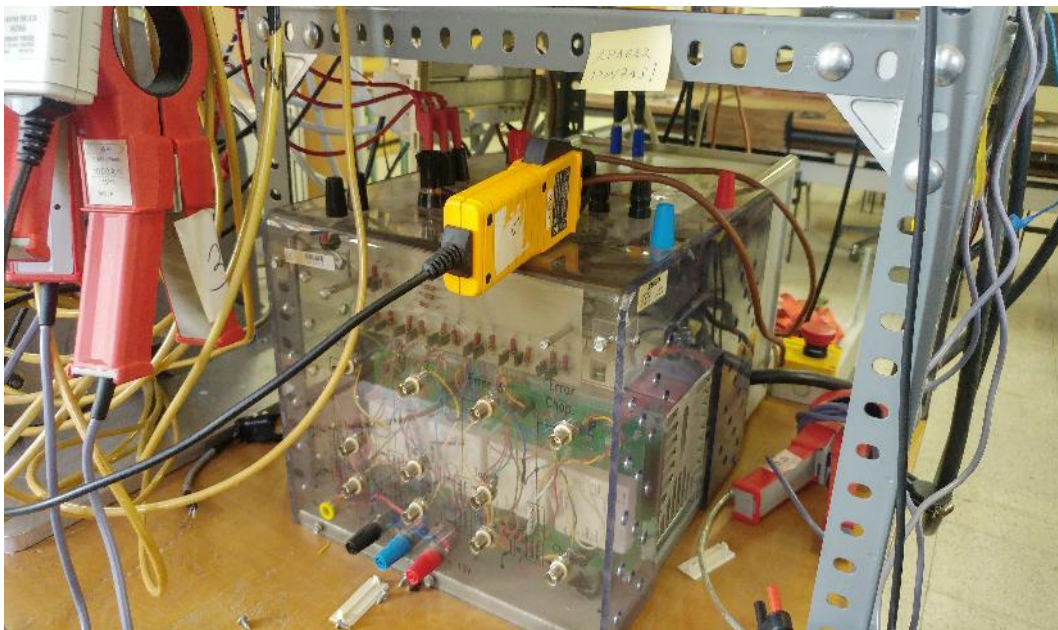


Ilustración 16: Rectificador.

#### 4.3.2 CARGA ELECTRÓNICA.

Con este dispositivo se intenta simular el comportamiento de una carga que es alimentada por nuestro generador. Se adapta con bastante precisión debido a que es muy útil en el banco de ensayos de pequeña potencia, simulando una carga doméstica.

La carga electrónica es de corriente continua con capacidad para 1800W, a través de tres módulos de 600 W que pueden trabajar independientemente o en conjunto. El rango de cada uno de los módulos de 600 W es de 120 A y 60 V.

Entre las características principales se encuentran las siguientes:



CARGA ELECTRÓNICA.	
Fabricante.	Agilent Technologies.
Modelo.	HP N3300A.
Modelo módulo.	N3306A.
Operación estable hasta tensiones de 0 V.	
Control y monitorización de corriente, voltaje y resistencia.	
Incorpora la generación de la forma de ondas de pulsos.	
Protección frente a corrientes, tensiones y temperaturas elevadas.	
Calibración electrónica.	
Posibilidad de conectar varias unidades en paralelo.	

Tabla 7: Características carga electrónica HP N3300A.

#### 4.3.3 CONFIGURACIÓN CARGA ELECTRÓNICA.

El sistema de carga electrónica posee tres modos de funcionamiento: corriente constante, voltaje constante y resistencia constante. Lo hemos configurado a corriente constante.

Con esta configuración, el módulo introduce una corriente de acuerdo con los valores programados.

Mediante la aplicación ControlDesk controlamos la intensidad de la carga y por tanto las prestaciones del generador para alimentarla. También se puede programar

Programación del modo corriente constante (manual).

- ✓ Activamos la entrada de modo corriente constante.
- ✓ En el teclado numérico presionamos la tecla Channel buscando el canal 1.
- ✓ En el teclado presionar la tecla Input On/Off para activar la entrada. (Dis).
- ✓ Nuevamente en el teclado, apretar la tecla Func. Presionar la entrada arriba/abajo hasta que aparezca la función corriente, luego presionar Enter.
- ✓ Apretar el botón Current del teclado. Apretar arriba hasta que current aparezca en el display.
- ✓ Introducir el valor deseado (1.25).

- ✓ Volver a presionar Current. Debemos conseguir que aparezca current slew en el display mediante la tecla arriba.
- ✓ Introducir el valor deseado (30000).
- ✓ Pulsar current, presionar arriba hasta que veamos current transient.
- ✓ En el teclado apretar 2 y Enter.
- ✓ Para hacer cambios presionar Current.



*Ilustración 17: Carga electrónica HP N3300A.*

#### **4.4 MULTIPLICADORA.**

La multiplicadora es la encargada de convertir las bajas revoluciones por minuto que trasmite el buje en altas revoluciones por minuto. Consta de una serie de engranajes de varias etapas que aumentan la velocidad del eje que une el eje de salida de la multiplicadora con el eje del generador.

Este componente supone una gran pérdida de rendimiento.

La multiplicadora utilizada es de la marca Brook Hausen tipo SFN44B con una relación de 8/1.

Entre las funciones de este elemento destacamos las siguientes:

- ✓ Transmitir la potencia de giro del rotor al generador para producir energía.
- ✓ Convierte el par de fuerza del rotor en revoluciones.
- ✓ Multiplica las revoluciones dependiendo del diámetro de rotor. Mayor diámetro de rotor igual a mayor ratio de transformación.





El objetivo con el que se instala este elemento mecánico no es más que el poder controlar de una forma más fiable el par residual que presenta el motor. Se colocará entre el medidor de par y el generador, proporcionando al generador un aumento en la velocidad de giro.



*Ilustración 18: Multiplicadora SFN44B.*





## 5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

A continuación, explicaremos los instrumentos utilizados para realizar las medidas, posteriormente detallaremos como a través de estos instrumentos se realiza la adquisición de los datos.

### 5.1 SONDAS DE TENSIÓN.

Utilizaremos tres sondas de tensión diferencial DP 25 de la marca Chauvin Arnoux que nos permite, entre otras cosas, obtener mediciones flotantes.

Convierte alta tensión diferencial de entrada ( $\leq 1300$  V pico) en baja tensión ( $\leq 6,5$  V) referenciada a tierra para visualizar por pantalla.

La salida BNC de la sonda está prevista para funcionar en una entrada de impedancia  $1\text{ M}\Omega$ .

Nos permite visualizar el valor instantáneo medido en tiempo real a través de la pantalla de la aplicación de ControlDesk realizando las oportunas conversiones.

Se pueden distinguir las siguientes características:

SONDAS DE TENSIÓN.	
Fabricante.	Chauvin Arnoux.
Modelo.	DP 25.
Gammas de tensión de entrada. (DC + AC pico/pico).	$\leq \pm 140$ para x20 (sea alrededor 50 Vrms, ó DC).
	$\leq \pm 350$ para x50 (sea alrededor 125 Vrms, ó DC).
	$\leq \pm 1300$ para x200 (sea alrededor 460 Vrms, ó DC).
Tensiones de entrada máximas admisibles.	Tensión máx. diferencial: 1000 V RMS.
	Tensión máx. entre cada borne de entrada y masa: 600V RMS.
Impedancia de entrada (INPUT).	Diferencial: $4\text{M}\Omega / 1.2\text{ pF}$
	Entre borne y masa: $2\text{M}\Omega / 2.3\text{ pF}$
Tensión de salida.	$\leq \pm 6.5$ V.



Impedancia de salida.	1 MΩ.
-----------------------	-------

Tabla 8: Características sondas de tensión DP 25.

### 5.1.1 PROCEDIMIENTO DE UTILIZACIÓN.

1. Conectar los cables a la entrada (INPUT) y colocar los hilos grapa sobre el circuito que se ha de controlar.
2. Conectar la sonda al bloque del sistema de adquisición de datos mediante el cable BNC.
3. Seleccionar la relación de atenuación.

### 5.1.2 RELACIÓN DE ATENUACIÓN.

Con el propósito de visualizar la medida real de las sondas de tensión, a través de la pantalla del ordenador, es aconsejable realizar una serie de conversiones.

Esta conversión o factor deberá aplicar en el lenguaje de programación de bloque de simulink a través de una ganancia, se realizarán las siguientes conversiones:

Escala entre la ent/sal de voltaje analógica del bloque de simulink.		Factor por compensar.
Rango del voltaje de entrada.	Salida Simulink.	
-10 V ..... +10 V	-1 V ..... +1 V	10
Sonda atenuación.		
Atenúa entre 20		20
<i>Total.</i>		20 x 10 =200

Tabla 9: Relación de atenuación sondas de tensión.

## 5.2 SONDAS DE CORRIENTE.

Daremos uso a cuatro pinzas amperimétricas modelo HZ56-2 de la marca HAMEG para CA/CD diseñadas para ofrecer medidas exactas y no intrusivas tanto de CA/CD como de corrientes de formas de ondas complejas. Basadas en la tecnología de efecto Hall, pueden medir corrientes de manera exacta con una resolución de 1 mA entre 5 mA y 30 A.



Al igual que las sondas de tensión, las pinzas nos proporcionan los valores medidos por lo que también están dotados de cableado tipo BNC para transmitir las señales al sistema de adquisición de datos y poder visualizar los resultados. Datos técnicos:

SONDAS DE CORRIENTE.	
Fabricante.	HAMEG.
Modelo.	HZ56-2.
Margen de corriente.	20 A (AC rms) o DC.
Margen de medición.	$\pm 30$ A.
Capacidad de sobrecarga.	500 A.
Sensibilidad de salida.	100 mV/A.
Exactitud (a 25 °C).	$\pm 1$ % de la lectura $\pm 2$ mA.
Impedancia de carga.	$>100$ k $\Omega$ $\leq$ 100 pF.
Margen de frecuencia.	DC a 100 kHz (0.5 dB).
Voltaje de operación.	300 V <sub>AC</sub> eff o DC.

Tabla 10: Características sondas de corriente HZ56-2.

### 5.2.1 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN Y AJUSTE DEL CERO.

Ajuste del cero.

Lo más importante en este tipo de sondas es ajustar el cero de esta manera realizaremos las medidas correctamente.

La indicación de voltaje cero en la salida de la sonda puede variar debido a corrimientos térmicos y otras condiciones ambientales. Para ajustar el voltaje de salida a cero, se presionará la ruedecilla y se girará asegurándose de que mientras se realiza el ajuste se encuentre alejada del conductor que transporta la corriente.

Medición de corriente.

1. Encender la sonda mediante el interruptor cerciorándose de que el LED este iluminando.
2. Conectar el cable de salida al bloque del sistema de adquisición de datos.
3. Si fuese necesario ajustar el cero.
4. Fijar la mordaza alrededor del conductor.



5. Observar y tomar las mediciones de manera requerida. Una salida positiva indica que el flujo de la corriente es en la dirección mostrada por la flecha de la sonda.

### 5.2.2 RELACIÓN DE ATENUACIÓN.

Como en las sondas de tensión, en las sondas de corriente hay que aplicar un factor:

Escala entre la ent/sal de voltaje analógica del bloque de simulink.		Factor por compensar.
Rango del voltaje de entrada.	Salida Simulink.	
-10 V ..... +10 V	-1 V ..... +1 V	10
Sonda atenuación.		
100 mV ..... 1 A		10
<i>Total.</i>		10 x 10 =100

Tabla 11: Relación de atenuación sondas de corriente.

NOTA IMPORTANTE: las sondas de corriente están alimentadas por una pila recargable de nueve voltios. Estas pinzas no se apagan automáticamente después de unos minutos por lo que conviene apagarlas inmediatamente después de su uso evitando así el consumo innecesario.

### 5.3 SONDAS DE TEMPERATURA.

El sistema de temperaturas necesario para captar los datos del presente estudio consta de los siguientes elementos.

- ✓ Termo-resistencias PT100.
- ✓ Convertidor de señal de temperatura MP82800-R.
- ✓ Cableado tipo BNC para la trasmisión de señal.

Gracias a Don Diego Aragons (miembro del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid) se ha diseñado y fabricado por medio de una impresora 3D una caja adecuada para albergar los dispositivos anteriormente enumerados. De esta forma se garantiza una correcta ubicación de los dispositivos evitando que partes móviles de la instalación entren en contacto con el diferente cableado del sistema de temperaturas.



### 5.3.1 TERMO-RESISTENCIAS PT100.

La PT100 es un sensor de temperatura que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Este sensor PT100 es el corazón sensible a la temperatura de cualquier termómetro de resistencia. El incremento de la resistencia de la PT100 no es lineal, pero sí creciente. La sonda PT100 se fabrica encapsulada en la misma forma que los termopares, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina). En un extremo está el elemento sensible (Sensor RTD, detector de temperatura resistivo) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables.

El principio activo de las PT100 es la modificación de su resistencia eléctrica, que varía según la temperatura a la que son sometidas. Como elemento extendido, la PT100 recoge el valor medio de la temperatura existente a toda su longitud.

El modo de conexión de 3 y 4 hilos, dependiendo del convertidor, es el que utilizaremos para medir ya que resuelve bien el problema de error generado por los cables. El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa en el “puente de Wheatstone”. El lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión. Aunque también utilizaremos la conexión a cuatro hilos con la ventaja que es más preciso.

Mide un rango de temperaturas que va desde los 0 °C a los 150 °C.

### 5.3.2 CONVERTIDOR DE SEÑAL DE TEMPERATURA MP82800-R.

Se utilizarán tres convertidores de la serie MP más concretamente el MP 82800-R capaces de transformar una señal de temperatura (valor resistivo) en una señal de tensión a través de su circuito integrado. Además, dispone de un display, que, a través de una serie de conversiones, muestra el valor de temperatura en grados centígrados. Se alimentará por medio de una fuente de tensión de 12 voltios la cual se encuentra conectada a la red. Las especificaciones más importantes de este instrumento son las siguientes.

CONVERTIDOR SEÑAL DE TEMPERATURA.	
Fabricante.	S-Products.
Modelo.	MP 82800-R
Rango.	0/150 °C.
Entrada.	Pt100 Element.



Salida.	4-20 mA.
Corriente de excitación RTD.	0.1 mA.
Resistencia del conductor del sensor RTD.	500 ohm máx.
Efecto en la resistencia del conductor RTD.	0.01 °C./Ohm.

Tabla 12: Convertidor señal de temperatura MP 82800-R.

### 5.3.3 CABLEADO TIPO BNC.

Se encarga de transmitir la señal proporcionada por el convertidor al bloque del sistema de adquisición de datos dentro de un rango de trabajo.

Este tipo de cableado con sus correspondientes conectores de la misma clase es el utilizado para la transmisión de señales en el banco de ensayos.

A continuación, se muestra una imagen con todo el sistema descrito anteriormente. He de destacar una notable mejoría en cuanto a la disposición del conjunto respecto años anteriores.



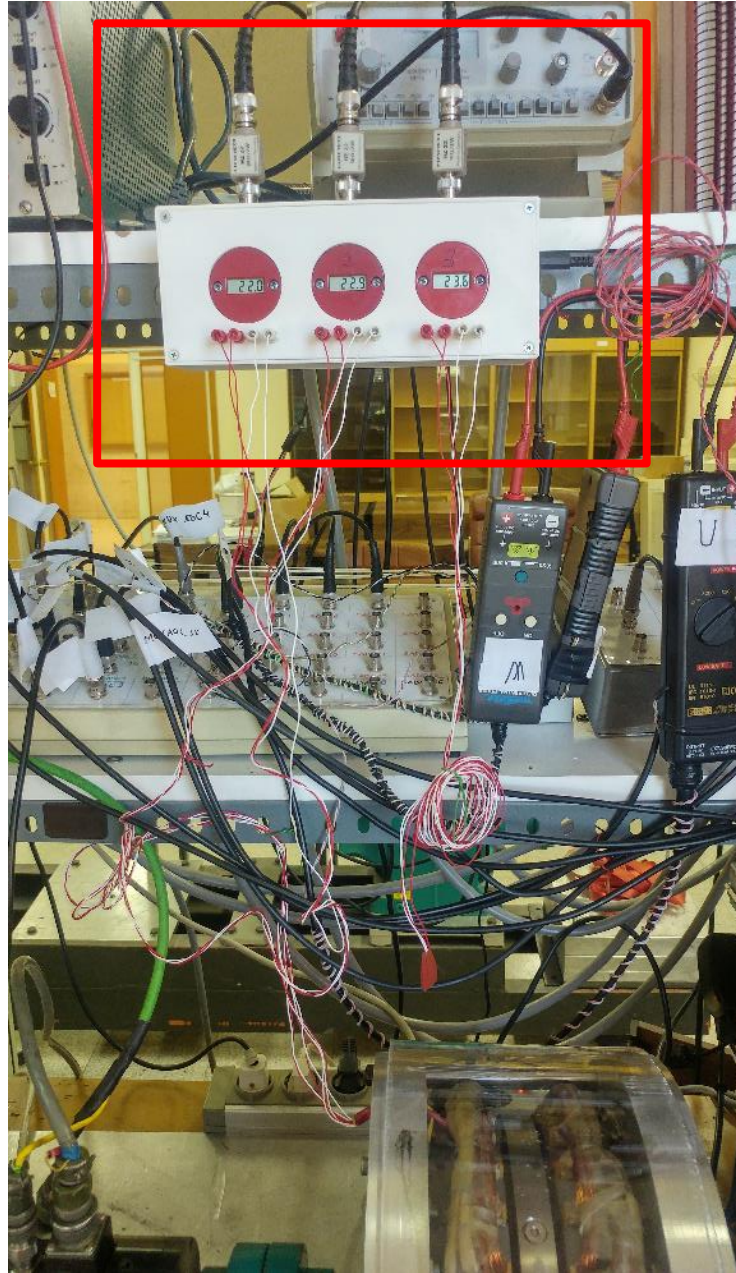


Ilustración 19: Caja de alojamiento de los convertidores de señal de temperatura.

#### 5.3.4 CONVERSIÓN DE TEMPERATURAS.

Para realizar una lectura correcta de las medidas tomadas es imprescindible llevar a cabo una serie de conversiones que nos permitirá obtener una lectura real de temperatura.

Esta conversión es programada mediante el lenguaje de bloques de la aplicación Simulink. Explicaremos las conversiones realizadas:



Escala entre la ent/sal de voltaje analógica del bloque de simulink.		Factor por compensar.
Rango del voltaje de entrada.	Salida Simulink.	
0 V ..... +5 V	0 V ..... +1 V	5
Convertidores temperatura (Rangos de trabajo).		
4 mA----20 mA	Lo pasamos a voltaje multiplicando por una resistencia de 50 Ω.  → x 50	0.2 V----1 V
0 °C -----150 °C		0 °C ----150 °C
<b>16 mA ≡ 150 °C</b>		<b>0.8 V ≡ 150 °C</b>

Tabla 13: Relación de atenuación convertidores temperatura.

Como se ha descrito en la tabla, el convertidor trabaja dentro de unos rangos de corriente estos los hemos pasado a voltaje por medio de una resistencia cerrando así el circuito, que más adelante detallaremos.

Efectuando una regla de tres sencilla obtenemos el valor de la temperatura medida, la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$T_{medida}^a = (V_{medida} - 0.2) \times \frac{150}{0.8}$$

Ecuación 2: Relación atenuación temperaturas.

Como tenemos que aplicar un factor de 5 para compensar el rango de simulink y realizando los cambios matemáticos oportunos la expresión final queda de la siguiente forma:

$$T_{medida}^a = (V_{medida}) \times 937.5 - 37.5 ( ^\circ C)$$

#### 5.4 VATÍMETRO.

Para realizar las medidas pertinentes en cada ensayo emplearemos el vatímetro 4- Channel Power Meter LMG450 que dispone de multitud de funciones.

El dispositivo consta de 4 salidas analógicas que se podrán mandar a través de un convertidor analógico/digital (ADC) al sistema DSpace para controlar y adquirir los datos mediante el PC.

En este apartado nos centraremos en su configuración, así como el procedimiento de medición.

Cabe destacar alguna de las ventajas que ofrece este equipo:

- ✓ Alta velocidad de muestreo lo que supone realizar mediciones precisas de potencia.
- ✓ Voltajes y corrientes se pueden medir en un amplio rango dinámico.
- ✓ Suprime armónicos de alta frecuencia por medio de filtros seleccionables.
- ✓ Mide corrientes y voltajes que llegan hasta los 600 V y a altas frecuencias respecto a tierra.
- ✓ Adecuado para mediciones en ambientes electromagnéticamente ruidosos.
- ✓ Disposición de abrazaderas de corriente para intensidades pequeñas de 0.1 A a 80 A.

#### 5.4.1 INSTALACIÓN DE LAS PINZAS.

El vatímetro dispone de 4 canales con los que podemos realizar diferentes mediciones. Para nuestro caso, hemos colocado una pinza amperimétrica en los tres primeros canales a través de un conector tipo d-sub. A continuación, con el fin de medir la tensión entre fases a la salida del generador se han conectado dos cables (con terminal tipo banana) por canal siguiendo un orden de tal forma que las medidas de tensión sean positivas.

El esquema seguido es el siguiente:

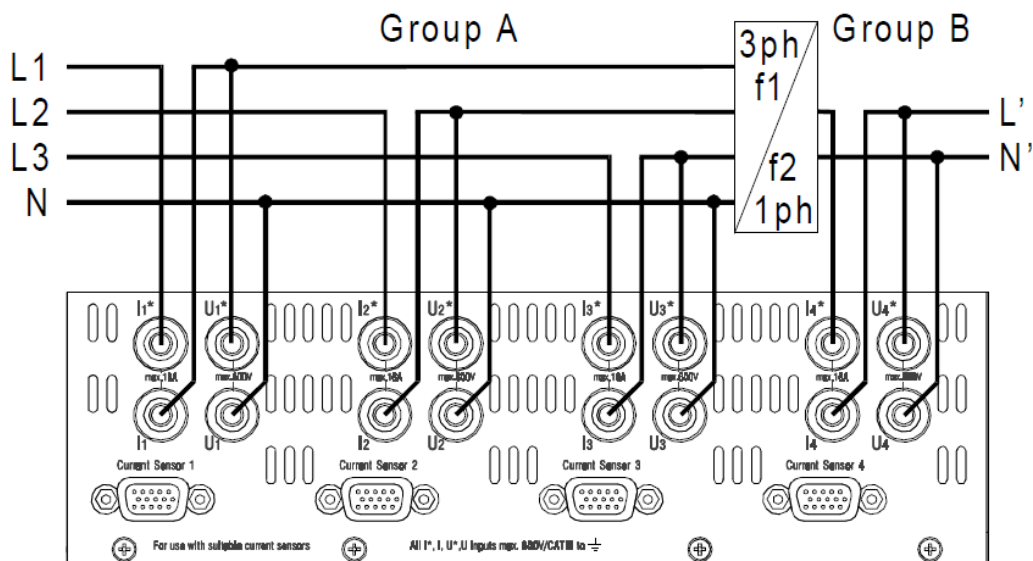


Ilustración 20: Esquema conexión voltímetro y amperímetro del vatímetro.



#### 5.4.2 CONFIGURACIÓN VATÍMETRO Y RELACIONES DE CONVERSIÓN.

Debido a las múltiples funciones que ofrece el vatímetro LMG450 se ha podido configurar de tal forma que muestre, a través de la pantalla en la aplicación ControlDesk, los valores de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia. Para ello se ha configurado del siguiente modo:

1. Una vez conectado el vatímetro estando la pantalla principal, presionamos el botón IF/IO (color morado) para configurar las entradas y salidas.
2. A continuación, nos aparece un menú, presionamos sobre el conjunto de teclas en columna de la izquierda donde aparecen las letras IO.
3. Nos aparece un menú con entradas y salidas tanto analógicas como digitales. Nos desplazamos, mediante la ruleta a la pestaña de las salidas analógicas (Aout).
4. En esta pantalla, presionamos el centro de la ruleta y cambiamos los parámetros (Value, Zero y Fullscale).
  - a. *Value*: como hemos dicho antes queremos conocer las potencias activas, reactivas y aparentes y el factor de potencia. Para que muestre la suma de la potencia activa de los tres canales, en el primer canal tenemos que poner: P:13, en el segundo: Q:13, en el tercero: S:13 y en el cuarto: PF.
  - b. *Zero*: es el comienzo del rango de la escala de valores que mediará el vatímetro. Por lo que tenemos que marcar un 0.
  - c. *Fullscale*: es el valor más alto que medirá el vatímetro y que luego convertirá/atenuará. La siguiente tabla muestra las conversiones realizadas:

Escala entre la ent/sal de voltaje analógica del bloque de simulink.		Factor por compensar.
Rango del voltaje de entrada.	Salida Simulink.	
-10 V ..... +10 V	-1 V ..... +1 V	P: 2000 Q: 2000 S: 3000
Fullscale.		
<b>0 W ..... 2000W (Activa)</b> <b>0 W ..... 2000W (Reactiva)</b> <b>0 W ..... 3000W (Aparente)</b> <b>0.....100 (Factor de potencia)</b>		

Tabla 14: Relación atenuación vatímetro.



Esta imagen muestra el resultado que se debe lograr:

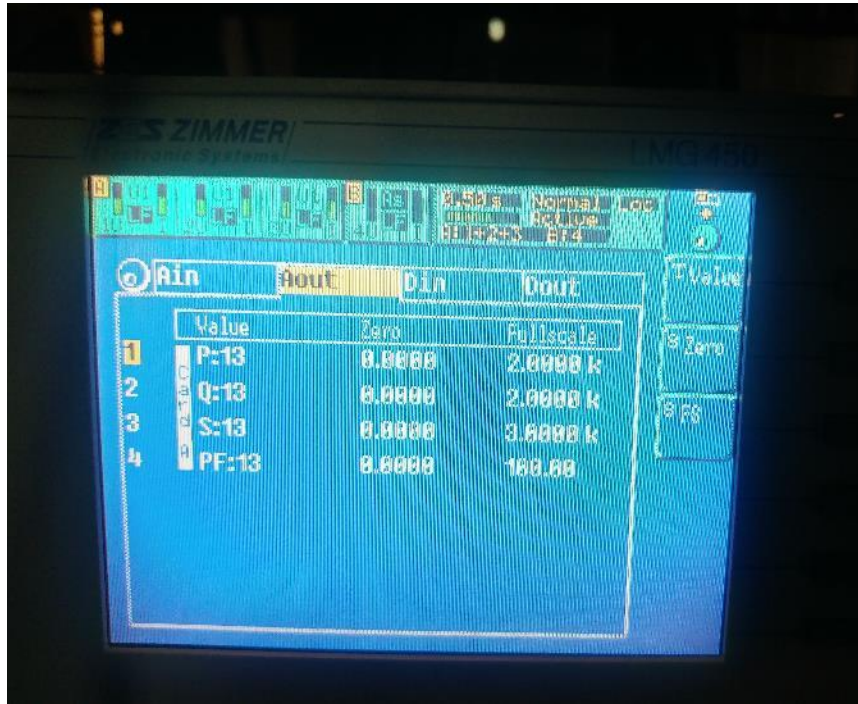


Ilustración 21: Configuración vatímetro.





## 6 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Una vez obtenidas todas las medidas nos tenemos que apoyar en un sistema capaz de recoger esos datos. Para ello describiremos todo aquel sistema que intervenga en la gestión de dichos datos para realizar los ensayos en condiciones óptimas. Se describirán la tarjeta de adquisición y el ordenador.

### 6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN.

Contamos con la tarjeta de control y adquisición de datos modelo DS1103, de la marca Dspace, que nos permitirá un rápido desarrollo de los algoritmos de control necesarios para implementar la etapa adaptadora. Principales características de esta tarjeta:

TARJETA DE ADQUISICIÓN.	
Fabricante.	DSPACE.
Modelo.	DS1103.
Procesador IBM PowerPC.	
1 procesador DSP esclavo TTs TMS320F240.	
16 canales de conversión analógico-digital de 16 bit.	
4 canales de conversión analógico-digital de 12 bit.	
8 canales de digital-analógico de 14 bit.	
32 canales digitales entrada/salida, programables en grupos de 8 bit.	
7 entradas para encoders.	
Comunicaciones CAN.	
Subsistema de DSP esclavo Texas Instruments TMS320F240 a 20 MHz.	

Tabla 15: Características tarjeta de adquisición DS1103.





*Ilustración 22: Tarjeta de adquisición DS1103.*

## **6.2 ORDENADOR.**

Un ordenador personal para alojar la tarjeta de comunicaciones que nos permitirá contactar con la caja de expansión donde va alojada la tarjeta Dspace DS1103.

Mediante la combinación ordenador – tarjeta Dspace DS1103 podremos programar y supervisar todo el conjunto de elementos que forman nuestros bancos de ensayo. Este ordenador alojará, además, una tarjeta PCI-GPIB para su comunicación digital con la carga electrónica.





## 7 SOFTWARE.

### 7.1 SIMULINK.

“*Simulink*” es un paquete de software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Soporta sistemas lineales y no lineales, modelados en tiempo continuo, muestreados o un híbrido de los dos.

Para modelar, “*Simulink*” proporciona una interfaz de usuario gráfica para construir los modelos como diagramas de bloques, utilizando operaciones con el ratón del tipo pulsar y arrastrar.

“*Simulink*” incluye una amplia biblioteca de bloques de sumideros, fuentes, componentes lineales y no lineales y conectores.

Los modelos son jerárquicos, es decir, puede construir modelos utilizando una metodología descendente y ascendente.

Después de definir un modelo, puede simularlo utilizando cualquier de los métodos de integración que tiene a su disposición o bien desde el menú de Simulink o introduciendo ordenes desde la ventana de órdenes de MATLAB. Utilizando bloques scopes y otros bloques de visualización, puede ver los resultados de la simulación.

#### 7.1.1 RUTINAS SIMULINK.

Se ha creado una rutina específica de simulink que nos servirá para cada ensayo en vacío, cortocircuito, carga y reluctancia. De esta forma, desde una rutina común mostraremos las variables que más nos interesen en cada uno de los ensayos a realizar.

Lo primero que se ha hecho es crear una vista general en cuanto a programación de bloque se refiere, intentado mostrar en una pantalla lo máximo posible para tener todo a una misma vista, sin embargo, esto no ha sido posible debido a la cantidad de bloque existentes por lo que se han generado una serie de subsistemas que engloban otros bloques. La vista general sería la siguiente:

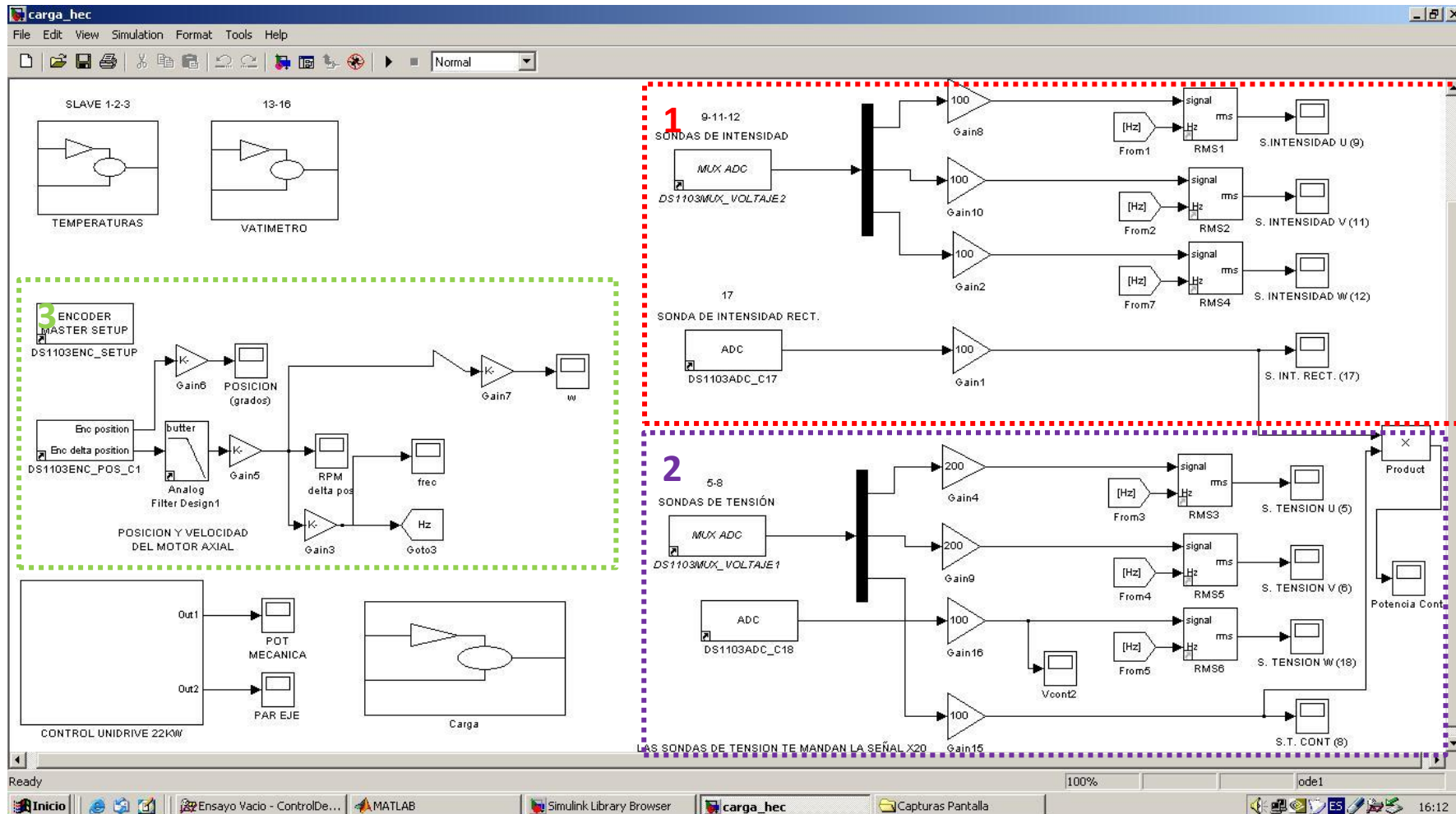


Ilustración 23: Programación de bloque con Simulink. Vista general.



En la pantalla de “simulink” es donde creamos los diagramas de bloques, simulamos el comportamiento del sistema, evaluamos su rendimiento y ajustamos el diseño según convenga.

Se ha dividido la vista principal en varias regiones: las que están numeradas bajo líneas de puntos y los subsistemas creados, nombrados como aparecen en la imagen.

#### **7.1.1.1 REGIÓN I: SONDAS DE CORRIENTE.**

En esta franja se obtiene las señales de las corrientes de línea “U”, “V” y “W”.

Del multiplexor DS1103MUX parten tres ramas cada rama es un canal del multiplexor en este caso son utilizados el 9, 11 y 12 siendo “U”, “V” y “W” las intensidades de línea respectivamente. A las tres ramas se le aplica una ganancia y un bloque RMS en serie, tanto el bloque RMS como la ganancia empleada ya se han explicado en apartados anteriores.

Además, debido al incorrecto funcionamiento del canal 10 del multiplexor DS1103MUX se ha tenido que buscar otra entrada para la sonda de intensidad rectificadas. En este caso se ha utilizado un conversor analógico-digital en el canal 17. Se ha aplicado la misma ganancia que en los anteriores casos, exceptuando el bloque RMS al ser una señal continua y coincidir el valor eficaz con el obtenido de la medición.

Para visualizar las entradas se ha colocado un scope al final de cada rama. Estas son las variables que utilizaremos más adelante en ControlDesk.

#### **7.1.1.2 REGIÓN II: SONDAS DE TENSIÓN.**

Esta región funciona similar a la anterior, pero en este caso se utiliza el mismo multiplexor, pero con canales de entrada diferente. He de destacar que existen diferentes ganancias aplicadas, esto puede ser debido a la relación de atenuación de la sonda siendo diferente.

Se utiliza un conversor analógico-digital DS1103ADC para medir la tensión “W-U” debido al incorrecto funcionamiento de alguno de los canales del multiplexor.

También para conocer la potencia activa del rectificador se ha incorporado un bloque multiplicador con dos entradas procedentes de las sondas de tensión y corriente rectificadas. Mediante un scope unido al bloque multiplicador obtenemos la potencia del rectificador.



### **7.1.1.3 REGIÓN III: POSICIÓN Y VELOCIDAD.**

En esta segunda región analizamos la posición y la velocidad del motor de flujo axial. Multiplicando la salida “posición” del canal 1 del encoder DS1103 por la constante “360/5000”, obtenemos la posición en grados, ya que el encoder mide pasos, y una vuelta completa tiene 5000 pasos.

La salida “delta posición” se pasa por un filtro pasabajos de orden 8 y frecuencia 20 rad/seg. Seguidamente se multiplica por la constante “60/ (5000\*0.001)” obteniendo así el valor de “RPM delta pos” en rpm/min. Si aplicamos al valor anterior una constante de valor “4/60”, obtenemos la frecuencia eléctrica; y si queremos obtener la velocidad angular “ $w$ ”, tenemos que multiplicar además por “ $2*\pi$ ”.

### **7.1.1.4 SUBSISTEMA TEMPERATURAS.**

El subsistema de temperaturas abarca la programación de bloques para realizar la correcta conversión de la temperatura mostrada por el display del convertidor y la visualizada en la pantalla del ordenador. Esta transformación que se da es debido a que el conversor de temperaturas trabaja dentro de un rango de corrientes y la transforma a una señal de tensión a través de una resistencia. Se añade también la conversión que hay que realizar en la entrada de canales de la tarjeta de adquisición ya que funciona dentro de un rango de valores. Además, simulink también incorpora una pequeña conversión. En el apartado de sondas de temperaturas se explica el conjunto de operaciones realizadas para mostrar una correcta medida de temperaturas. A continuación, se muestra la programación de bloques del subsistema temperaturas.

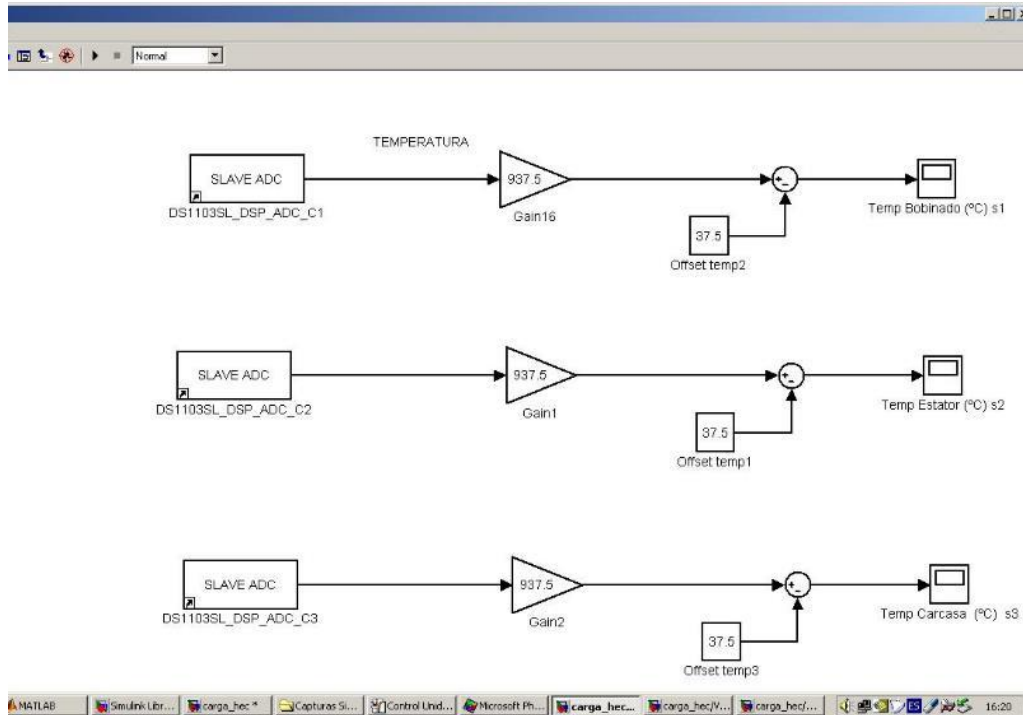


Ilustración 24: Programación de bloque con Simulink. Subsistema temperaturas.

En este caso se ha utilizado entradas denominadas esclavo DS1103SL ADC que convierten señales analógicas-digitales, pero a diferencia de los multiplexores son individuales y cada una representa un canal. Además, suelen trabajar en un rango de voltaje de entrada comprendido entre los 0 V y los 5V. Lo que supone un procesamiento más rápido de los datos.

Como podemos ver en la imagen mediante esta programación podemos observar por la pantalla del ordenador los valores de temperatura del bobinado, estator y carcasa del generador en grados Celsius.

#### 7.1.1.5 SUBSISTEMA VATÍMETRO.

La estructura para la programación del vatímetro es similar a la de las sondas de corriente y tensión utilizando el multiplexor con un conjunto de canales diferente a la de los anteriores. Se han fijado las oportunas conversiones (ganancias en la programación de bloques) descritas en el apartado del vatímetro. El programa de bloques para el vatímetro queda de la siguiente forma.

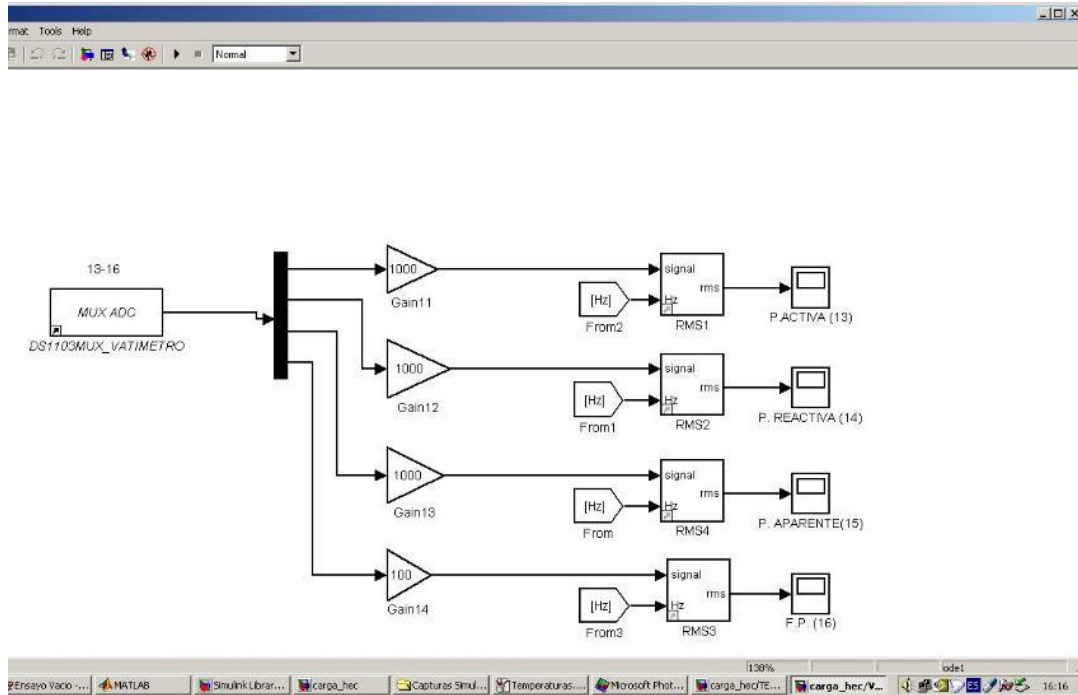


Ilustración 25: Programación de bloque con Simulink. Subsistema vatímetro.

Se obtienen las señales de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del vatímetro. Entre paréntesis es el canal de entrada del multiplexor al que está conectada.

#### 7.1.1.6 SUBSISTEMA CONTROL UNIDRIVE 22kW.

Se efectúa la programación relacionada con el control del motor de arrastre.





En la zona izquierda de la imagen, como en apartados anteriores, damos uso al multiplexor DS1103ADC utilizando los primeros cuatro canales donde nos encontramos: rpm uni, par lebow, tacómetro y par uni; estas variables a través de un conjunto de bloque acaban transformándose en las salidas que nos interesan: la potencia mecánica entre otras.

También nos interesa los bloques del control de la velocidad del motor de arrastre. En definitiva, el control de su velocidad para posteriormente a través de ControlDesk poder modificar la velocidad de giro y por lo tanto los parámetros de generador a ensayar.

Partimos del valor "0" porque el motor parte del reposo, y después se multiplica por la constante  $1/(1.02*2000)$  que relaciona la señal de velocidad de giro del motor con la señal que nosotros visualizamos. Se puede introducir un bloque para crear una rampa de velocidad.

Al igual que controlamos la velocidad podemos modificar el par.

#### **7.1.1.7 SUBSISTEMA CARGA.**

Este subsistema es específico para el ensayo en carga. Aquí podemos encontrar las variables necesarias para modifica la intensidad de la carga electrónica. A través de la secuencia de bloque obtenemos la salida de intensidad de la carga permitiendo establecer las condiciones nominales en cuanto a intensidad se refiere. Dispone también de un bloque en las que se puede incorporar rampas. El esquema de bloques es el siguiente.



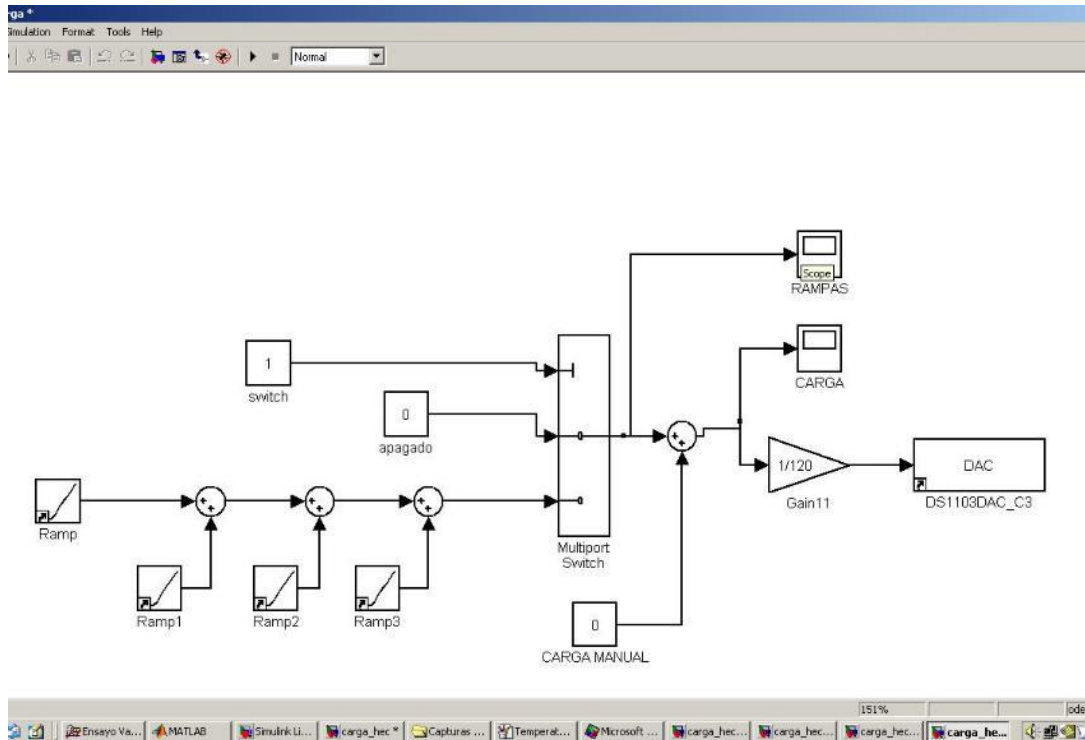


Ilustración 27: Programación de bloque con Simulink. Subsistema carga.

#### 7.1.1.8 CONSTRUCCIÓN DEL PROGRAMA.

Con el fin de crear un archivo tipo “.pcc” que nos sirva para cargarlo en la aplicación de ControlDesk y así volcar las variables creadas con el fin de poderlas modificar desde el entorno gráfico y observar los datos proporcionados, para ello, necesitaremos seguir unos pasos en Simulink:

1. Barra de **Menú** → **Simulation parameters.**
2. Nos aparece una pantalla como la siguiente:

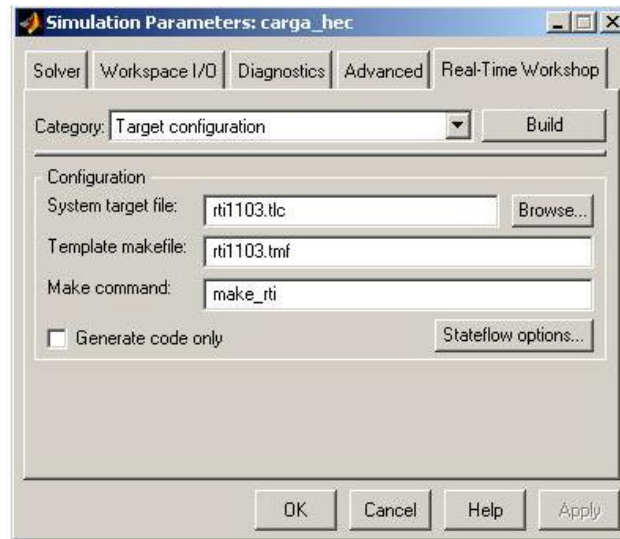


Ilustración 28: Cuadro de diálogo parámetros de simulación. Real-Time workshop.

3. Antes de presionar en “Build”, donde podremos construir el programa, vamos a la pestaña “Solver”, donde ajustaremos una serie de parámetros para la simulación:

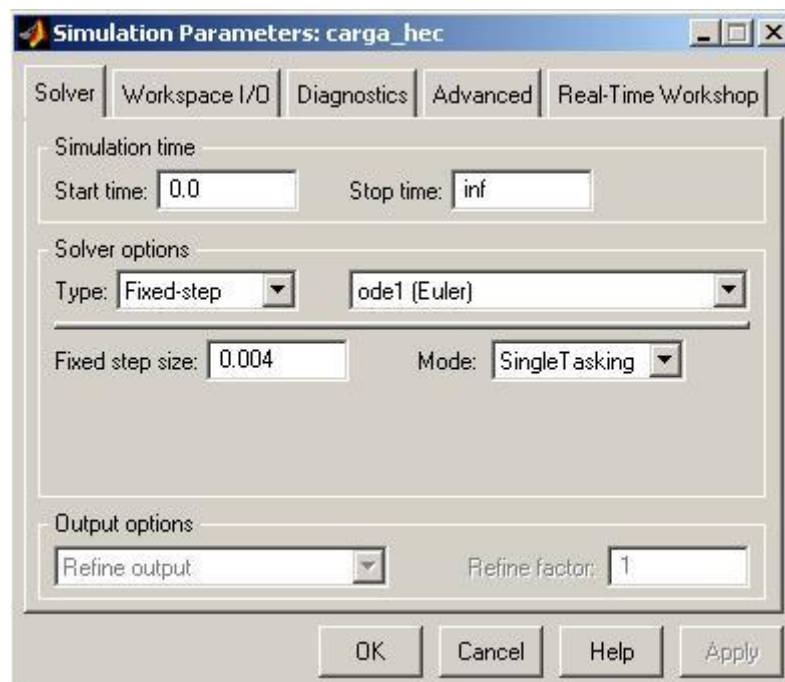


Ilustración 29: Cuadro de diálogo parámetros de simulación. Solver.

- **Tiempo de Simulación:** comenzaremos en cero hasta Infinito.
- **Solución adoptada:**
  - Tipo: “Fixed-step”; la simulación se realiza con paso fijo.



- Ode1 (Euler): es el método de integración numérica elegido. Es recomendable cuando la función evaluación consume tiempo y la tolerancia es poca
- Fixed step size: es el paso de la simulación. Cada cuanto se repite.
- Modo: "Single Tasking" tarea simple. Esta es una opción que controla la forma en la que gestiona Simulink los tiempos y que, en prácticas posteriores, evita que el programa de un error de sincronismo entre bloques.

## 7.2 CONTROLDESK.

Cada uno de los datos aportados por los sensores de las sondas, del variador del encoder y del medidor de par entre otros, son tomados por el sistema de adquisición de datos dSPACE, que dispone de una tarjeta multifunción de control y adquisición de datos, un software para su visualización (ControlDesk) y Matlab para el procesamiento de los datos.

Se dispone de la **tarjeta controladora DS1103 PPC** que nos sirve, entre otras cosas, de enlace entre el ordenador y el sistema a controlar, en este caso el conjunto del banco de ensayos. Recibe las instrucciones del ordenador en forma digital y tiene que convertirlas en señales analógicas y viceversa. Dispone de canales analógicos -digitales y viceversa. Se conecta al ordenador mediante un puerto ISA de 16 bits.

En cuanto al **soporte de programas software**: incorpora la tarjeta y los microprocesadores (PowerPc y DSP, respectivamente) los cuales se puede programar vía Simulink, con la ayuda del **RTI (Real-Time-Interface)**; que convierte las simulaciones gráficas de Simulink a código que se implementa en los procesadores de la tarjeta.

**ControlDesk** es un programa que acompaña a la tarjeta de control para monitorizar u automatizar experimentos en creados en dSPACE. Admite construir paneles virtuales de instrumentos configurables desde los cuales podemos tener acceso a toda la información sobre las variables y parámetros del ensayo, así como controlarlos en tiempo real. Estos datos pueden ser capturados para su posterior análisis con Matlab.

### 7.2.1 MANEJO DE CONTROLDESK.

En este apartado se describirá de forma breve y concisa el procedimiento llevado a cabo para poder visualizar los datos de cada uno de los ensayos.



1. Una vez abierto ControlDesk seguimos los siguientes pasos: en la barra de menú: **File** → **New Experiment**. Rellenamos los campos pedidos y lo guardamos.
2. **NOTA IMPORTANTE:** Conviene guardar todos los archivos relativos a un mismo experimento en la misma carpeta incluso los procedentes de simulink o Matlab.
3. A continuación: **File** → **Import Files**. Importamos el archivo de simulink.
4. Estamos en disposición de crear el layout (nos permitirá interactuar de forma gráfica con las variables).

#### ***7.2.1.1 DISEÑO DE LAYOUT.***

Comentaremos los aspectos más importantes y utilizados en un layout.

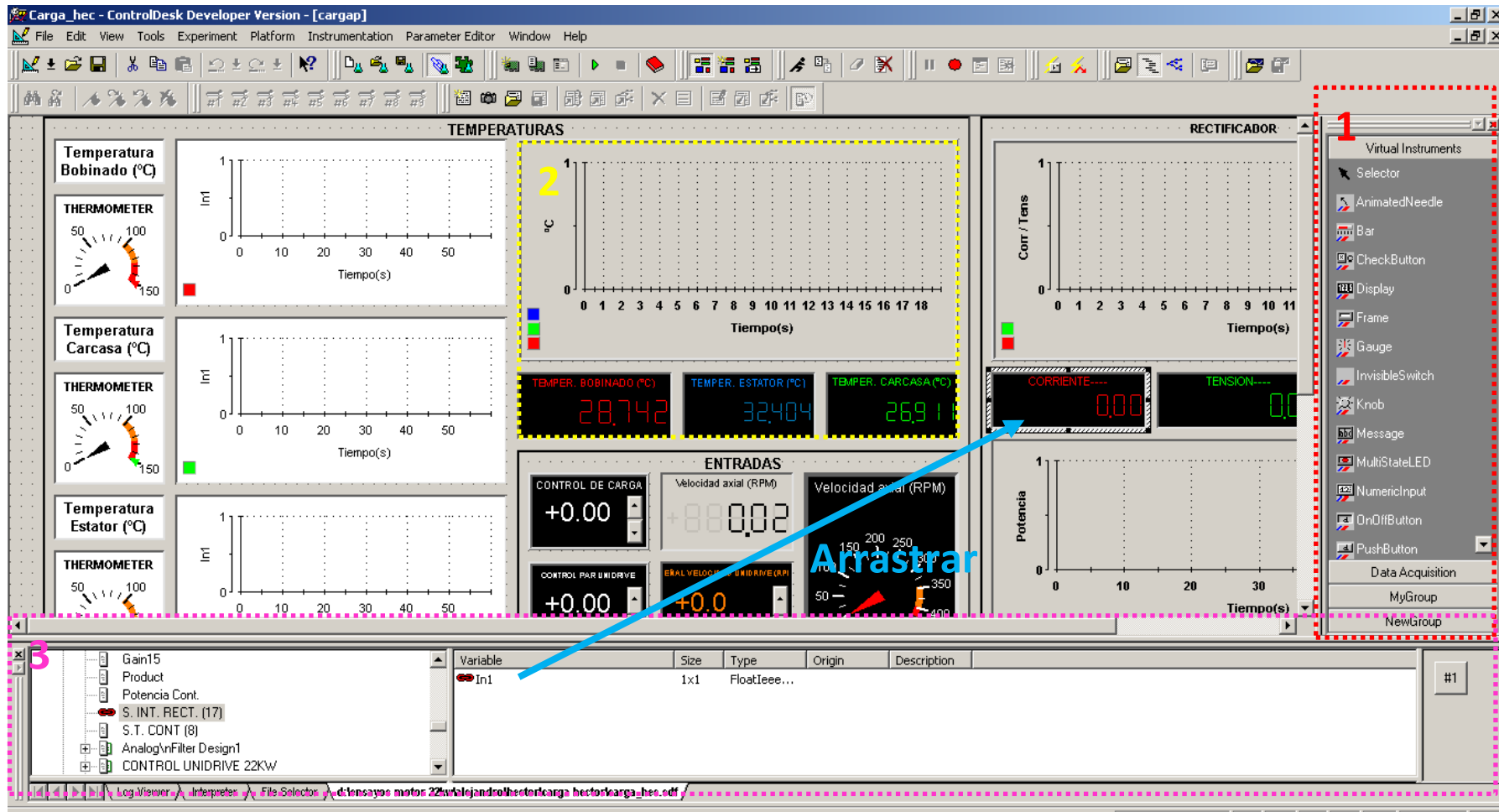


Ilustración 30: Proceso de asignación de variables en ControlDesk.



Se ha dividido la captura de pantalla en varias zonas o secciones para una mejor explicación:

- ✓ **Zona I:** Accedemos mediante; **View → Controlbars → Instrument Selector**. En este cuadro aparecen los elementos tales como displays, gráficas, botones, selectores, indicadores... etc. que nos permitirán interactuar con las variables. Nos da la capacidad de tomar datos y modificarlos.
- ✓ **Zona II:** Muestra los valores de las medidas realizadas, en este caso, se ha creado una gráfica con sus correspondientes displays que nos indican la temperatura en tiempo real. Para crear este bloque simplemente tenemos que seleccionarlo y darle la forma que creamos oportuna. Mediante la opción de configuración podemos darle el formato que deseemos.
- ✓ **Zona III:** En esta zona se localiza las variables utilizadas, para ello, debemos seleccionar la pestaña con el archivo tipo “.sfd” que se encuentra en la parte inferior de la pantalla. Para asociar una variable ya creada desde el entorno de simulink y vincularla al bloque que la visualice; primero tenemos que seleccionarla en el recuadro de la izquierda (donde aparecen todas las creadas desde simulink); posteriormente, tendremos que seleccionar la variable que se muestra (“In”) y arrastrarla hasta el bloque deseado. Tenemos que cerciorarnos que se muestra un icono de vínculo tal y como aparece en la imagen.

La mayor parte de los display y gráficas muestran las variables de entrada que hemos asignado, permitiendo su visualización. Existen otras variables de salida como son: señal de velocidad unidrive, control de par y control de carga, que, mediante la interfaz gráfica, permite la modificación de velocidad, par y carga.

El diseño de los layouts para cada ensayo serían los siguientes.

7.2.1.2 LAYOUT ENSAYO EN VACÍO.

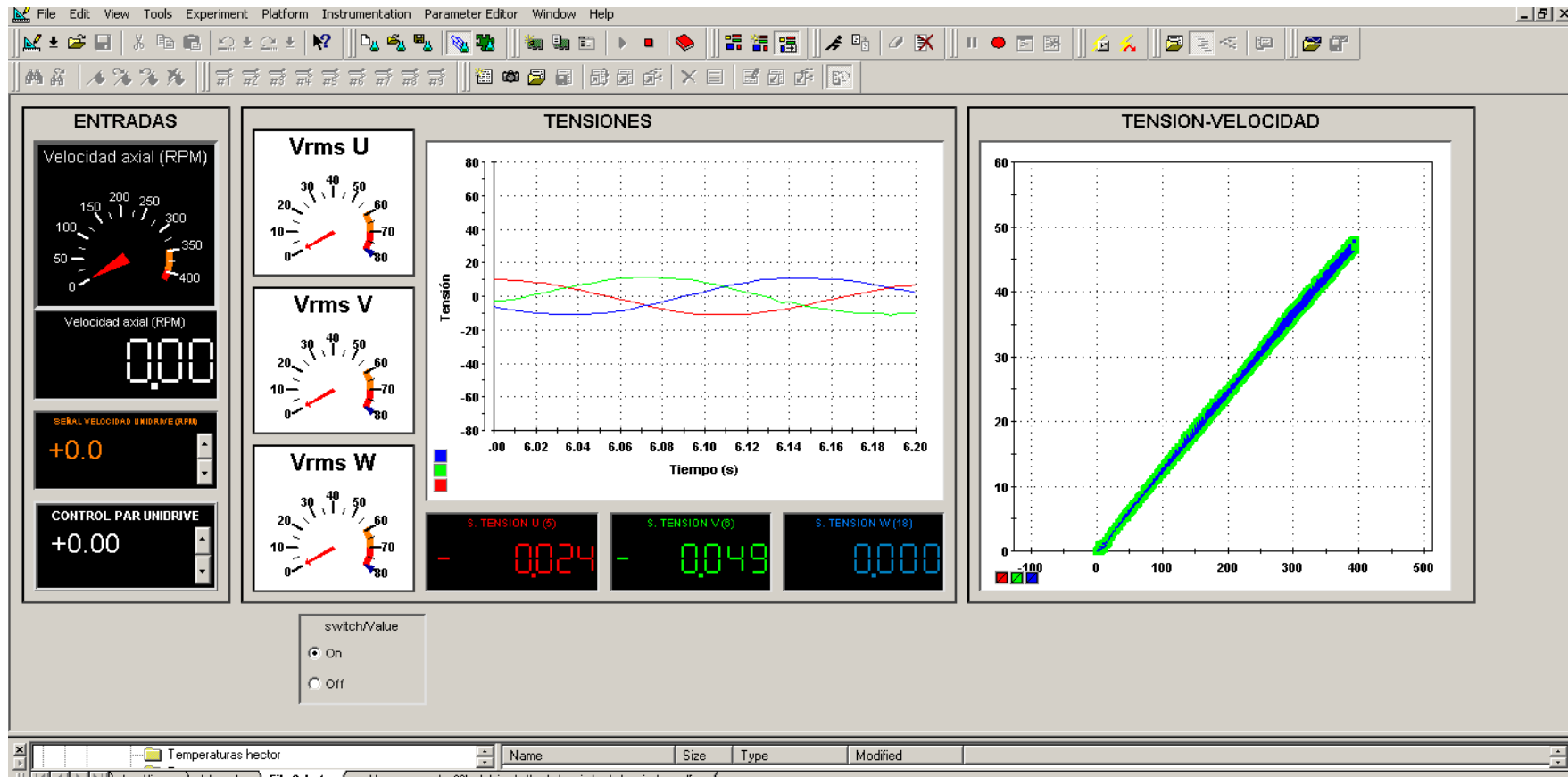


Ilustración 31: Interfaz gráfica. Ensayo en vacío.

7.2.1.3 LAYOUT ENSAYO EN CARGA.

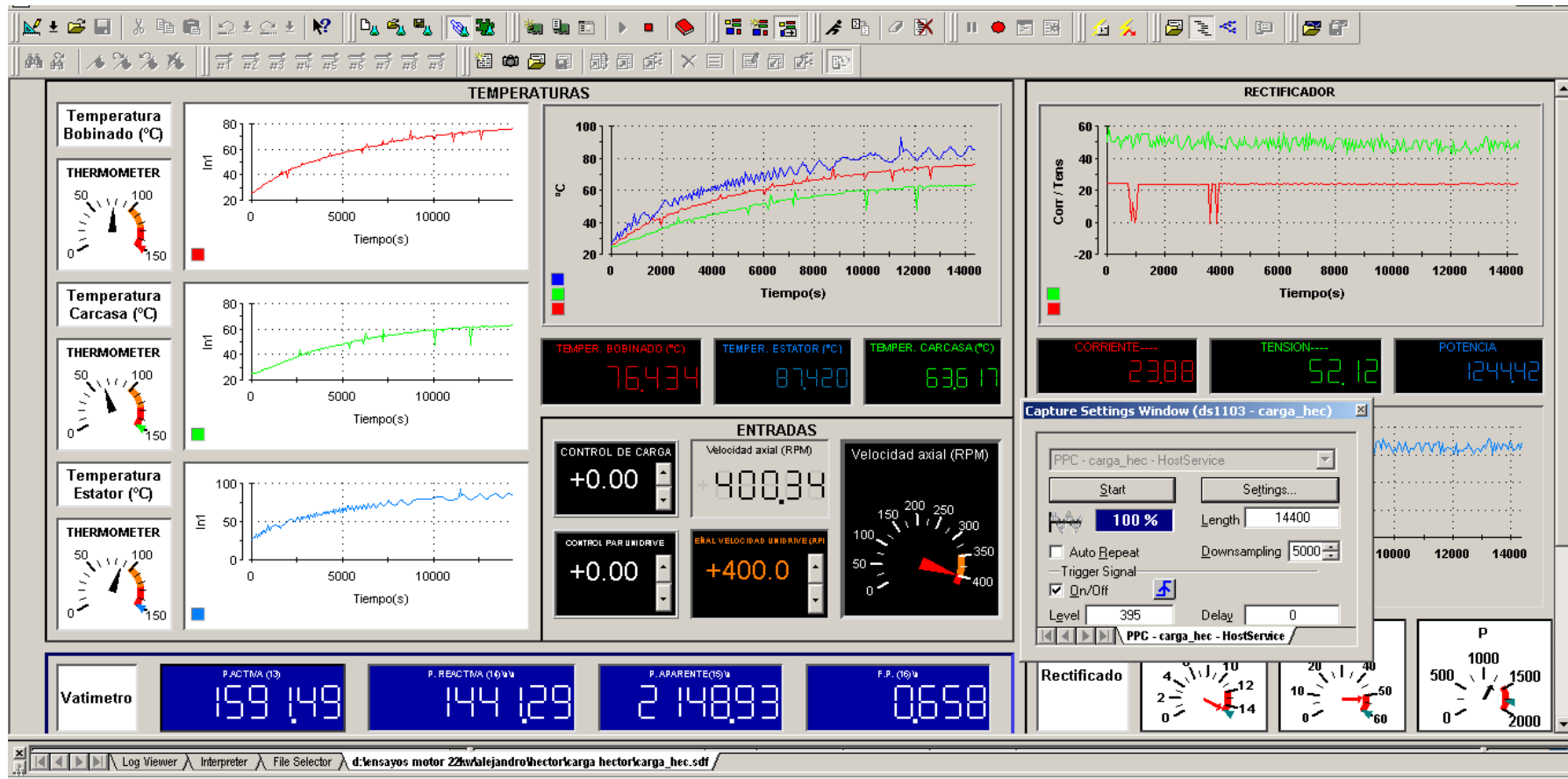


Ilustración 32: Interfaz gráfica. Ensayo en carga.



7.2.1.4 LAYOUT ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

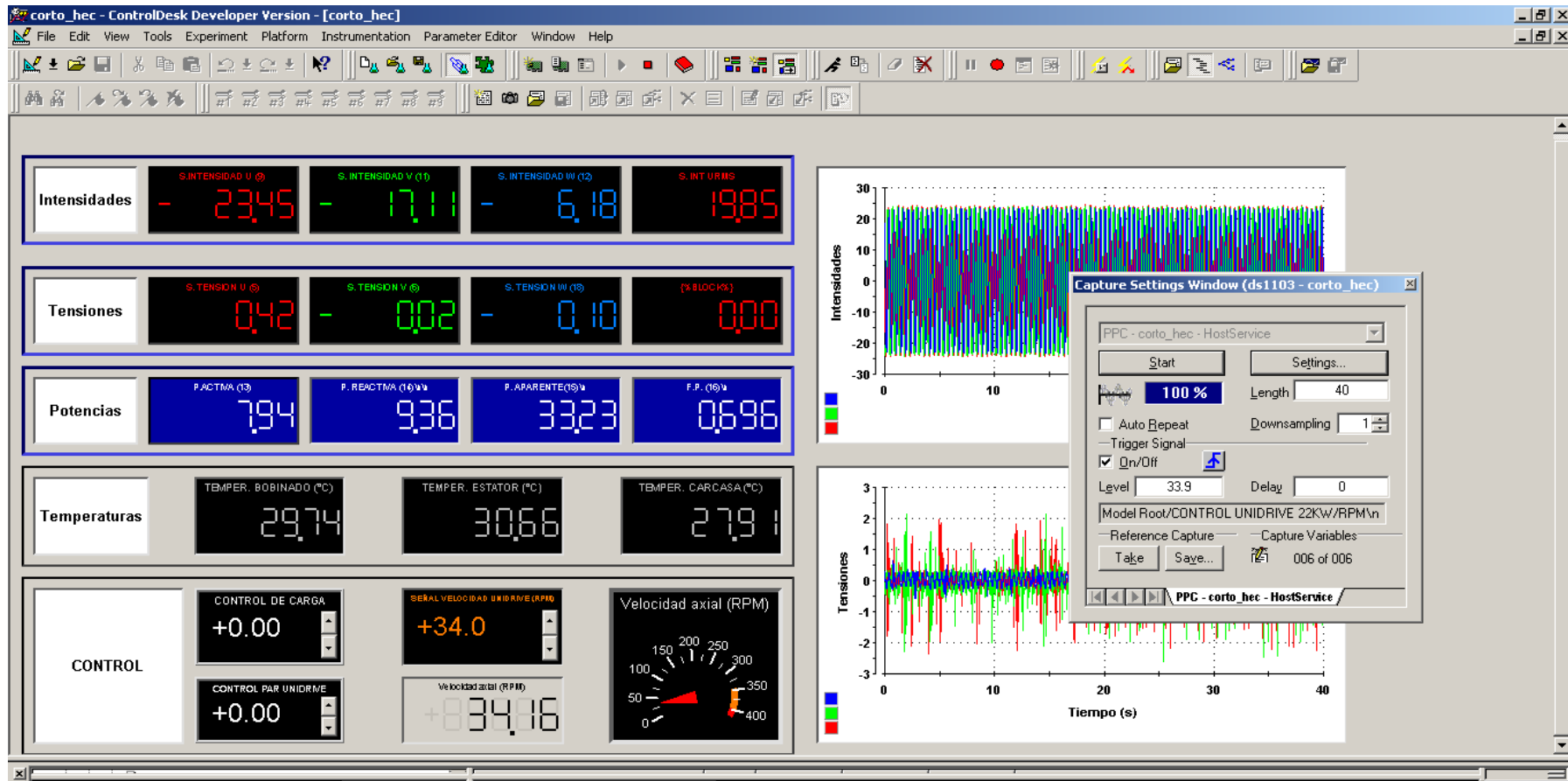


Ilustración 33: Interfaz gráfica. Ensayo en cortocircuito.

7.2.1.5 LAYOUT ENSAYO DE RELUCTANCIA.

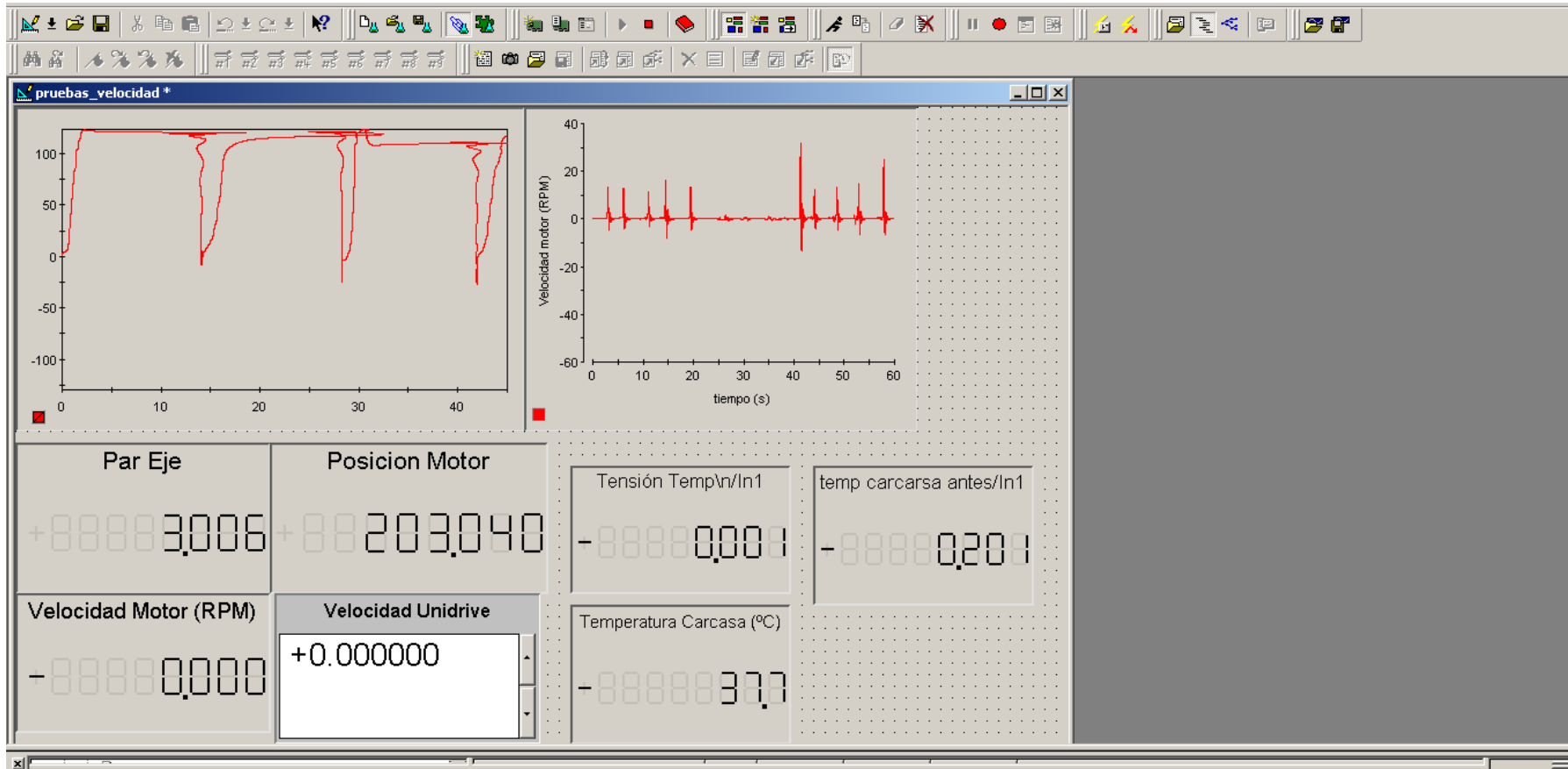


Ilustración 34: Interfaz gráfica ensayo de cortocircuito.



#### 7.2.1.6 CARGAR LAYOUT.

Para poner en funcionamiento la aplicación de ControlDesk y poder visualizar las variables en tiempo real, debemos efectuar unos sencillos pasos:

1. **File** → **Open Experiment**. Elegimos el experimento creado, se abrirá el layout correspondiente.
2. En la pestaña inferior (**File Selector**) seleccionaremos la carpeta donde hemos creado los archivos.
3. A la derecha nos aparecerá los archivos creados, nos fijaremos en aquel con formato “.pcc”.
4. Mediante **ALT+1**, aparece un cuadro de diálogo denominado **Navigator**. En la pestaña inferior seleccionamos **Plataform**.
5. Arrastramos el archivo “.pcc” hasta la tarjeta **ds1103**.

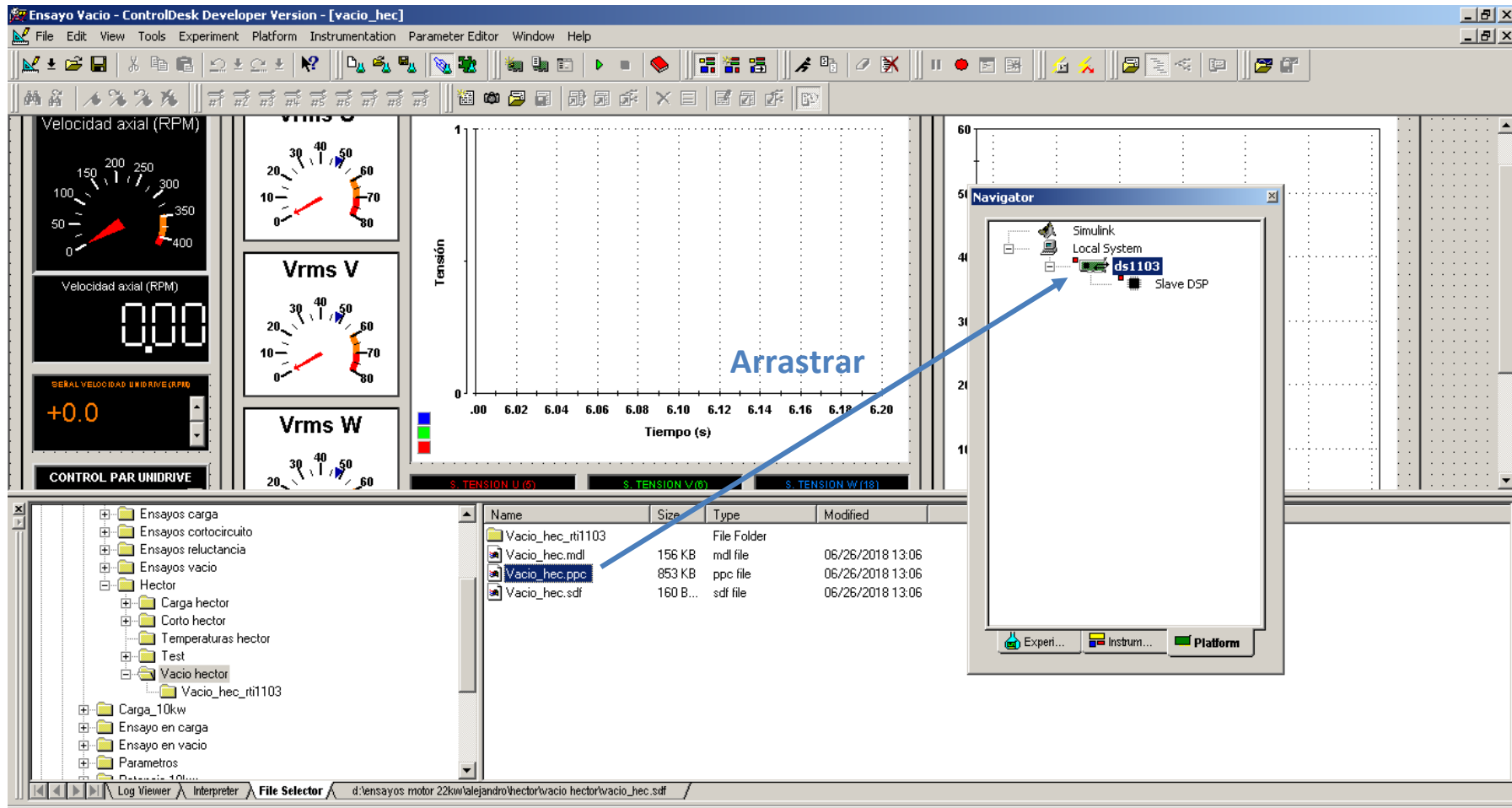


Ilustración 35: Procedimiento de carga de la aplicación.

### 7.2.1.7 CAPTURA DE DATOS.

Explicaremos el procedimiento para llevar a cabo la captura de datos. A través de ControlDesk, se genera una serie de estructuras de datos que podemos utilizar posteriormente para procesarlos en Matlab.

1. En la barra de menú: **View** → **Controlbars** → **Capture Setting Window**.
2. Aparece la siguiente pantalla:

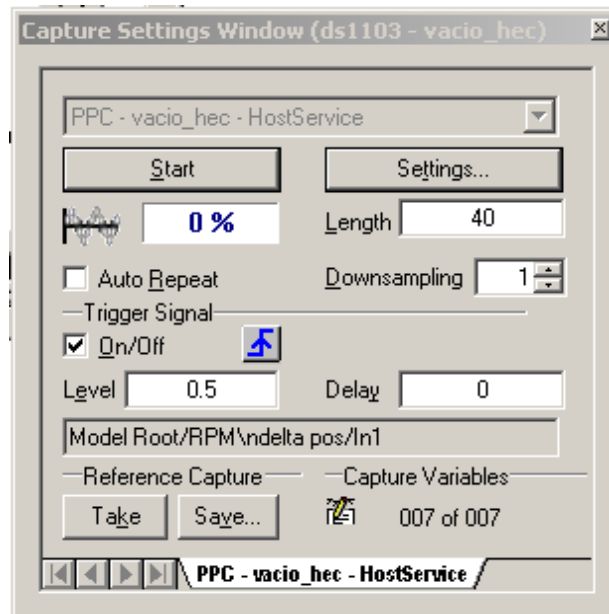


Ilustración 36: Interfaz gráfica. Captura de datos.

- Downsampling: número de datos que queremos capturar. Ejemplo: si indicamos 20, adquiere de cada 20 datos 1.
  - Length: periodo de tiempo durante el cual se desea capturar datos.
  - Trigger: esta opción sirve para capturar datos a partir de las condiciones de unas determinadas variables. La variable que queremos que cumpla unas condiciones y a partir de cierto valor comienza la captura debe ser arrastrada hasta el cuadro situado bajo "level" y "delay".
  - Level: valor de la variable a partir de la cual se toman los datos.
  - Delay: retraso aplicado a partir del disparo de "trigger".
3. En el botón **Settings** aparece el siguiente cuadro de diálogo:

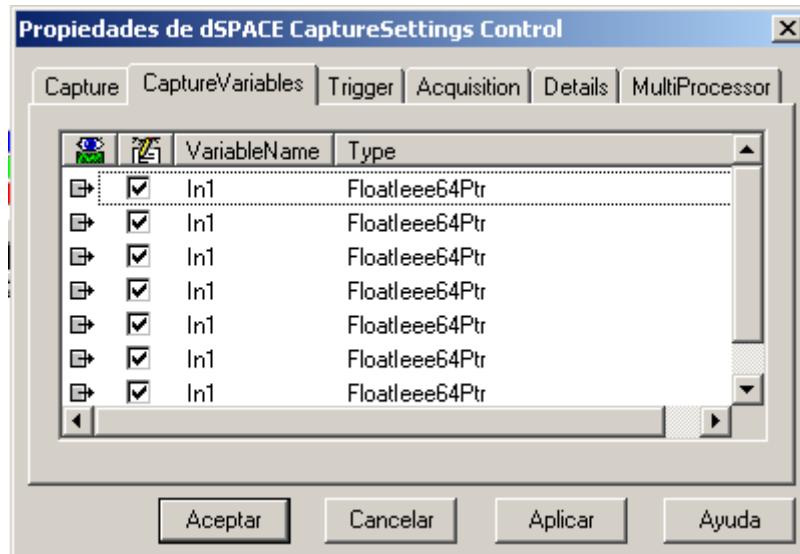


Ilustración 37: Interfaz gráfica. Marcación de variables.

- En la pestaña CaptureVariables, marcamos las variables de las que queremos obtener datos.
- En la pantalla Acquisition → Autonomie, guardaremos la ruta del archivo. Esta opción genera archivos con diferentes nombres automáticamente.

### 7.3 MATLAB.

Una vez realizado las operaciones anteriores utilizando, la tarjeta controladora y creando, mediante ControlDesk, las pantallas de visualización digitales de los ensayos, procedemos a la interpretación de los datos mediante Matlab.

Matlab es un programa interactivo para el cálculo numérico y tratamiento de datos.

Por medio de Matlab se han originado una serie de rutinas con las cuales, a partir de los datos adquiridos con ControlDesk, se ha creado una serie de gráficos y matrices que nos permitirán analizar el comportamiento de los generadores.





## 8 DESCRIPCIÓN DE LOS GENERADORES A ENSAYAR.

### 8.1 INTRODUCCIÓN.

Como se ha mencionado durante todo el documento, el objetivo del presente trabajo es el estudio detallado de tres generadores eléctricos de flujo axial e imanes permanentes empleando un banco de ensayos dinamométrico. Se utilizarán tres prototipos de estas máquinas eléctricas diseñadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Las máquinas destinadas a ser ensayadas son las siguientes:

- ✓ Generador de 27 ranuras.
- ✓ Generador de 24 ranuras desfasadas  $7,5^{\circ(1)}$ .
- ✓ Generador de 24 ranuras enfrentadas o en fase.

(1) Siempre que hablemos de ranuras desfasadas se refiere a estos grados de desfase en la posición de un estator frente a otro.

#### 8.1.1 CONCEPTOS PREVIOS.

Las máquinas de imanes permanentes se pueden clasificar según distintos criterios:

- ✓ Según el camino seguido por el flujo magnético: máquinas de flujo radial, axial o transversal.
- ✓ Según la disposición de los imanes: máquinas de imanes superficiales o de flujo concentrado.
- ✓ Según la presencia o no de ranuras: máquinas ranuradas o máquinas lisas.

Nos centraremos en las máquinas objeto de estudio: máquinas de imanes permanentes de flujo axial ranuradas.

#### 8.1.2 MÁQUINAS DE FLUJO AXIAL.

En este tipo de máquinas el flujo magnético se produce en la dirección axial siendo originado por imanes magnetizados axialmente.

Entre las ventajas y desventajas ofrecidas por las máquinas de flujo axial frente a las de flujo radial podemos destacar las siguientes:





VENTAJAS.	DESVENTAJAS.
Bobinado sencillo.	Baja relación par/peso.
Pequeño par de reluctancia y bajo ruido (en máquinas lisas).	Elevado diámetro externo, gran cantidad de imanes permanentes y elevada inestabilidad (máquinas lisas).
Pequeña longitud axial de la máquina.	Dificultades para mantener constante el entrehierro para diámetros altos (en máquinas ranuradas).
Elevada relación par/volumen.	Estátor difícil de fabricar (en máquinas lisas y ranuradas).

Tabla 16: Ventajas y desventajas de las máquinas de flujo axial frente a las de flujo radial.

En aquellas aplicaciones en las que la reducida longitud axial de la máquina es una condición, las máquinas de flujo axial son la geometría a tener en cuenta, es el caso de vehículo eléctricos con el motor situado en el interior de la rueda.

Por su construcción más compacta y una densidad de potencia mayor, se ha elegido este prototipo de generador de flujo axial.

## 8.2 DESCRIPCIÓN GENERADORES.

Los generadores que se van a ensayar durante el desarrollo de este trabajo constan de un rotor interno formado por un solo disco de imanes permanentes y dos estatores ranurados externos para obtener una mayor densidad de corriente. Con el diseño del rotor interno se ha conseguido mayor sencillez a la hora de sujetar los imanes, además de que el esfuerzo al que se ve sometido es soportado por todo el rotor y no únicamente por el eje.

En cuanto a los bobinados del estator, son trifásicos conectados en serie para evitar corrientes de circulación dentro del motor.

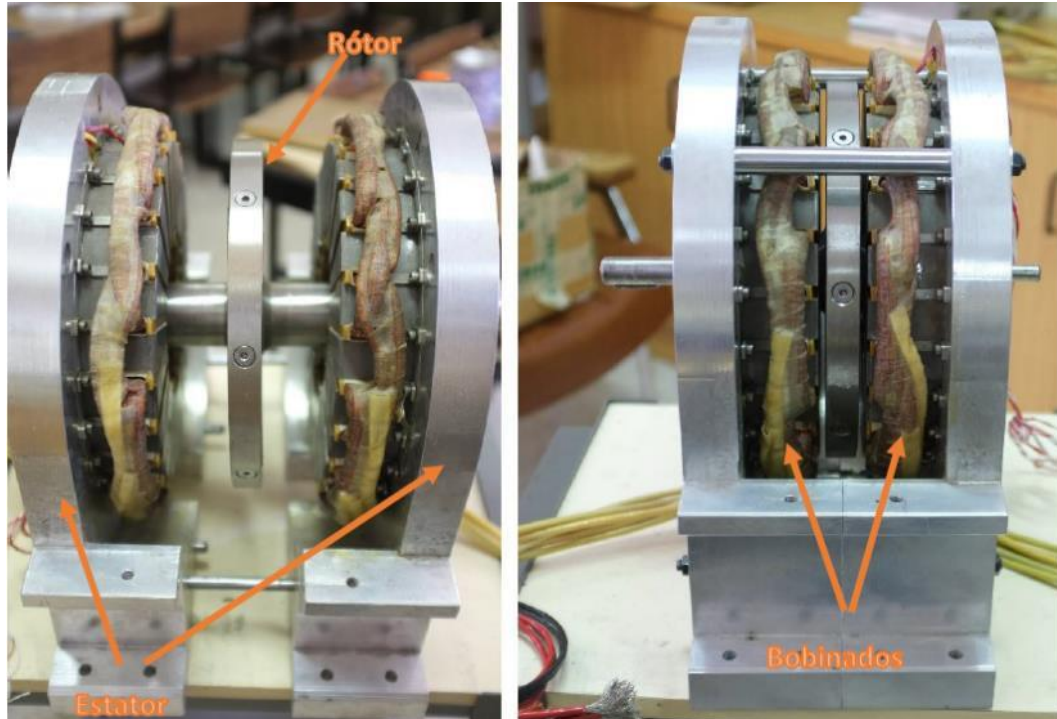


Ilustración 38: Generador de 24 ranuras. Conjunto de rotor y estator.

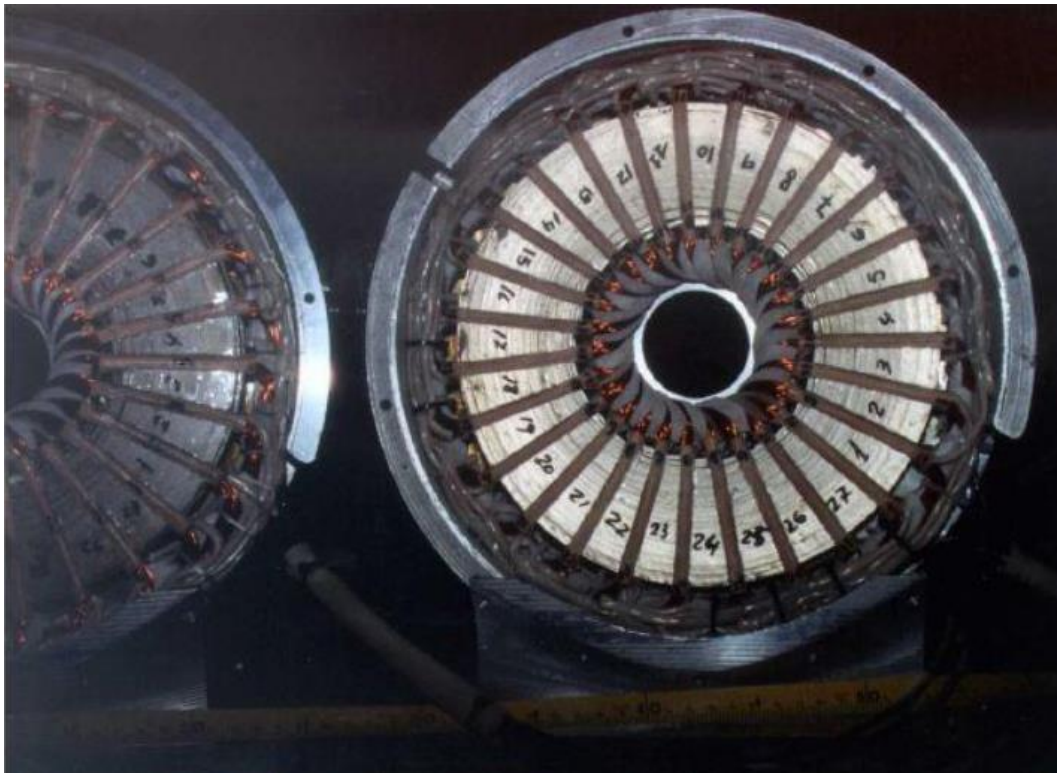


Ilustración 39: Generador de 27 ranuras.



8.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERADORES.

PARÁMETROS FIJOS 27 RANURAS	VALOR	UNIDADES
<b>Potencia con pérdidas.</b>	1016,260	Wattios.
Potencia.	1150	Wattios.
Revoluciones.	400	r.p.m.
Velocidad Angular.	41,888	Radianes/seg.
Tensión (dc).	49,541	Voltios.
Tensión fase (Eficaces).	22	Voltios.
Densidad de corriente máxima en ranura (Jmáx).	10.000.000	A/m <sup>2</sup>
Nº fases (Nph).	3	Fases.
Número de imanes (Nm).	8	
Número de ranuras (Ns).	27	
Entrehierro mecánico (g).	0,005	m
Grosor de los imanes (Im).	0,02	m
Radio exterior del motor (Ro).	0,120	m
Radio interior del motor (Ri).	0,060	m
Número de polos (Np).	8	
Factor de laminación (Kst).	0,8	
Factor de pérdidas en el hierro (B,f).	0,5	
Coefficiente de empaquetamiento del cable (kcp).	0,4	
Campo remanente del imán (Br).	1,25	Teslas.
Permeabilidad del vacío ( $\mu_0$ ).	$1,25664 \times 10^{-6}$	H/m
Permeabilidad relativa del imán ( $\mu_r$ ).	1,1	
Separación entre imanes ( $\tau_f$ ).	0,05	m
Saturación del acero (Bmáx).	1.6	Teslas.
Densidad de imanes.	7800	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del acero ( $\rho_a$ ).	7900	kg/m <sup>3</sup>
Resistividad del acero.	$7.200 \times 10^{-7}$	$\Omega m/m$
Espesor lámina núcleo.	0.0003	m
Espesor puente.	1,0000	mm
Abertura de las ranuras (ws).	0,004	m
Fracción de profundidad de ranura ( $\alpha d_1+d_2/wth$ )	0,25	
Temperatura ambiente	50	°C
Temperatura máxima del cable.	150	°C
Par (T)=P/wm	27,454228	N·m
Constante de Par.	1,575634	N·m/A
Constante de Tensión del generador (Ke).	0,055000	V/rpm
Constante de Tensión del generador (Ke).	0,525211	V/rad



<b>PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS.</b>		
<b>Magnéticos.</b>		
Anchura del diente en el fondo ( <b>w<sub>tb</sub></b> ).	0,007901	m
Anchura superior del diente ( <b>w<sub>t</sub></b> ).	0,009963	m
Anchura del fondo de ranura ( <b>w<sub>sb</sub></b> ).	0,006062	m
Razón del aspecto de ranura $R_i$ ( <b><math>\alpha_s</math></b> ).	0,557713	m
<b>Eléctricos.</b>		
Velocidad eléctrica ( <b>w<sub>e</sub></b> )= (Nm/2)w <sub>m</sub> .	167,5516082	Rad/s
Paso de núcleos ( <b>T<sub>c</sub></b> ).	0,047124	m
Paso de ranuras ( <b><math>\tau_{si}</math></b> ).	0,013963	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>2</sub></b> ).	0,000988	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>1</sub></b> ).	0,000988	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>2</sub>+d<sub>1</sub></b> ).	0,001975	m
Profundidad de diente donde se alojan los cables ( <b>d<sub>3</sub></b> ).	0,021448	m
Número de ranura por fase ( <b>N<sub>sp</sub></b> )=N <sub>s</sub> /N <sub>ph</sub>	9	
Número de ranuras por polo y fase ( <b>N<sub>ssp</sub></b> )=N <sub>s</sub> /N <sub>m</sub> N <sub>ph</sub> .	1,125000	
Número de ranura por polo ( <b>N<sub>sm</sub></b> )=N <sub>s</sub> /N <sub>m</sub> .	3,375	
Paso angular de polo ( <b><math>\partial p</math></b> ) =2 $\pi$ /N <sub>m</sub>	0,785400	Rad
Paso angular de ranuras ( <b><math>\partial s</math></b> ) = 2 $\pi$ /N <sub>s</sub>	0,232711	Rad
Ángulo eléctrico por ranura ( <b><math>\partial se</math></b> ) =2 $\pi$ /N <sub>sm</sub>	0,930844	Rad
Fracción entre polo y bobina ( <b><math>\alpha_{cp}</math></b> ) = int(N <sub>ssp</sub> )/N <sub>spp</sub>	0,888889	
<b>Geométricos.</b>		
Arco interior de polo ( <b><math>\tau_{pi}</math></b> ) = R <sub>i</sub> $\partial p$	0,047124	
Arco exterior de polo ( <b><math>\tau_{po}</math></b> ) = R <sub>o</sub> $\partial p$	0,094248	
Arco de núcleo interior ( <b><math>\tau_{ci}</math></b> ) = $\alpha_{cp} \cdot \tau_{pi}$	0,041888	
Arco de núcleo exterior ( <b><math>\tau_{co}</math></b> ) = $\alpha_{cp} \cdot \tau_{po}$	0,083776	
Arco interior de ranura ( <b><math>\tau_{si}</math></b> ) = R <sub>i</sub> · $\partial s$	0,013963	
Factor de distribución del bobinado ( <b>k<sub>d</sub></b> )	0,990297	
Factor de paso (pitch factor) ( <b>k<sub>p</sub></b> = $\alpha_{cp}$ )	0,888889	
Factor de desviación de ranuras ( <b>k<sub>s</sub></b> )=1- $\partial se$ /2 $\pi$	0,851852	
Fracción de imán sobre toda superficie ( <b><math>\alpha_m</math></b> )	0,929265	
Factor de concentración de flujo ( <b>C<math>\phi</math></b> )	0,963336	
Coeficiente de permeancia ( <b>P<sub>c</sub></b> )	2,076120	
Factor de pérdidas en bordes de iman ( <b>k<sub>ml</sub></b> )	1,250416	
Entrehierro efectivo para Carter ( <b>g<sub>c</sub></b> )=2g+l <sub>m</sub> /μ <sub>r</sub>	0,028182	
Coeficiente de Carter ( <b>k<sub>c</sub></b> )	1,000068	
Área del entrehierro ( <b>A<sub>g</sub></b> )	0,004091	m <sup>2</sup>
Densidad de flujo en el entrehierro ( <b>B<sub>g</sub></b> )	0,724287	T
Anchura del estator detrás de la ranura ( <b>w<sub>b</sub></b> )	0,019999	m



Número de cables por ranura ( <b>ns</b> ) conexión serie	9,949020	
Tensión máxima ( <b>emax</b> )	22	Voltios
Pico de corriente ( <b>Is</b> )	520,062407	Amperios
Corriente cada bobinado paralelo ( <b>Iph</b> )	17,424242	Amperios
Corriente de fase total ( <b>Iph</b> )	17,424242	Amperios
Área de conductor ( <b>As</b> )= $w_{sb} \cdot d_3$	0,000130016	m <sup>2</sup>
Pico de densidad de corriente ( <b>Jc</b> )= $I_s/k_{cp} \cdot w_{sb} \cdot J_{max}$	1,000x10 <sup>7</sup>	A/ m <sup>2</sup>
Profundidad de la ranura ( <b>ds</b> )= $d_1+d_2+d_3$	0,023423	m
Profundidad total de la ranura ( <b>ds</b> )= $d_1+d_2+d_3+d_p$	0,024423	m
Longitud axial del estator ( <b>L</b> )= $d_s+w_b$	0,044422	m
Flujo máximo por ranura ( <b>IBslmax</b> )	0,163383	T

Tabla 17: Características generador 27 ranuras.

<b>PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO (Núcleo laminado)</b>		
Longitud de la lámina equivalente	76,67	m
Pérdidas medias por unidad de volumen para una lámina:	374,3139	W/m <sup>3</sup>
Volumen de la lámina equivalente	0,001022	m <sup>3</sup>
Pérdidas medias para la lámina equivalente:	0,3825	W
<b>Pérdidas totales en los núcleos</b>	<b>0,7649</b>	<b>W</b>
<b>PÉRDIDAS EN LOS PUENTES</b>		
Espesor del puente	1,00	mm
Pérdidas medias por puente	0,0015	W/m <sup>3</sup>
<b>Pérdidas en todos los puentes del generador</b>	<b>0,0817</b>	<b>W</b>
<b>RESISTENCIAS E INDUCTANCIAS</b>		
Resistencia de ranura ( <b>Rs</b> )= $\rho \cdot n_s^2 (R_o - R_i) / k_{cp} A_s$	0,003078	
Resistencia de final de vuelta ( <b>Re</b> )= $\rho \cdot n_s^2 \pi (\tau_{co} - \tau_{ci}) / 4 k_{cp} A_s$	0,005063	Ohm
Resistencia cada bobinado paralelo ( <b>Rph</b> )= $2 N_{sp} (R_s + R_e) / c_2^2$	0,146522	Ohm
Inductancia del entrehierro ( <b>Lg</b> )	8,239E-06	Henrios
Inductancia de la ranura ( <b>Ls</b> )	1,211E-05	Henrios
Inductancia de final de vuelta ( <b>Le</b> )	2,006E-07	Henrios
Inductancia cada bobina paralelo ( <b>Lph</b> )	3,699E-04	Henrios
Caída de tensión por rectificador	2,2	voltios
Caída de tensión por pérdidas	6,029561	voltios
Pérdidas en el cobre ( <b>Pr</b> )= $N_{ph} \cdot I_{ph}^2 \cdot R_{ph} \cdot c_2^2$	133,454384	Wattios
Volumen total del estator ( <b>Vst</b> )	0,003014	m <sup>3</sup>
Peso del estator	23,813846	Kilos
Volumen totos imanes	0,000679	m <sup>3</sup>
Peso de imanes	5,292955	Kilos



Peso total motor	31,294933	Kilos
Volumen rotor	2,770E-04	m <sup>3</sup>
Peso del rotor	2,188132	Kilos
Pérdidas en el hierro ( <b>Pcl</b> )	11,906923	watios
Rendimiento eléctrico ( $\eta$ )	0,895820	
Área del imán ( <b>Am</b> )	0,004123	
Permeancia del imán ( <b>Pm</b> )	2,850E-07	
<b>CONSIDERACIONES TÉRMICAS</b>		
Conductividad térmica del cobre	3,8	wcm/cm2 <sup>°c</sup>
Conductividad térmica aislante	0,026	wcm/cm2 <sup>°c</sup>
Densidad del cobre	8,900E+00	kg/dm3
Coeficiente térmico superficial	70	W/m2k <sup>°</sup>
grosor aislante(total proporcional en una ranura)	0,965159	cm
grosor cobre (total proporcional en una ranura)	0,965159	cm
conductividad termica total en una ranura	0,057385	wcm/cm2 <sup>°c</sup>
perdidas en el cobre por unidad de volumen	3,028E+02	w/kg
incremento de temperatura del núcleo de los cables a su superficie	54,009725	°C
incremento de temperatura de la superficie al aire	12,018974	°C
superficie total de ventilacion	0,158623	m2
TEMPERATURA DE CARCASA EXTERIOR		
TEMPERATURA SUPERFICIE BOBINADOS	62,018974	°C
TEMPERATURA INTERIOR BOBINADOS	116,028699	°C
incremento de la temperatura	130	C <sup>°</sup>
resistividad del cobre(75°C)	0,021700	Ohmios*mm2/m
resistividad del cobre(t <sup>°</sup> )	0,026950	Ohmios*mm2/m
sección de los cables	5,227273	mm <sup>2</sup>
diámetro de los cables	2,57983921	mm

Tabla 18: Características generador 27 ranuras II.

PARÁMETROS FIJOS 24 RANURAS	VALOR	UNIDADES
<b>Potencia con pérdidas.</b>	1020,303	Watios.
Potencia.	1150	Watios.
Revoluciones.	400	r.p.m.
Velocidad Angular.	41,888	Radianes/seg.
Tensión (dc).	49,541	Voltios.
Tensión fase (Eficaces).	22	Voltios.
Densidad de corriente máxima en ranura (Jmáx).	10.000.000	A/m <sup>2</sup>
Nº fases (Nph).	3	Fases.
Número de imanes (Nm).	8	
Número de ranuras (Ns).	24	



Entrehierro mecánico (g).	0,005	m
Grosor de los imanes (Im).	0,02	m
Radio exterior del motor (Ro).	0,120	m
Radio interior del motor (Ri).	0,060	m
Número de polos (Np).	8	
Factor de laminación (Kst).	0,8	
Factor de pérdidas en el hierro (B,f).	0,5	
Coeficiente de empaquetamiento del cable (kcp).	0,4	
Campo remanente del imán (Br).	1,25	Teslas.
Permeabilidad del vacío ( $\mu_0$ ).	$1,25664 \times 10^{-6}$	H/m
Permeabilidad relativa del imán ( $\mu_r$ ).	1,1	
Separación entre imanes ( $\tau_f$ ).	0,05	m
Saturación del acero (Bmáx).	1.6	Teslas.
Densidad de imanes.	7800	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del acero ( $\rho_a$ ).	7900	kg/m <sup>3</sup>
Resistividad del acero.	$7.200 \times 10^{-7}$	$\Omega$ m/m
Espesor lámina núcleo.	0.0003	m
Espesor puente.	1,0000	mm
Abertura de las ranuras (ws).	0,004	m
Fracción de profundidad de ranura ( $\alpha_s$ ) $d_1+d_2/w_{th}$	0,25	
Temperatura ambiente	50	°C
Temperatura máxima del cable.	150	°C
<b>PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS.</b>		
<b>Magnéticos.</b>		
Anchura del diente en el fondo ( <b>w<sub>tb</sub></b> ).	0,008888	m
Anchura superior del diente ( <b>w<sub>t</sub></b> ).	0,011708	m
Anchura del fondo de ranura ( <b>w<sub>sb</sub></b> ).	0,006820	m
Razón del aspecto de ranura Ri ( <b><math>\alpha_s</math></b> ).	0,568451	m
<b>Eléctricos.</b>		
Velocidad eléctrica ( <b>w<sub>e</sub></b> )= (Nm/2)wm.	167,5516082	Rad/s
Paso de núcleos ( <b>T<sub>c</sub></b> ).	0,047124	m
Paso de ranuras ( <b><math>\tau_{si}</math></b> ).	0,015708	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>2</sub></b> ).	0,001111	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>1</sub></b> ).	0,001111	m
Profundidad diente ( <b>d<sub>2</sub>+d<sub>1</sub></b> ).	0,002222	m



Profundidad de diente donde se alojan los cables ( <b>d3</b> ).	0,019299	m
Número de ranura por fase ( <b>Nsp</b> )=Ns/Nph	8	
Número de ranuras por polo y fase ( <b>Nssp</b> )=Ns/NmNph.	1,000000	
Número de ranura por polo ( <b>Nsm</b> )=Ns/Nm.	3	
Paso angular de polo ( <b>∂p</b> ) =2π/Nm	0,785400	Rad
Paso angular de ranuras ( <b>∂s</b> ) = 2 π /Ns	0,261800	Rad
Ángulo eléctrico por ranura ( <b>∂se</b> ) =2p/Nsm	1,047200	Rad
Fracción entre polo y bobina ( <b>αcp</b> ) = int(Nspp)/Nspp	1,000000	
<b>Geométricos.</b>		
Arco interior de polo ( <b>τpi</b> ) = Ri∂p	0,047124	
Arco exterior de polo ( <b>τpo</b> ) = Ro∂p	0,094248	
Arco de núcleo interior ( <b>τci</b> ) = αcp·τpi	0,047124	
Arco de núcleo exterior ( <b>τco</b> ) = αcp·τpo	0,094248	
Arco interior de ranura ( <b>τsi</b> ) = Ri·∂s	0,015708	
Factor de distribución del bobinado ( <b>kd</b> )	1,000000	
Factor de paso (pitch factor) ( <b>kp=αcp</b> )	1,000000	
Factor de desviación de ranuras ( <b>ks</b> )=1-∂se/2π	0,833333	
Fracción de imán sobre toda superficie ( <b>αm</b> )	0,929265	
Factor de concentración de flujo ( <b>Cφ</b> )	0,963336	
Coeficiente de permeancia ( <b>Pc</b> )	2,076120	
Factor de pérdidas en bordes de iman ( <b>kml</b> )	1,250416	
Entrehierro efectivo para Carter ( <b>gc</b> )=2g+lm/μr	0,028182	
Coeficiente de Carter ( <b>kc</b> )	1,000077	
Área del entrehierro ( <b>Ag</b> )	0,004091	m <sup>2</sup>
Densidad de flujo en el entrehierro ( <b>Bg</b> )	0,724287	T
Anchura del estator detrás de la ranura ( <b>wb</b> )	0,019999	m
Número de cables por ranura ( <b>ns</b> ) conexión serie	10,071462	
Tensión máxima ( <b>emax</b> )	22	Voltios
Pico de corriente ( <b>Is</b> )	526,462766	Amperios
Corriente cada bobinado paralelo ( <b>Iph</b> )	17,424242	Amperios
Corriente de fase total ( <b>Iph</b> )	17,424242	Amperios
Área de conductor ( <b>As</b> )=wsb·d3	0,000130016	m <sup>2</sup>
Pico de densidad de corriente ( <b>Jc</b> )=Is/kcp·wsb·Jmax	1,000x10 <sup>7</sup>	A/ m <sup>2</sup>
Profundidad de la ranura ( <b>ds</b> )=d1+d2+d3	0,021521	m
Profundidad total de la ranura ( <b>ds</b> )=d1+d2+d3+dp	0,022521	m
Longitud axial del estator ( <b>L</b> )=ds+wb	0,042520	m
Flujo máximo por ranura ( <b>IBslmax</b> )	0,165394	T

Tabla 19: Características generador 24 ranuras.





<b>PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO (Núcleo laminado)</b>		
Longitud de la lámina equivalente	77,22	m
Pérdidas medias por unidad de volumen para una lámina:	374,313885	W/m <sup>3</sup>
Volumen de la lámina equivalente	0,000985	m <sup>3</sup>
Pérdidas medias para la lámina equivalente:	0,368723	W
<b>Pérdidas totales en los núcleos</b>	<b>0,737446</b>	<b>W</b>
<b>PÉRDIDAS EN LOS PUENTES</b>		
Espesor del puente	1,00	mm
Pérdidas medias por puente	0,0017	W/m <sup>3</sup>
<b>Pérdidas en todos los puentes del generador</b>	<b>0,0817</b>	<b>W</b>
<b>RESISTENCIAS E INDUCTANCIAS</b>		
Resistencia de ranura ( <b>Rs</b> )= $\rho \cdot ns^2(Ro-Ri)/kcpAs$	0,003115	
Resistencia de final de vuelta ( <b>Re</b> )= $\rho \cdot ns^2\pi(\tau co-\tau ci)/4kcpAs$	0,005765	Ohm
Resistencia cada bobinado paralelo ( <b>Rph</b> )= $2Nsp(Rs+Re)/c29$	0,142095	Ohm
Inductancia del entrehierro ( <b>Lg</b> )	9,591E-06	Henrios
Inductancia de la ranura ( <b>Ls</b> )	1,091E-05	Henrios
Inductancia de final de vuelta ( <b>Le</b> )	2,470E-07	Henrios
Inductancia cada bobina paralelo ( <b>Lph</b> )	3,320E-04	Henrios
Caída de tensión por rectificador	2,2	voltios
Caída de tensión por pérdidas	5,913835	voltios
Pérdidas en el cobre ( <b>Pr</b> )= $Nph \cdot lph^2 \cdot Rph \cdot c29$	<b>129,421526</b>	Wattios
Volumen total del estator ( <b>Vst</b> )	0,002885	m <sup>3</sup>
Peso del estator	22,794356	Kilos
Volumen totos imanes	0,000679	m <sup>3</sup>
Peso de imanes	5,292955	Kilos
Peso total motor	30,275442	Kilos
Volumen rotor	2,770E-04	m <sup>3</sup>
Peso del rotor	2,188132	Kilos
Pérdidas en el hierro ( <b>Pcl</b> )	11,397178	wattios
Rendimiento eléctrico ( <b>η</b> )	0,898650	
Área del imán ( <b>Am</b> )	0,004123	
Permeancia del imán ( <b>Pm</b> )	2,850E-07	
<b>CONSIDERACIONES TÉRMICAS</b>		
Conductividad térmica del cobre	3,8	wcm/cm2 <sup>o</sup> c
Conductividad térmica aislante	0,026	wcm/cm2 <sup>o</sup> c
Densidad del cobre	8,900E+00	kg/dm3
Coefficiente térmico superficial	70	W/m2k <sup>o</sup>
grosor aislante(total proporcional en una ranura)	0,868474	cm
grosor cobre (total proporcional en una ranura)	0,868474	cm
conductividad térmica total en una ranura	0,057385	wcm/cm2 <sup>o</sup> c



perdidas en el cobre por unidad de volumen	3,028E+02	w/kg
incremento de temperatura del núcleo de los cables a su superficie	43,730806	°C
incremento de temperatura de la superficie al aire	14,134590	°C
superficie total de ventilación	0,130805	m <sup>2</sup>
TEMPERATURA DE CARCASA EXTERIOR		
TEMPERATURA SUPERFICIE BOBINADOS	64,134590	°C
TEMPERATURA INTERIOR BOBINADOS	107,865396	°C
incremento de la temperatura	130	Cº
resistividad del cobre(75°C)	0,021700	Ohmios*mm <sup>2</sup> /m
resistividad del cobre(tº)	0,026950	Ohmios*mm <sup>2</sup> /m
sección de los cables	5,227273	mm <sup>2</sup>
diámetro de los cables	2,57983921	mm

Tabla 20: Características generador 24 ranuras II.





## 9 ENSAYOS REALIZADOS.

Se ha procedido a realizar los ensayos de vacío, carga, cortocircuito y reluctancia de los diferentes generadores.

Los ensayos de carga de duración larga en los que se pretende conocer la evolución de la temperatura de las distintas partes del generador se han realizado a una temperatura ambiente de 20 grados centígrados.

Cada generador se conectará al bornero, cada generador se compone de dos platos los cuales se conectarán en serie, es decir la salida del plato uno estará conectada con la entrada del plato 2. El neutro del plato 1 se conectará en estrella, mientras que la salida del plato 2 es la que se conectará al rectificador que, dependiendo del tipo de ensayo, se conectará de una determinada forma. Como se visualiza en las ilustraciones: ***Ilustración 40: Esquema de conexión. Ensayo en vacío. Ilustración 41: Esquema de conexión. Ensayo en cortocircuito. Ilustración 42: Esquema de conexión. Ensayo en carga.***

### 9.1 ENSAYO EN VACÍO.

Se conecta el motor de arrastre por medio del medidor de par al generador el cual queremos ensayar. La salida del generador se deja en abierto. Al estar el generador en circuito abierto no circulará corriente.

La salida del plato 2 es la que se conectará al rectificador dejándola en vacío.

El fin que se persigue con este ensayo es conocer las tensiones generadas a partir de unos parámetros fijados por el fabricante en su diseño. Se llevará al generador a su velocidad nominal (400 r.p.m.) obteniendo una determinada tensión en la salida del generador.

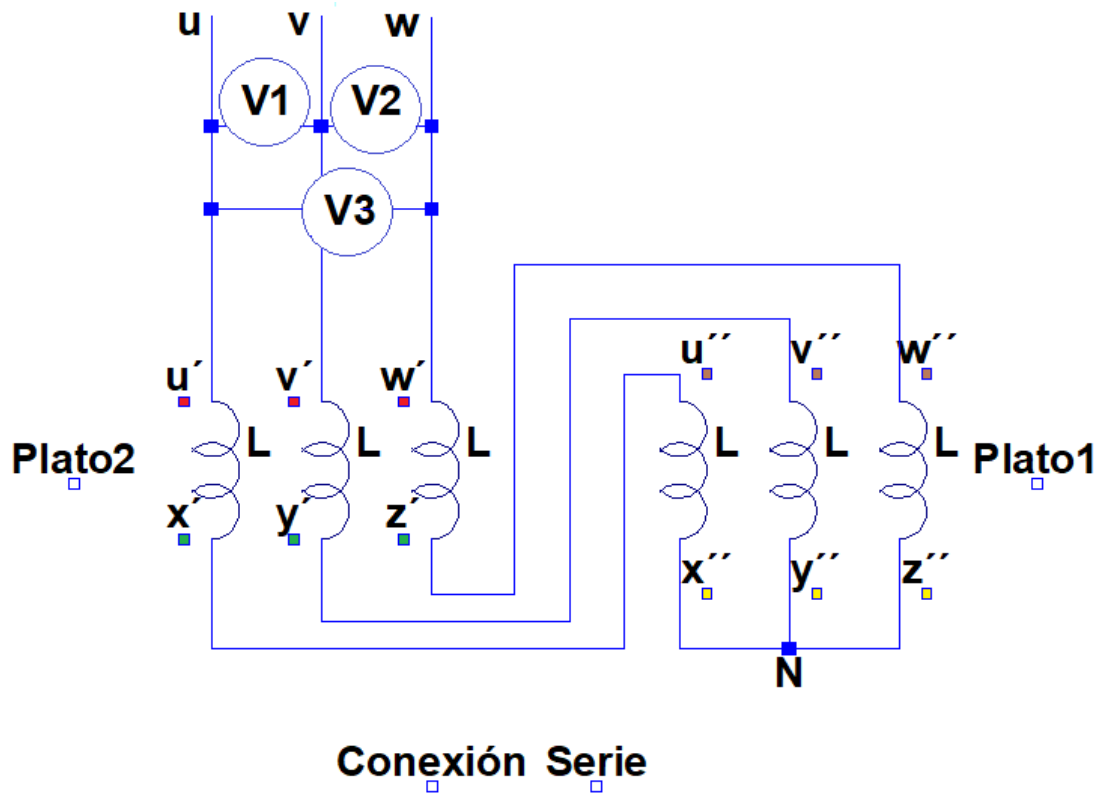


Ilustración 40: Esquema de conexión. Ensayo en vacío.

En este ensayo, dependiendo del generador, nos interesa principalmente obtener las tensiones instantáneas entre fases U-V, V-W, W-U.

Además, aparte de las tensiones, nos interesa conocer cómo evoluciona la tensión eficaz entre fases frente a la velocidad del generador; para ello se le ha aplicado una rampa de subida hasta llegar a la velocidad nominal del generador (400 r.p.m.).

CONDICIONES DEL ENSAYO.	DATOS A OBTENER.
Velocidad nominal: 400 r.p.m.	Gráfica tensiones-tiempo.
Se introduce una rampa de velocidad.	Gráfica tensiones-velocidad.

Tabla 21: Condiciones de ensayo y datos a obtener. Ensayo en vacío.

## 9.2 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

Con la misma disposición de los elementos, el único cambio que realizamos es cortocircuitar la salida del rectificador. Según el siguiente esquema.

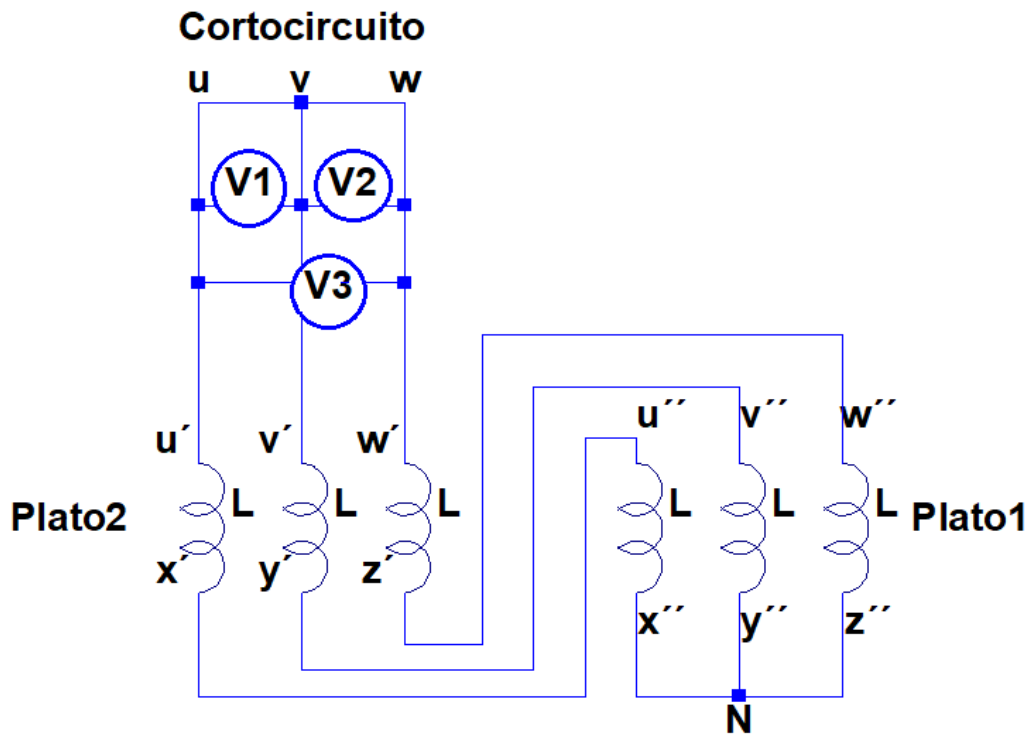


Ilustración 41: Esquema de conexión. Ensayo en cortocircuito.

El interés de este ensayo es conocer, sobre todo, las intensidades de fase. También representaremos las tensiones entre fases, aunque, basándonos en los principios teóricos ideales debe ser cero. No será cero al existir resistencia en los conductores.

Puesto que el generador está conectado en cortocircuito, la corriente que circule por el mismo va a ser elevada con un régimen de revoluciones pequeño. Con este ensayo se pretende alcanzar la corriente nominal del generador, según características descritas en anteriores apartados (17,42 A). La velocidad del motor que arrastra al generador estará limitada por la corriente que circule por este último. Se aumentará la velocidad progresivamente y de forma controlada para no superar la corriente nominal.

Las intensidades de fase se miden con las pinzas o sondas amperimétricas situadas en el bornero. El lugar de medición de las pinzas nos es indistinto debido a que la conexión de los platos es serie por lo que la corriente que circula es la misma.

CONDICIONES DEL ENSAYO.	DATOS A OBTENER.
Intensidad nominal: 17,42 A.	Gráfica tensiones-tiempo.
	Gráfica intensidades-tiempo.

Tabla 22: Condiciones de ensayo y datos a obtener. Ensayo en cortocircuito.

### 9.3 ENSAYO EN CARGA.

En este ensayo, uno de los más importantes y que más tiempo nos ha llevado, la colocación de dispositivos es la misma que en los anteriores ensayos.

La peculiaridad de este ensayo es la conexión de una carga en este caso electrónica. Con este ensayo se desea simular el comportamiento de una pequeña instalación eólica que suministra energía en un ámbito de pequeña potencia como es el doméstico. El esquema seguido es similar a los anteriores añadiendo la carga.

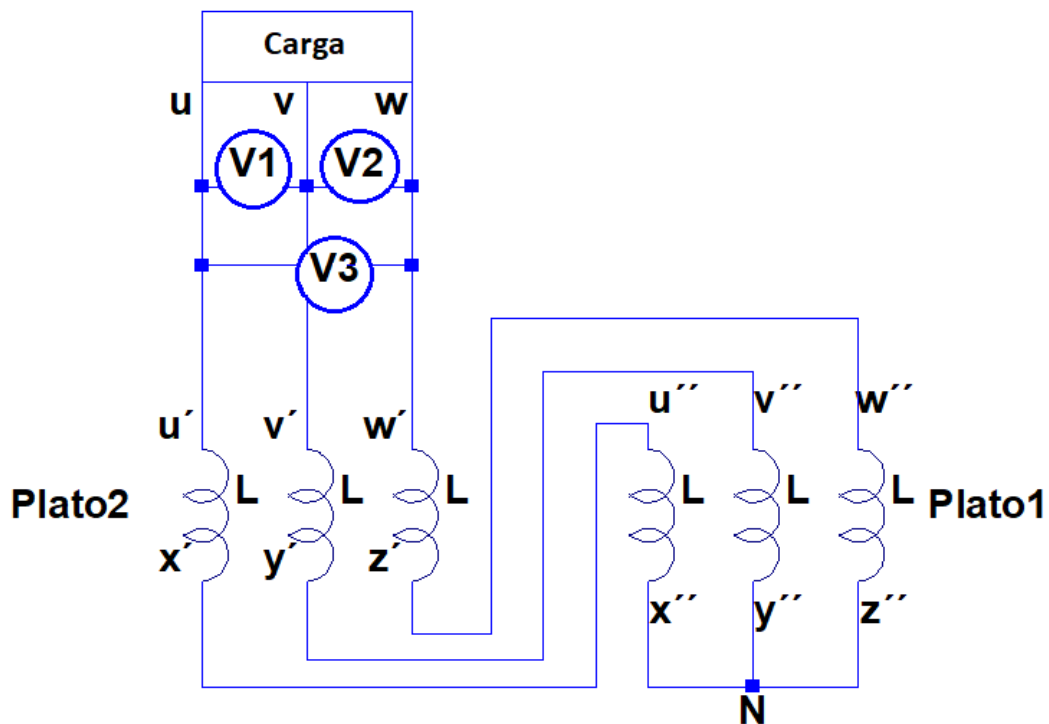


Ilustración 42: Esquema de conexión. Ensayo en carga.

De este ensayo nos interesa extraer datos de la evolución de la temperatura respecto al tiempo para una duración del ensayo de 4 horas, en concreto, obtendremos la temperatura del bobinado, estator y carcasa exterior.

Se realizará un ensayo de menor duración con el fin de obtener la tensión e intensidad en bornes del rectificador para garantizar que el ensayo se realiza en condiciones nominales de funcionamiento.

También se obtendrán datos de potencia mecánica y potencia eléctrica entre otros.

La tabla siguiente muestra las condiciones del ensayo y los datos recogidos más relevantes.

CONDICIONES DEL ENSAYO.	DATOS A OBTENER.
Velocidad nominal: 400 r.p.m.	Gráfica tensiones rectificadas-tiempo.
Intensidad nominal de la carga por canal: 7,73 A..	Gráfica intensidad rectificadas -tiempo.
	Potencia eléctrica rectificadas – tiempo.
Aplicación rampa de velocidad.	Potencia mecánica- velocidad.
	Potencia eléctrica – velocidad.
	Rendimiento - velocidad.
Temperatura ambiente 20 °C	Temperaturas – tiempo.

Tabla 23: Condiciones de ensayo y datos a obtener. Ensayo en carga.

## 9.4 ENSAYO DE RELUCTANCIA.

En este apartado explicaremos el principio teórico del denominado par de reluctancia, así como una breve descripción del procedimiento llevado a cabo para este ensayo.

### 9.4.1 PRINCIPIO TEÓRICO.

El par de reluctancia es un par inducido en un sistema ferromagnético, en presencia de un campo magnético, por el cual se obliga a que el sistema se alinee con dicho campo. Esto es producido debido a que al inducir el campo magnético externo otro campo interno dentro del sistema aparece un par entre ambos campos, el cual hace girar al sistema hasta que el campo interno y el externo se encuentran alineados, es decir, el imán tiende a posicionarse en el lugar donde existe más hierro y menos aire (donde la reluctancia es menor). Esta posición se considera posición de equilibrio. Dentro de estas posiciones de equilibrio, existen dos tipos, representados en la ilustración 43:

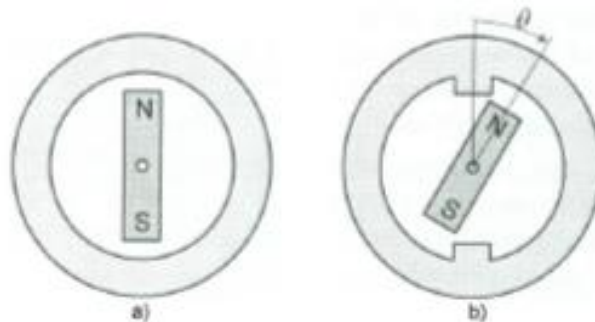
- ✓ Posición de equilibrio estable: Cuando en una perturbación en la posición del rotor, el campo magnético tiende a quedarse en esa posición. Es decir, hay que “vencer” una fuerza que impide el movimiento.
- ✓ Posición de equilibrio inestable: Al contrario que antes, en esta posición el rotor se mantiene fijo en la posición, pero cuando se produce una



perturbación, el campo magnético tiende a llevar al rotor hasta otra posición.

Con el fin de ilustrar este fenómeno nos vamos a ayudar del siguiente ejemplo: Se considera un imán en forma de barra que tiene la opción de girar libremente alrededor de su centro y que está situado en el interior de un anillo de acero fijo a la superficie (ilustración 43 a)). Este anillo representa el estátor y el imán el rotor, separados por un entrehierro.

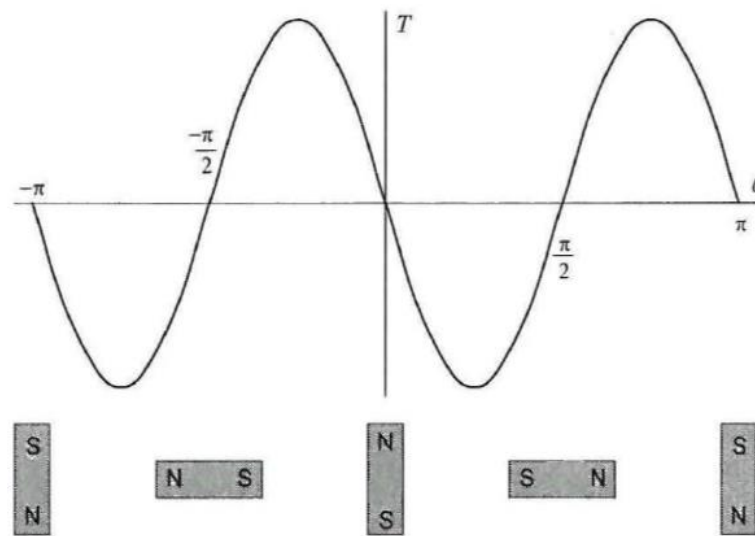
En estas condiciones el imán no tiene una posición de reposo preferida, dado que el imán experimenta la misma fuerza de atracción del anillo independientemente de su dirección, es decir, el imán no experimenta ninguna fuerza neta y no se produce ningún par.



*Ilustración 43: Imán libre de girar en el interior de un anillo. (“Brushless Permanent-Magnet Motor Design”, por Duane C. Hanselman. Editorial McGraw-Hill, 1994.)*

Ahora consideremos un anillo que posee dos salientes diametralmente opuestos (Ilustración 43). De la misma forma que antes, los extremos del imán experimentan la misma fuerza de atracción, pero en sentido contrario. En cambio, ahora el imán al girar alrededor de su centro experimenta una fuerza que tiende a alinearse con los salientes (polos) del anillo. Esto se debe a que la fuerza de atracción entre el imán y el anillo aumenta sustancialmente al disminuir la distancia entre ellos, es decir, al disminuir el entrehierro, cosa que ocurre cuando el imán se sitúa frente a los salientes. Al girar el imán libremente, la componente tangencial de esta fuerza produce un par, siendo este par el denominado par de reluctancia.

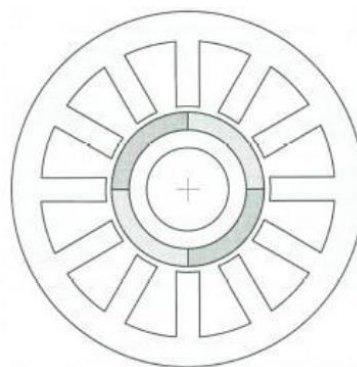
En la siguiente figura se ilustra de manera esquemática la variación de ese par en función de la posición, siendo la posición de equilibrio estable cuando el imán está alineado con los polos ( $\Theta = 0$  y  $\Theta = \pm\pi$ ) y la posición de equilibrio inestable cuando el imán se encuentra en la posición intermedia entre los polos ( $\Theta = \pm\pi/2$ ).



**Ilustración 44: Par experimentado por el imán de la Ilustración 43. (“Brushless Permanent-Magnet Motor Desing”, por Duane C. Hanselman. Editorial McGraw-Hill,1994).**

En el caso de los motores brushless de flujo axial, el par de reluctancia es un elemento parásito producto de la no uniformidad en la superficie del estátor, alineándose el rotor en las posiciones donde exista un mayor par de reluctancia, es decir, las zonas en las que el entrehierro es menor. El valor del par de reluctancia será mayor en los casos que la máquina opere en circuito abierto.

Con la arquitectura de los motores brushless de “ranura-diente”, la reluctancia no es uniforme a lo largo de toda la dimensión del estator, dado que el efecto sobre el imán varía en función de la posición respecto al diente y ranura en la que esté, creando las ranuras el llamado par de reluctancia. Este fenómeno se ilustra mediante una máquina de 4 polos y 12 ranuras (Ilustración 45).



**Ilustración 45: Motor brushless de 12 ranuras rectas y 4 polos. (“Brushless Permanent-Magnet Motor Desing”, por Duane C. Hanselman. Editorial McGraw-Hill,1994).**

En un comportamiento ideal, al representar gráficamente el par de reluctancia respecto a la posición, tomando como ángulo cero una determinada posición, la pendiente de la curva será diferente cuando el imán esté enfrente al diente y aumentará cuando esté en la zona de la ranura (Figura 24). Estas pendientes, cuando son ascendentes, indican el par que se debe vencer, mientras que cuando las pendientes son descendentes, se debe contrarrestar el par ejercido por la máquina contrario al movimiento deseado, intentando volver a la posición de reposo. El periodo de esta onda resultante vendrá dado por la siguiente expresión medida en grados:

$$T = \frac{360^\circ}{\text{número de ranuras}}$$

Ecuación 3: Periodo del par de la reluctancia.

Tipo de motor según las ranuras	Periodo teórico (grados)
24 ranuras	15°
27 ranuras	13.33 °

Tabla 24: Periodo en función de las ranuras de cada motor.

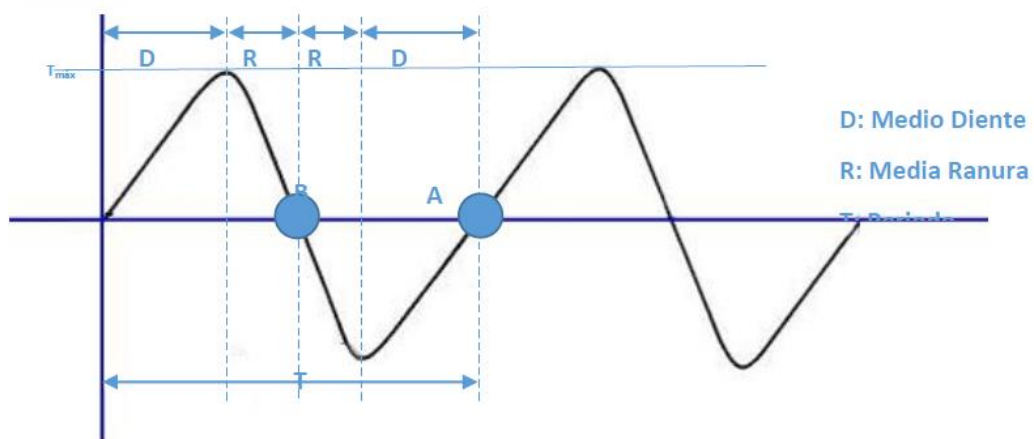


Ilustración 46: Curva Par-Posición.

Los ensayos de reluctancia han entrañado una dificultad notable a la hora de obtener resultados acordes con el principio teórico debido a los elevados valores de par de reluctancia presentes en nuestros generadores. Para mitigar este par, se ha instalado una reductora de par, con uniones rígidas en los acoplamientos entre la medidora de par y el generador a ensayar, de manera que se pudiera “aguantar” mejor la fuerza ejercida por el par de reluctancia.



Estos ensayos se han planteado desde el inicio de una única forma:

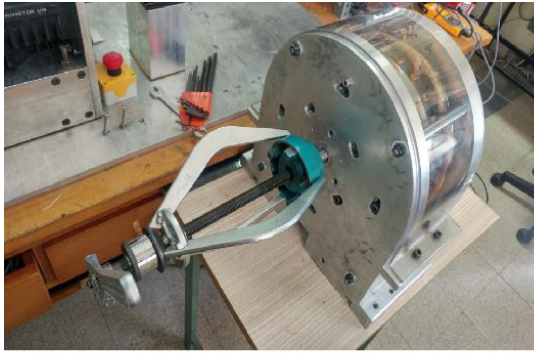
- ✓ Realizarlos de modo manual: Ayudado por un pequeño volante, se ha ido moviendo poco a poco para obtener los valores de par de reluctancia en cada posición. Han sido los más satisfactorios en cuanto a los resultados al poder controlar mejor el movimiento rotacional del rotor.

Para llevar a cabo las medidas pertinentes, ha sido necesario utilizar los siguientes instrumentos de medida:

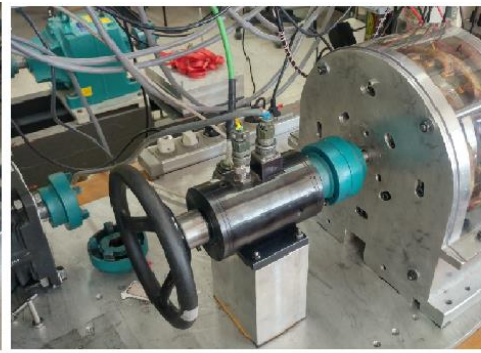
- ✓ Medidor de par, con el que se ha medido el par de reluctancia.
- ✓ Multiplicadora.
- ✓ Encoder para medir la posición del rotor.

#### **9.4.2 PUESTA A PUNTO DEL BANCO.**

A continuación, se muestra una serie de imágenes que muestran el procedimiento seguido para la realización del ensayo de reluctancia.



a)



b)



c)



d)

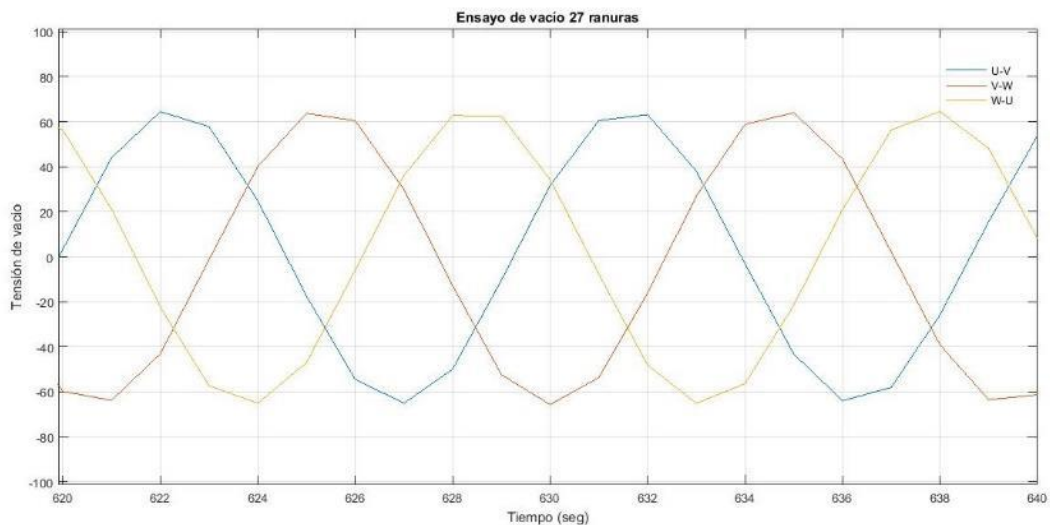
*Ilustración 47: a) Extracción del engranaje mediante el extractor. b) Montaje del banco de ensayos sin la multiplicadora. c) Separación de los estatores del generador para desfasar el ranurado. d) Montaje del banco de ensayos con la multiplicadora.*

## 10 RESULTADOS.

El siguiente epígrafe trata de mostrar una serie de resultados producto de los datos obtenidos. Se ilustrarán las gráficas mencionadas en el apartado anterior.

### 10.1 ENSAYO EN VACÍO.

#### 10.1.1 GENERADOR DE 27 RANURAS.



*Ilustración 48: Generador de 24 ranuras. Ensayo en vacío.*

Se observa una señal senoidal algo que se esperaba puesto que estamos ante un sistema trifásico equilibrado con un desfase de 120 grados entre sus tensiones.

El ensayo de vacío para este generador de 27 ranuras nos da como resultado unas tensiones instantáneas entre fases que oscilan entre + 60 V y -60 V. Estos resultados son coherentes ya que si nos vamos a la tabla de características vemos que el valor eficaz de la tensión de fase es de 22 V

$$V_o = \sqrt{2} \cdot V_{ef}$$

*Ecuación 4: Cálculo valor eficaz.*

$$V_{f-f} = \sqrt{2} \cdot 22 \cdot \sqrt{3} = 53.88V$$

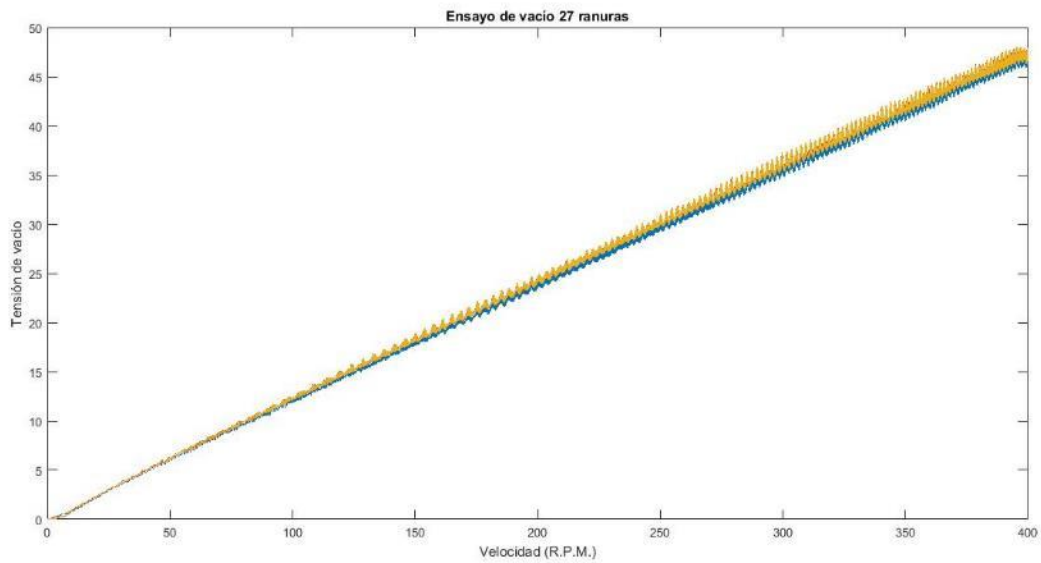


Ilustración 49: Rampa tensión-velocidad. Generador 27 ranuras. Ensayo en vacío.

En la gráfica podemos observar la variación del valor eficaz de la tensión de línea respecto de la velocidad aplicando una rampa de subida de velocidad. Este resultado era de esperar ya que la tensión generada es proporcional a la velocidad del generador. La rampa a la que ha sido sometido el generador comienza desde 0 hasta la velocidad nominal del generador 400 r.p.m.

Se obtiene una tensión máxima de unos 48 V.

### 10.1.2 GENERADOR DE 24 RANURAS.

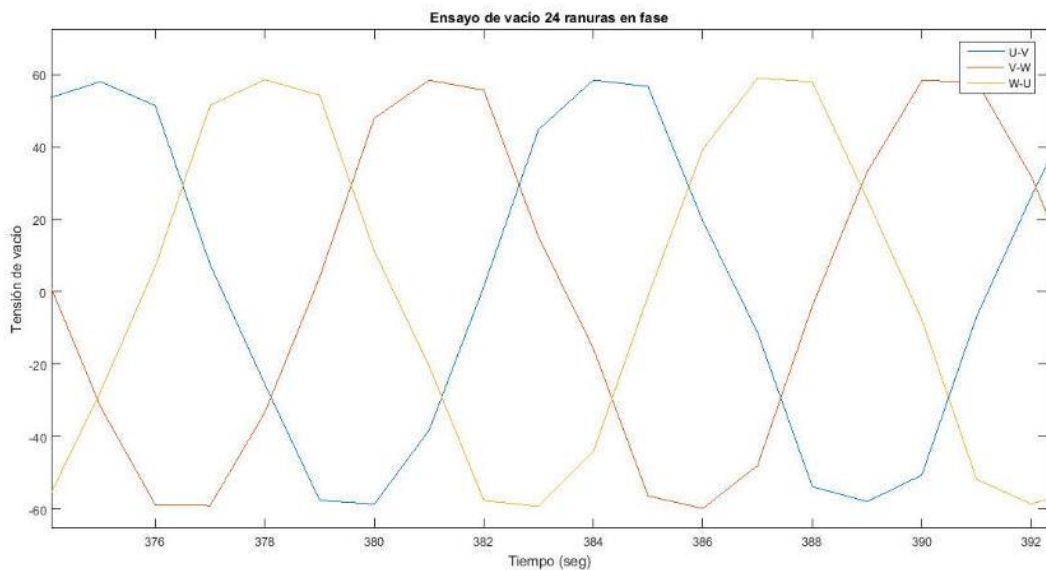
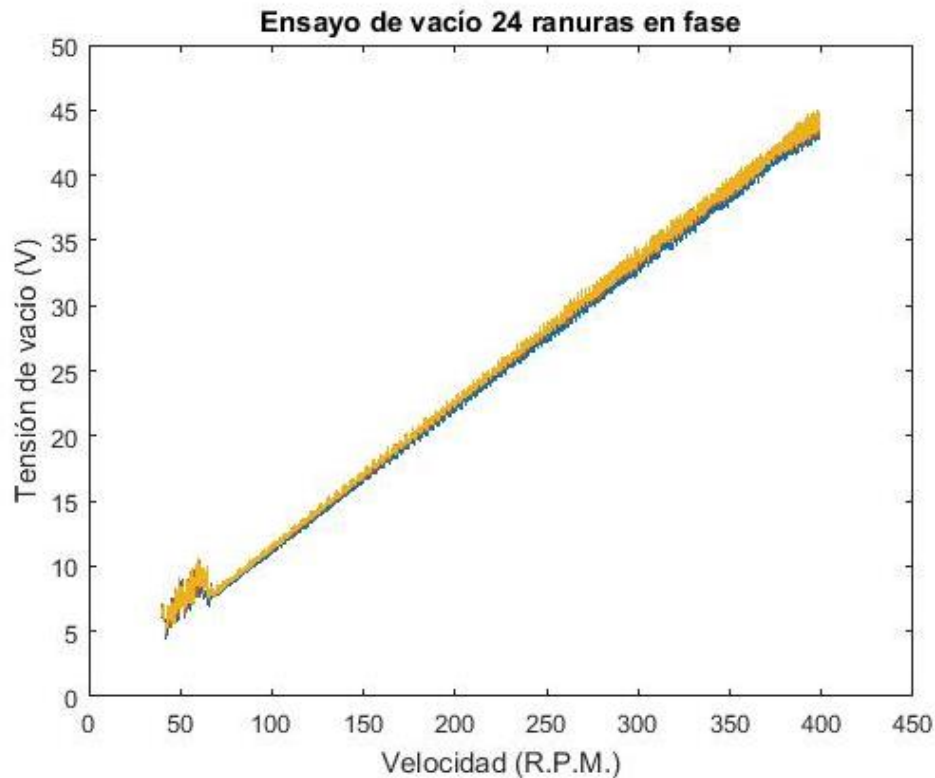


Ilustración 50: Generador 24 ranuras. Ensayo en vacío.



A la vista de la imagen se aprecia un sistema trifásico compuesto por tres tensiones monofásicas de igual frecuencia y amplitud y por consiguiente mismo valor eficaz, que presentan una diferencia de fase entre ellas de  $120^\circ$  eléctricos. Se aprecia un desfase simétrico lo que da lugar a que estamos ante un sistema equilibrado.

En las condiciones ya mencionadas para este ensayo las tensiones entre fase instantáneas obtenidas son de +58 V y -58 V aproximadamente.



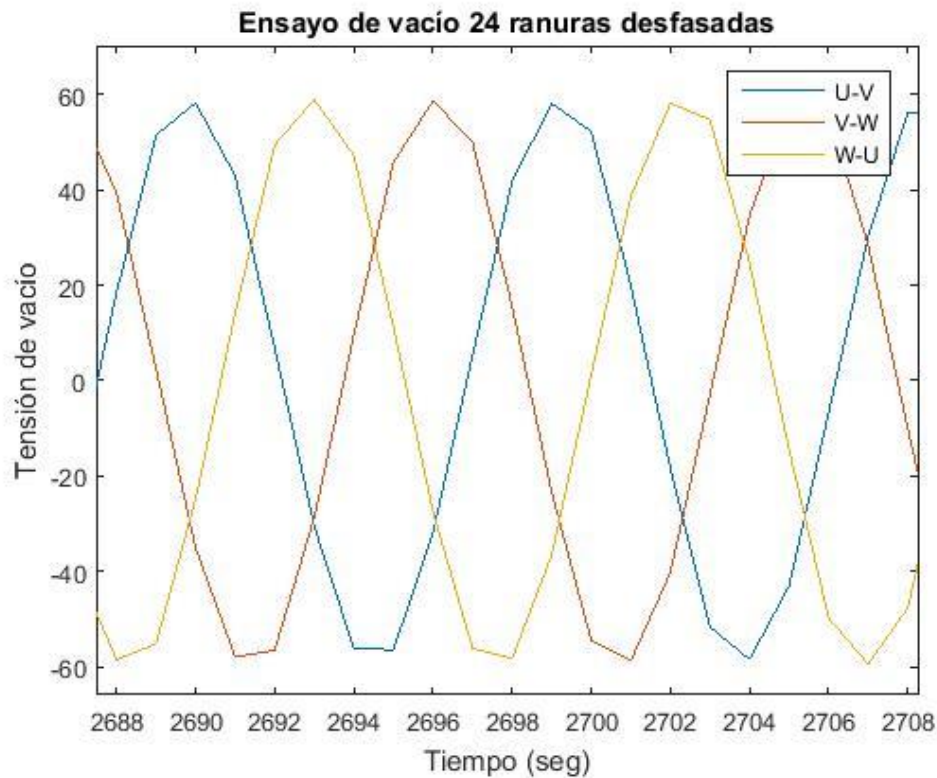
*Ilustración 51: Rampa tensión-velocidad. Generador 24 ranuras en fase. Ensayo en vacío.*

Bajo las condiciones mencionadas anteriormente se observa una variación inicial producida por el elevado par de reluctancia que presenta este prototipo de 24 ranuras en fase. A medida que aumentamos el régimen de revoluciones de la máquina la rampa se estabiliza en gran medida por la inercia adquirida por la misma y que vence el par de reluctancia que presentaba en un principio.

Una vez dicho lo más relevante de esta gráfica, también destacar la proporcionalidad que se observa entre la velocidad y la tensión de vacío.

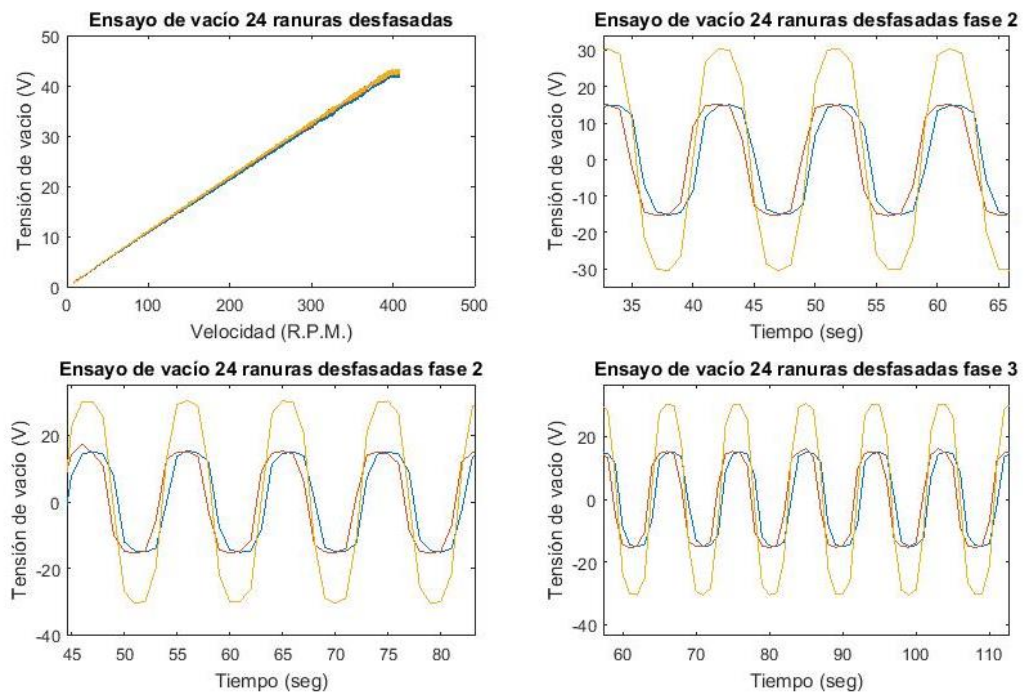


## 10.1.3 GENERADOR DE 24 RANURAS DESFASADAS.



*Ilustración 52: Generador de 24 ranuras desfasadas. Ensayo en vacío.*

Se aprecia una onda senoidal trifásica no tan explícita como en los dos casos anteriores debido al, entre otras cosas, número de datos tomados que en este caso es inferior. De todas formas, el valor de pico alcanzado es similar al de los casos anteriores con un valor próximo a los  $\pm 58$  V.



*Ilustración 53: Rampa velocidad-tensión (arriba izquierda). Tensión-velocidad del plato 1 y 2 y suma de ambos; fase 1 (arriba derecha). Tensión-velocidad del plato 1 y 2 y suma de ambos; fase 2 (abajo izquierda). Tensión-velocidad del plato 1 y 2 y suma de ambos; fase 3 (abajo derecha).*

En estas cuatro gráficas se ha representado la tensión de vacío frente a la velocidad y la tensión de vacío de cada uno de sus platos, así como la suma. Esta última representación se ha realizado para cada una de las fases. En el que se puede observar un sistema eléctrico trifásico equilibrado.

El por qué de la representación de estas tres gráficas nuevas respecto a los anteriores ensayos es para justificar el desfase que se presenta en las tensiones como consecuencia del desfase de los estatores de la máquina.

La suma de la tensión de cada plato nos da como resultado la tensión instantánea total de cada fase.

## 10.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.

### 10.2.1 GENERADOR 27 RANURAS.

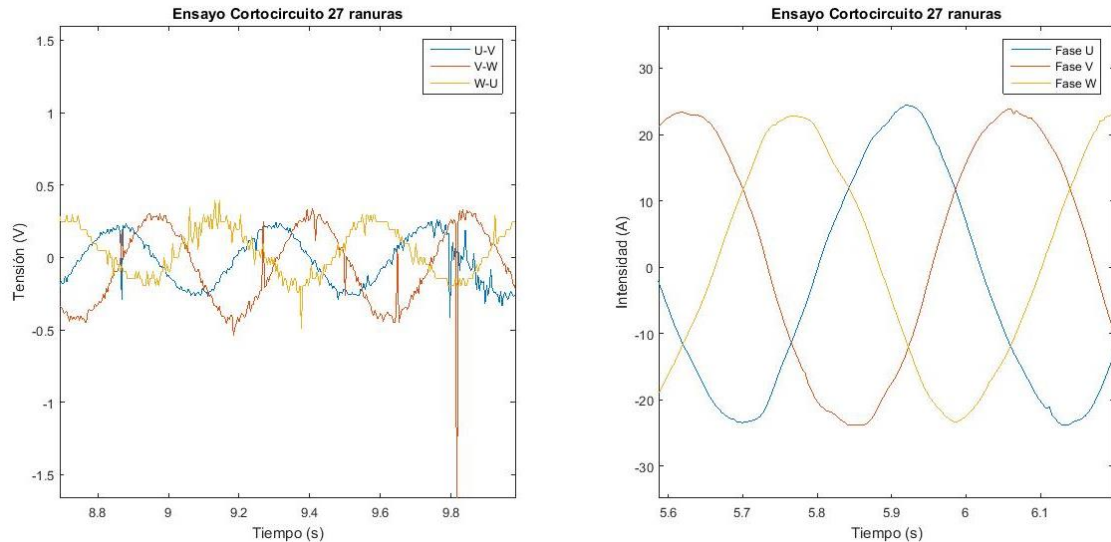


Ilustración 54. Tensiones-tiempo (izquierda). Corrientes-tiempo (derecha). Ensayo en cortocircuito. Generador 27 ranuras.

En la ilustración de la derecha se observa un sistema trifásico compuesto por tres corrientes monofásicas de igual frecuencia y amplitud y por consiguiente mismo valor eficaz, que presentan una diferencia de fase entre ellas de  $120^\circ$  eléctricos. Se aprecia un desfase simétrico lo que da lugar a que estamos ante un sistema equilibrado.

La velocidad a la que se ejecutó este ensayo fue a 34 r.p.m., una velocidad limitada por la corriente que recorre la fase. Resultado coherente debido a que si observamos la tabla de características de este prototipo vemos que es de 17,42 A. Por lo que si lo multiplicamos por la raíz de dos nos da como resultado 24,64 A un resultado muy similar al mostrado en las gráficas.

El gráfico de tensión que se observa no es lo suficientemente nítido debido al bajo régimen de revoluciones al que gira la máquina.

## 10.2.2 GENERADOR 24 RANURAS.

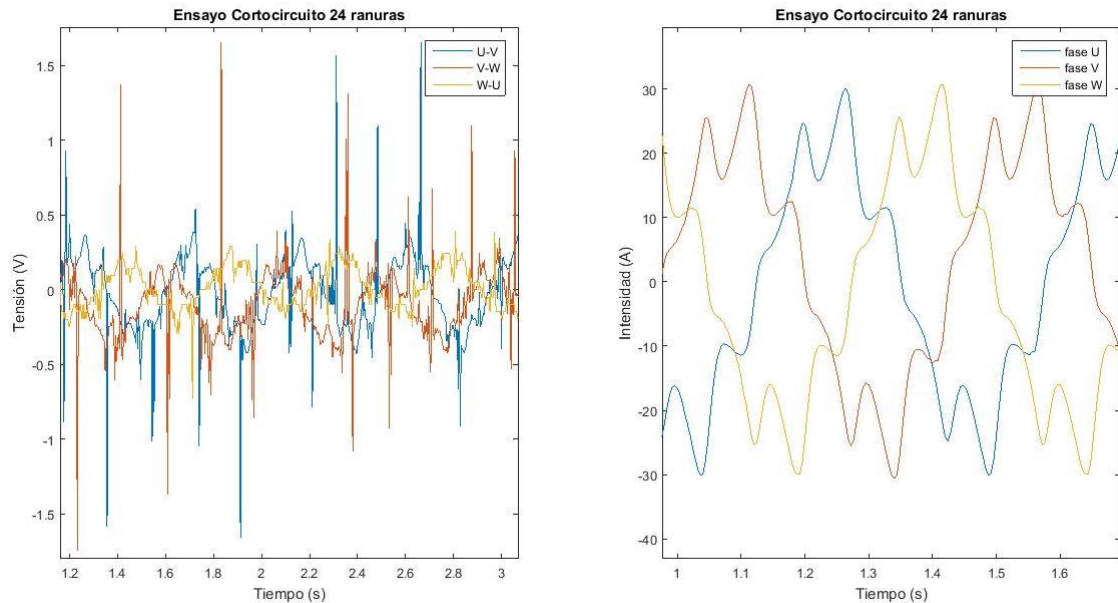


Ilustración 55. Tensión-tiempo (izquierda). Intensidad-tiempo (derecha). Ensayo en cortocircuito. Generador 24 ranuras.

En cuanto a la tensión (izquierda) se observa que sucede algo parecido al caso anterior o incluso algo más pronunciado. Pese a ello, esta gráfica no es de mucho interés ya que es un ensayo en cortocircuito y nos interesa más las corrientes.

A la derecha, se ha representado la intensidad frente al tiempo en el ensayo de cortocircuito, en este caso, es más complicado apreciar una señal pura senoidal, pero sí que responde a un mismo patrón que se repite en el tiempo pese a lo singular de su forma. Lo que podemos suponer que estamos ante un sistema trifásico equilibrado. El valor de pico que se alcanza ronda los 30 A.

La peculiaridad de esta gráfica de intensidad reside en el par de reluctancia ejercido por la máquina. Como hemos podido comprobar en el ensayo de reluctancia, en determinadas posiciones del generador se crea un par incontrolable manualmente, esto en el motor de arrastre también está presente, provocando un pico de intensidad producto del aumento del régimen de giro en esa determinada posición. De ahí que la intensidad obtenida sea de 30 A pese a que en la tabla de características (**Tabla 19: Características generador 24 ranuras.**) muestre 17,42 A eficaces que si aplicamos la ecuación 3 (**Ecuación 4: Cálculo valor eficaz.**) obtenemos un valor instantáneo o de pico de 24,64 A.

Este ensayo se realizó a una velocidad algo inferior a la máquina anterior, en este caso fue a 33 r.p.m.

### 10.2.3 GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.

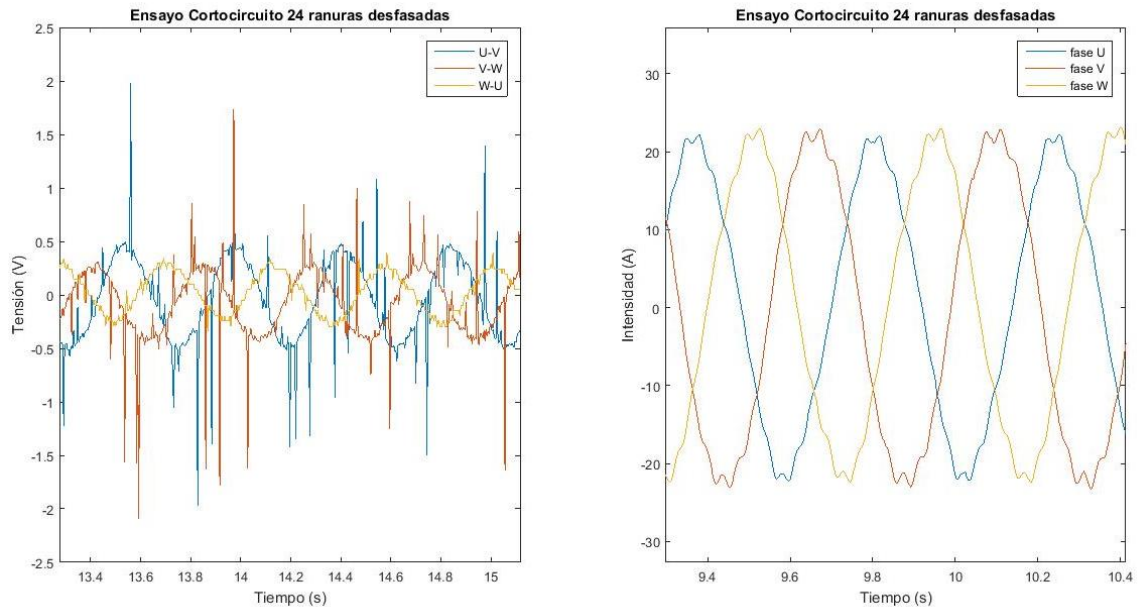


Ilustración 56: Tensión-tiempo (izquierda). Intensidad-tiempo (derecha). Ensayo en cortocircuito. Generador 24 ranuras desfasadas.

La tensión que se observa en la ilustración de la izquierda sigue la misma línea que los otros dos prototipos ensayados, y como ya se ha hecho constar, es debido al bajo régimen de revoluciones al que está sometida la máquina al realizarse el ensayo de cortocircuito.

Como podemos observar en la gráfica de la derecha, se aprecia, como en los anteriores, un sistema trifásico equilibrado en intensidades, que no es una onda senoidal perfecta, formado por tres corrientes alternas monofásicas desfasadas  $120^\circ$  eléctricos. Con un valor de pico de unos 22 A. Se aprecia mejor una señal senoidal que en el caso anterior pese a la peculiaridad de la onda en sus extremos fruto de la reluctancia, pero en menor medida. El ensayo se realizó a una velocidad de giro de 33 r.p.m.

Si comparamos el resultado obtenido (el cual es instantáneo) y lo comparamos con el mostrado en la tabla (**Tabla 19: Características generador 24 ranuras.**) podemos apreciar que es muy similar, siempre y cuando realicemos su cálculo mediante la ecuación (**Ecuación 4: Cálculo valor eficaz.**).

El hecho de que la forma de onda no sea senoidal perfecta es debido a la compensación del par de reluctancia que hemos conseguido con el diseño del generador.

### 10.3 ENSAYO EN CARGA.

#### 10.3.1 GENERADOR DE 27 RANURAS.

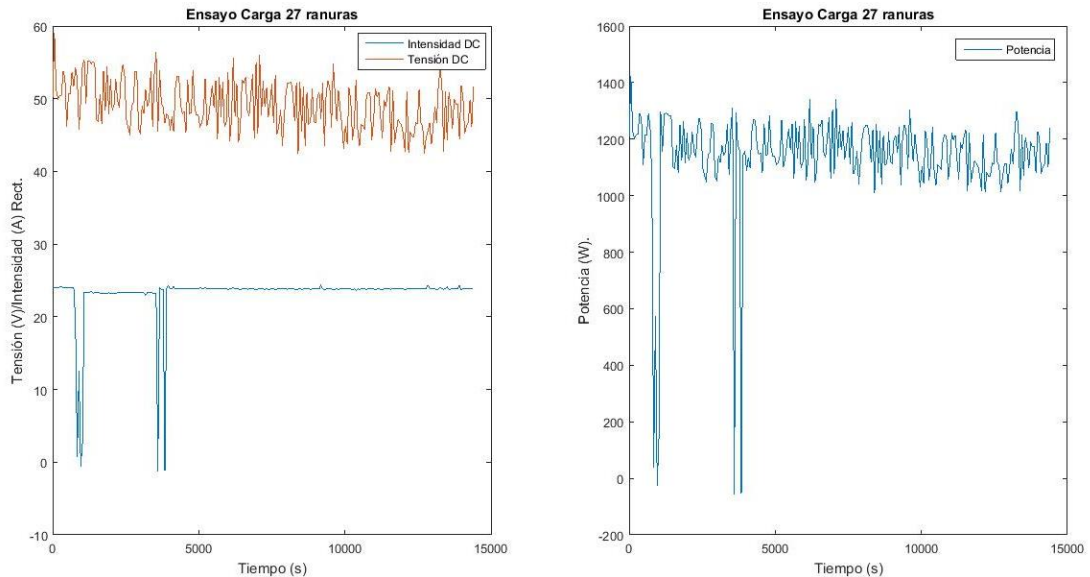


Ilustración 57: Tensión/Intensidad-tiempo (izquierda). Potencia-tiempo (derecha). Ensayo en carga. Generador 27 ranuras.

Este ensayo en carga tiene como propósito corroborar que, bajo unas condiciones nominales (velocidad: 400 r.p.m. e intensidad de la carga electrónica: 7,73 A; por canal) se obtiene los mismos valores de intensidad, tensión y potencia que los mostrados en la tabla de características del generador de 27 ranuras. **Tabla 17: Características generador 27 ranuras.**

Y si nos fijamos, pese a la variación que se observa en la tensión y potencia estos valores tiende a unos 50 V y 1170 W, respectivamente. Estos valores se acercan mucho a los mostrados en la tabla de características. **Tabla 17: Características generador 27 ranuras.**

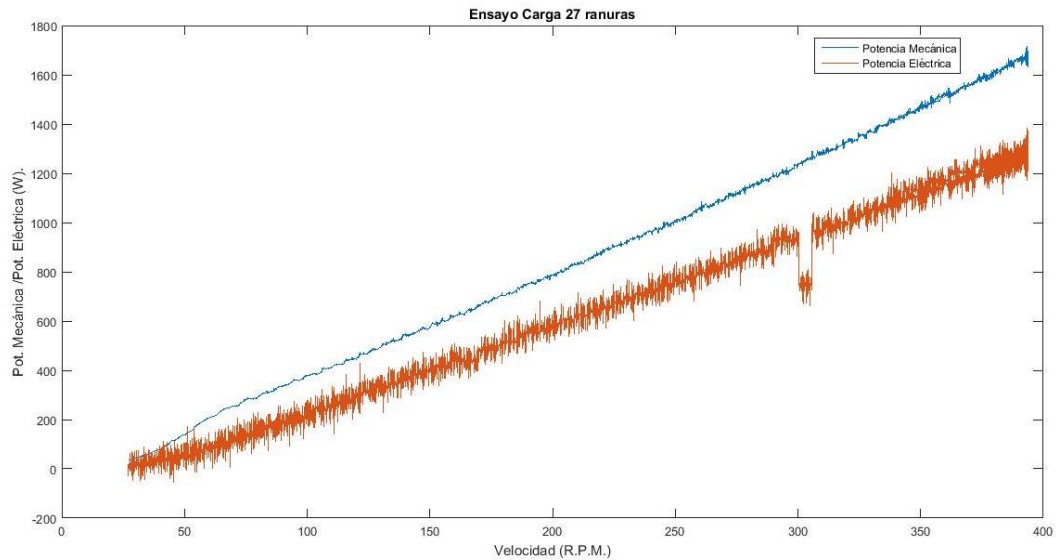
La intensidad rectificadora que se obtiene está en torno a los 24 amperios.

Se observan al menos dos picos en los que la intensidad, y por consiguiente la potencia, descienden de forma brusca, esto es debido a que la sonda de intensidad se le agotó la batería siendo sustituida posteriormente. El rendimiento se ha calculado según la expresión:

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potencia eléctrica}}{\text{Potencia mecánica}} \times 100$$

Ecuación 5: Cálculo del rendimiento.

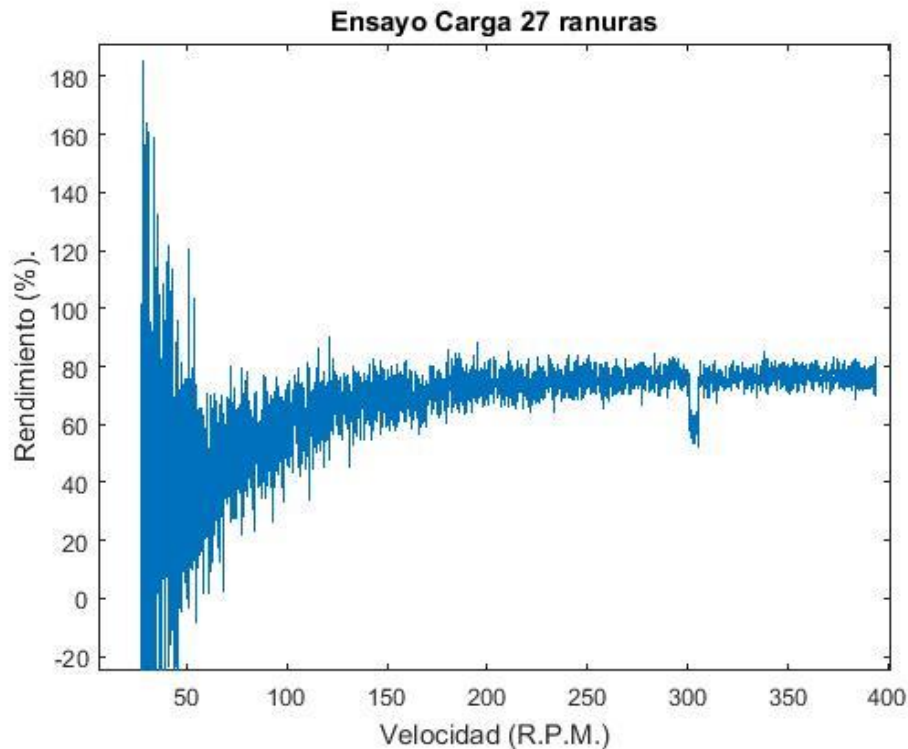




*Ilustración 58: Rampa Potencia-velocidad. Ensayo en carga. Generador 27 ranuras.*

Se ha querido representar la potencia mecánica y la potencia eléctrica aplicando una rampa de subida de velocidad partiendo desde cero hasta la velocidad nominal de 400 r.p.m. No nos sorprende que la rampa de potencia mecánica este por encima puesto que la potencia a la entrada tiene que ser mayor a la de la salida, debido a que existen pérdidas en el proceso. Esta gráfica nos permite conocer el rendimiento frente a la velocidad.

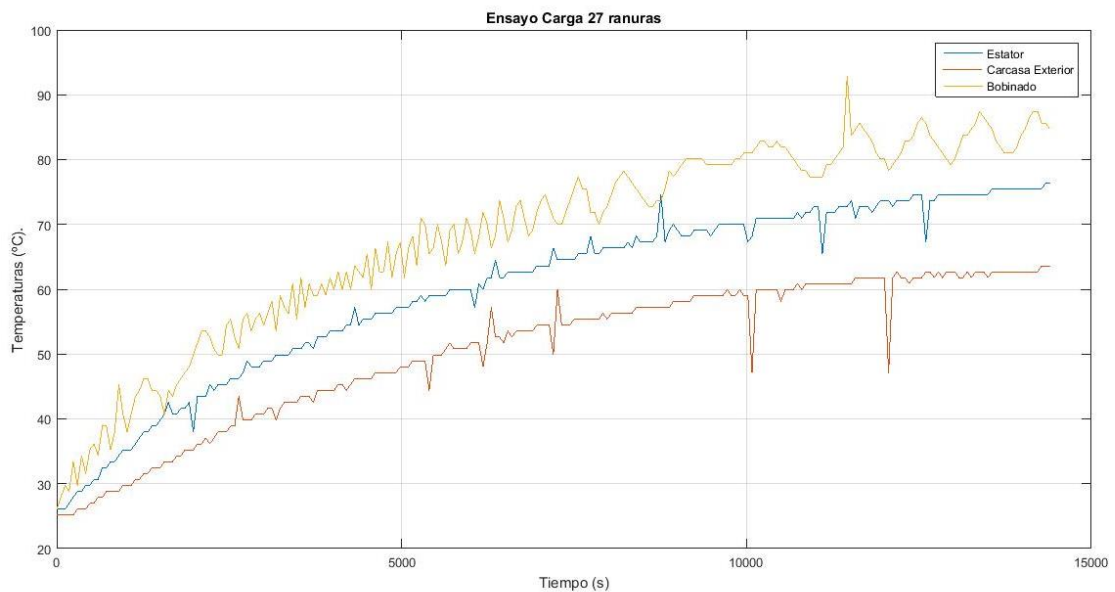
Se contempla un valor de potencia mecánica y potencia eléctrica en condiciones nominales de 1600 W y 1300 W, respectivamente.



*Ilustración 59: Rendimiento aplicando una rampa de velocidad. Ensayo en carga. Generador 27 ranuras.*

En la figura podemos observar la curva de rendimiento del generador de 27 ranuras en carga para una rampa de subida de hasta 400 r.p.m. Se observa un transitorio debido, posiblemente, a que a bajo régimen de giro la tensión y otros parámetros tienden a variar, a medida que aumentamos la velocidad la adquisición de datos se estabiliza y podemos afirmar que el rendimiento del generador es del 78 % aproximadamente.





*Ilustración 60: Evolución de la temperatura. Ensayo en carga. Generador de 27 ranuras.*

En la ilustración 54 podemos analizar la evolución de la temperatura de las diferentes partes del generador de 27 ranuras bajo las condiciones nominales ya citadas. En este ensayo de carga se han representado la temperatura del bobinado, estator y carcasa exterior durante un tiempo de 4 horas.

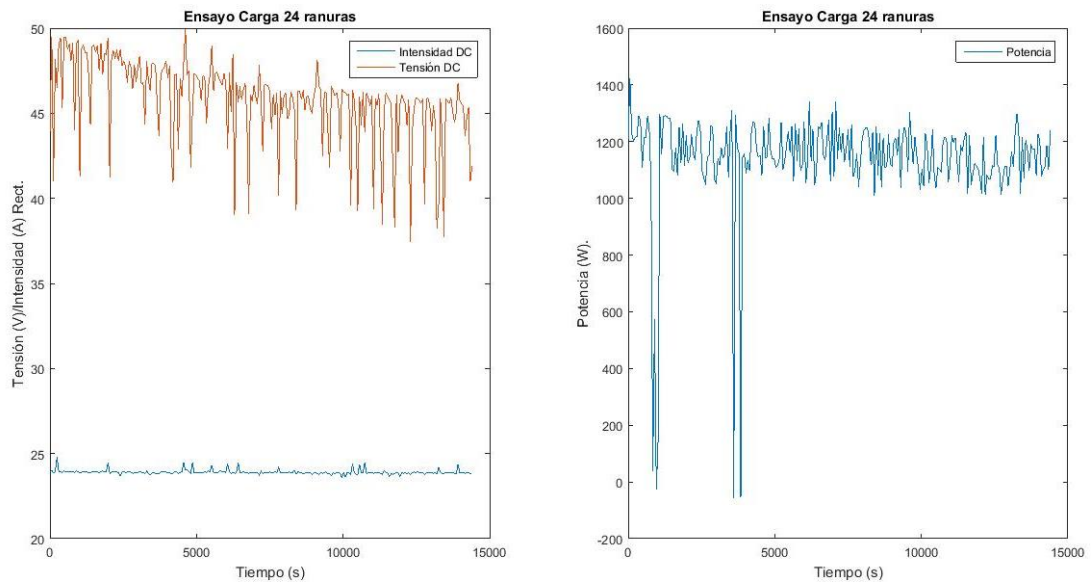
Como no podía ser de otra manera, la mayor temperatura se da en el bobinado debido a que por el circula la intensidad causante del aumento de temperatura, no solo en esa parte del generador si no en el resto de los componentes también.

Analizando la gráfica se contempla un transitorio hasta los 10000 segundo, momento a partir del cual la gráfica tiende al estacionario. Esta situación sucede en las tres partes analizadas del generador.

La temperatura ambiente bajo la que transcurrió el ensayo fue de 20° C.

La temperatura final alcanzada por el bobinado, estator y carcasa fue de 82° C, 75° C y 62° C.

### 10.3.2 GENERADOR 24 RANURAS.



*Ecuación 6: Tensión/Intensidad-tiempo (izquierda). Potencia-tiempo (derecha). Ensayo en carga. Generador 24 ranuras.*

Con el mismo objeto explicado en el apartado anterior y bajo las mismas condiciones (las nominales) se aprecia que la tensión continua, pese a que traza un pequeño descenso, el valor al que tiende es de 47 V. La intensidad en continua que se divide es de unos 24 A. Si nos vamos a la tabla (**Tabla 17: Características generador 27 ranuras.**) y comparamos resultados, nos daremos cuenta de que son muy similares.

En cuanto a la potencia obtenida es el producto de la tensión e intensidad por lo que si los resultados de éstos son aceptables, también lo serán los de potencia. El valor que se puede divisar es de unos 1200 W aproximadamente.

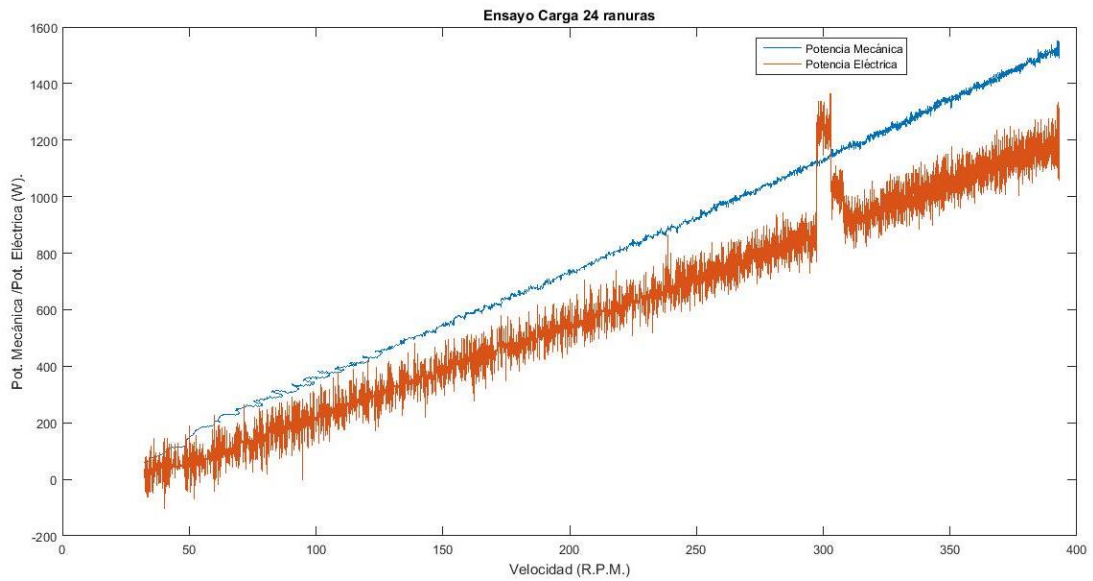


Ilustración 61: Rampa Potencia-velocidad. Ensayo en carga. Generador 24 ranuras.

En la ilustración 55 se expone la gráfica de potencia, tanto mecánica como eléctrica, frente a la velocidad del generador de 24 ranuras. Como en el caso anterior se ha aplicado una rampa de subida que va desde 0 hasta la velocidad nominal de 400 r.p.m. Fijándonos se aprecia una potencia mecánica de 1480 W y una potencia eléctrica de 1200 W ambos valores se obtiene a la velocidad de giro nominal.

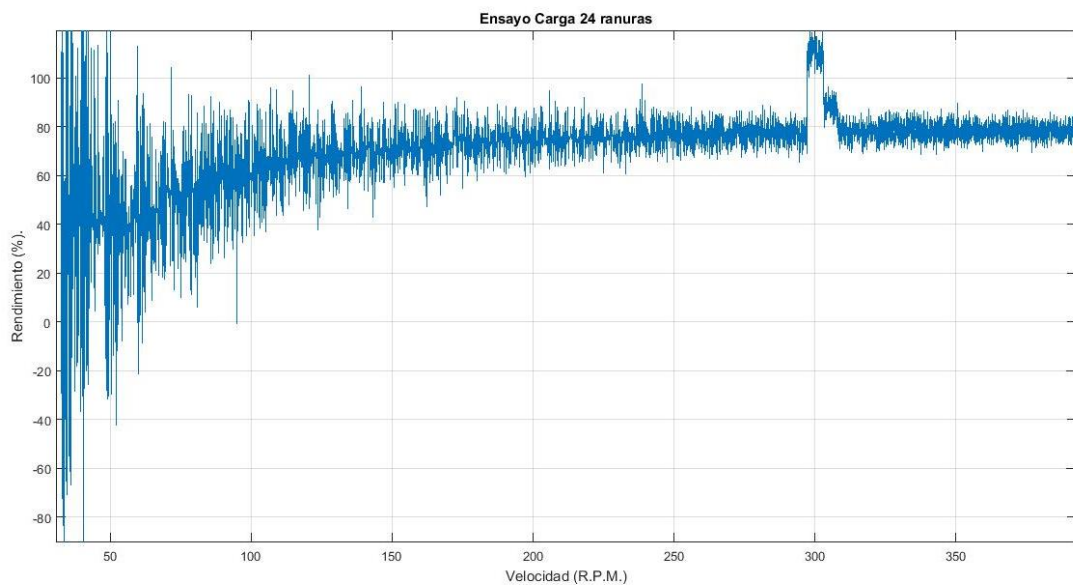
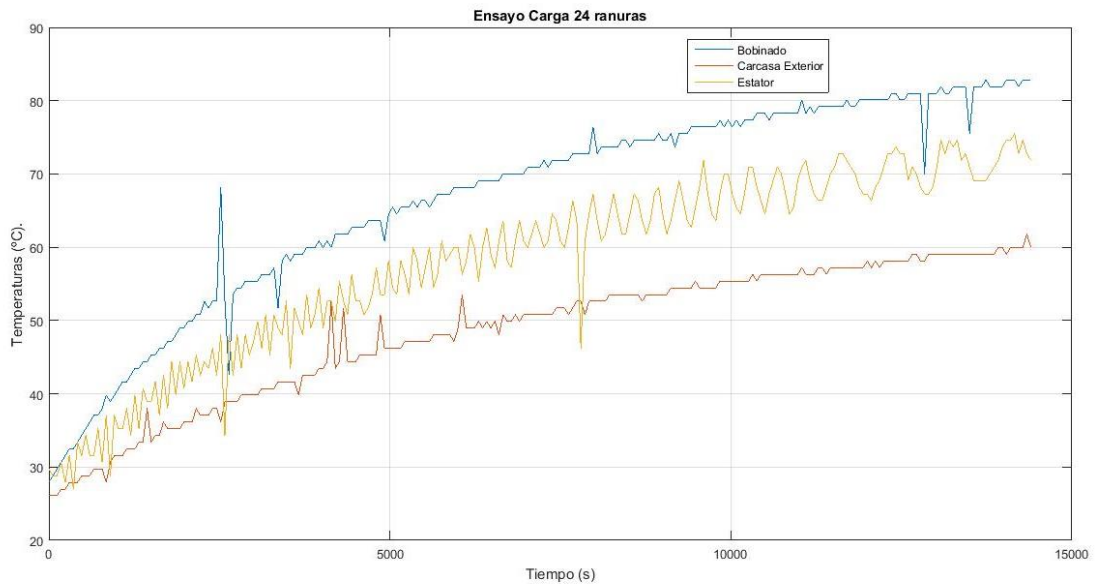


Ilustración 62: Rendimiento aplicando una rampa de velocidad. Ensayo en carga. Generador 24 ranuras.

Se representa la curva de rendimiento del generador de 24 ranuras. Con un apreciable transitorio a bajas revoluciones de giro del generador. En esta zona inicial la toma de datos es un tanto inestable por el simple hecho de que puede existir cierta reluctancia que repercute, aunque no directamente, en el rendimiento.

El rendimiento que se obtiene ronda el 77%.



*Ilustración 63: Evolución de la temperatura. Ensayo en carga. Generador de 24 ranuras.*

La evolución de la temperatura respecto al tiempo y bajo condiciones nominales indica un mayor calentamiento del bobinado, estator y carcasa con valores, una vez llegado el estacionario, de 82°C; 70°C; 60°C, respectivamente. La gráfica tiende a esos valores o al menos tardará mucho tiempo en calentarse. Con esta gráfica nos hacemos una idea del número de horas de funcionamiento de la máquina sin que presente una excesiva temperatura.

En cuanto al trazado del estator se aprecia una inestabilidad en la recogida de datos provocada, posiblemente, por alguna conexión incorrecta del cableado de la sonda PT100.

### 10.3.3 GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.

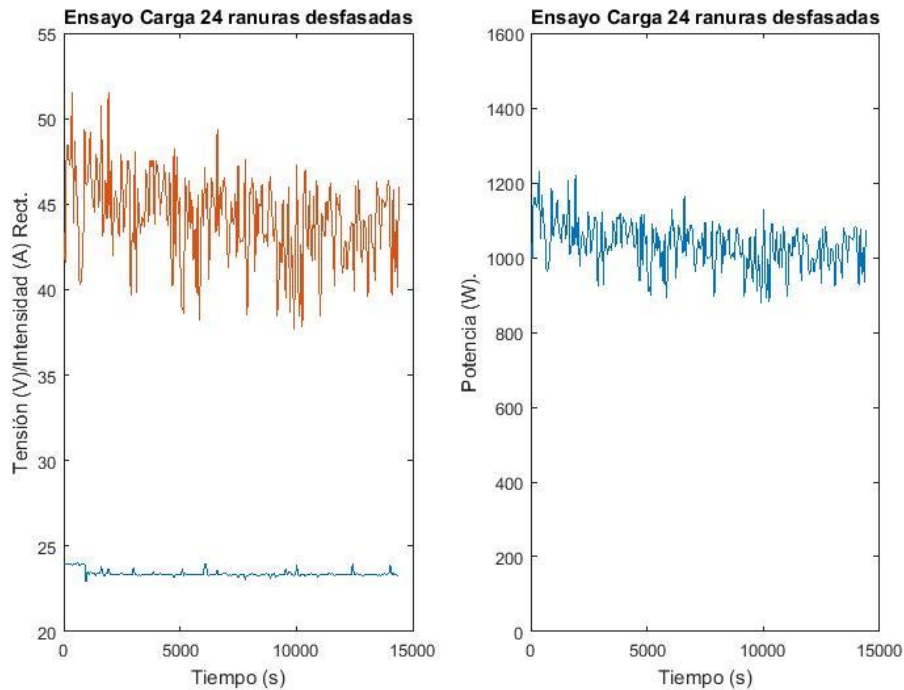
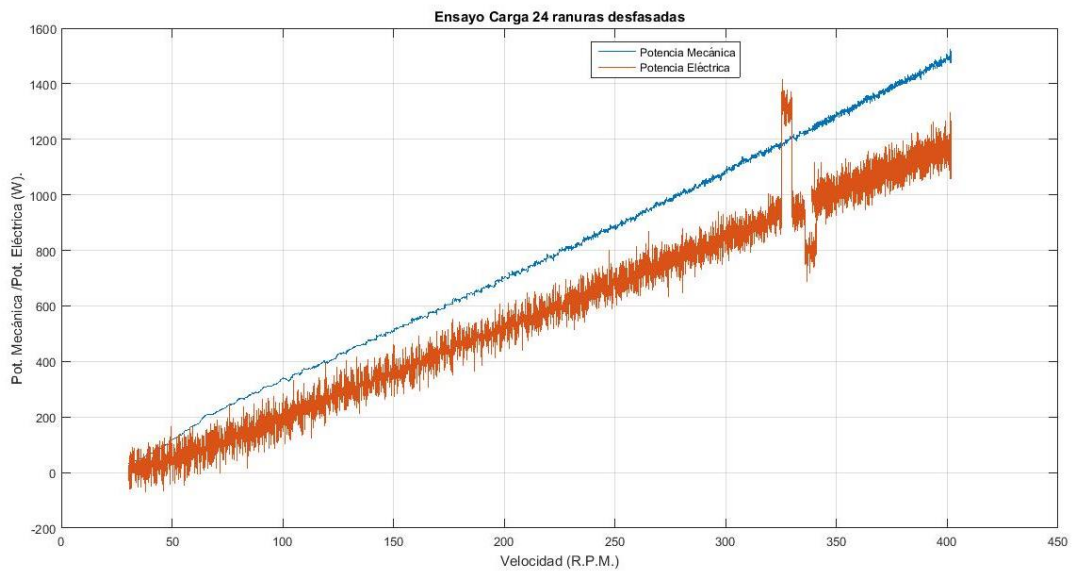


Ilustración 64: Tensión/Intensidad-tiempo (izquierda). Potencia-tiempo (derecha). Ensayo en carga. Generador 24 ranuras desfasadas.

A través de la gráfica izquierda podemos visualizar los valores de tensión e intensidad captados en el rectificador, por lo que estos valores son continuos. La variación que se produce en la tensión es debido, entre otras cosas, a algún tipo de ruido en el cable de señal o en la entrada, pese a ello podemos hacernos una idea hacia donde tienden los valores para el caso que estamos estudiando la tensión tiene un valor de 44 V, mientras que la intensidad, sin tanta variación, se mantiene en los 24 A. Datos que si los contrastamos con los ofrecidos en la (**Tabla 19: Características generador 24 ranuras.**) son muy similares.

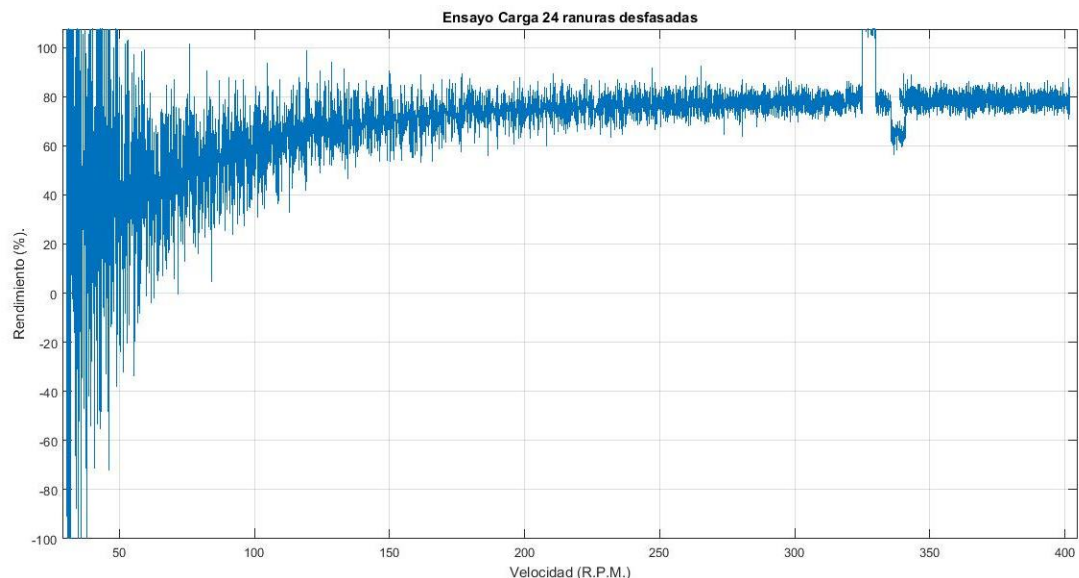
En cuanto a la potencia, al ser producto de las dos anteriores adquiere la forma mostrada con un valor aproximado de 1050 W.

Todo ello bajo las condiciones nominales propias del ensayo en carga.



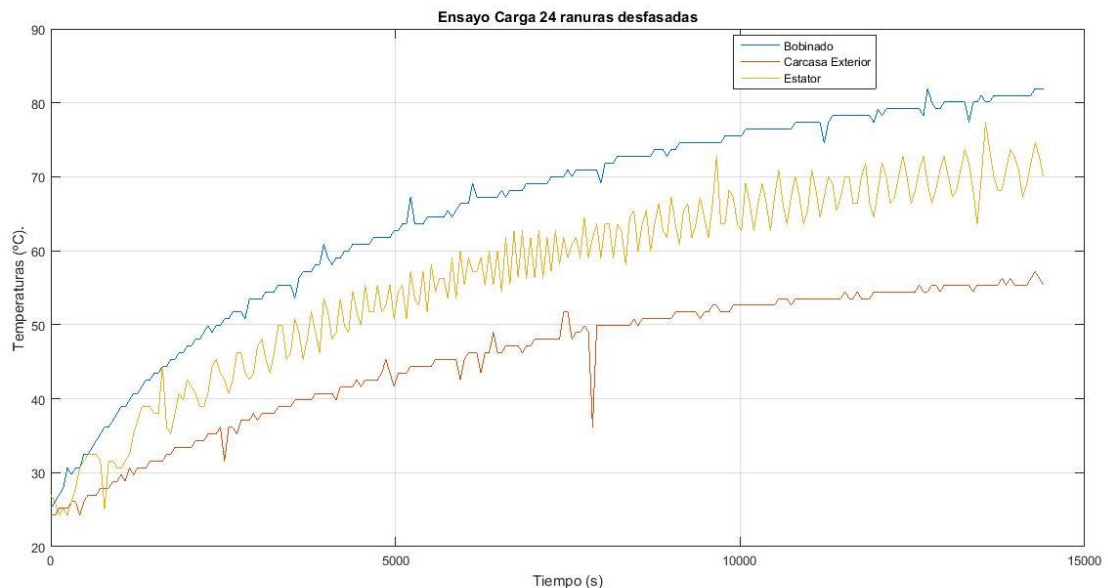
*Ilustración 65: Rampa Potencia-velocidad. Ensayo en carga. Generador 24 ranuras desfasadas.*

Aplicando una rampa de subida de velocidad los resultados adquiridos son los mostrados en la ilustración 57, donde podemos afirmar que el aumento de potencia tanto eléctrica como mecánica es proporcional a la velocidad aplicada. En las condiciones nominales típicas de este ensayo, la potencia mecánica toma un valor de 1500 W mientras que la potencia eléctrica un valor de 1200 W aproximadamente.



*Ilustración 66: Rendimiento aplicando una rampa de velocidad. Ensayo en carga. Generador 24 ranuras desfasadas.*

Como ya se ha comentado el rendimiento es el cociente de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica, datos obtenidos en la **Ilustración 65: Rampa Potencia-velocidad. Ensayo en carga. Generador 24 ranuras desfasadas**. Con estos datos hemos podido crear la gráfica de rendimiento del generador en la que se aprecia un transitorio. El estacionario de la gráfica tiende hacia el valor de 80 % aproximadamente. La variación en los valores es debido al sistema de adquisición de datos.



*Ilustración 67: Evolución de la temperatura. Ensayo en carga. Generador de 24 ranuras desfasadas.*

La temperatura alcanzada por las distintas partes del generador de 24 ranuras desfasadas es la mostrada en la ilustración. Tras 10000 segundos (casi tres horas) el valor tiende a estabilizarse, la variación máxima se da antes de estos 10000 segundos. Tras cuatro horas de ensayo la temperatura máxima alcanzada de bobinado, estator y carcasa exterior son de 80° C, 70° C y 58° C, respectivamente.

#### 10.4 ENSAYO DE RELUCTANCIA.

En este apartado se comentarán los resultados derivados de dos ensayos de reluctancia:

1. Ensayo manual de reluctancia sin multiplicadora.
2. Ensayo manual de reluctancia con multiplicadora.



La medida del par de reluctancia que han presentado los tres prototipos ensayados ha resultado un tanto complicada, como consecuencia de los valores elevados de par de reluctancia presentes en los generadores.

Como se ha dicho, se han realizado dos tipos de ensayos manuales, en uno de ellos hemos incorporado la multiplicadora con el fin de controlar de forma más exhaustiva el par presentado por las máquinas. Esto se ha plasmado en los resultados obtenidos por lo que suscita un mayor interés el análisis de los datos obtenidos en el montaje con multiplicadora.

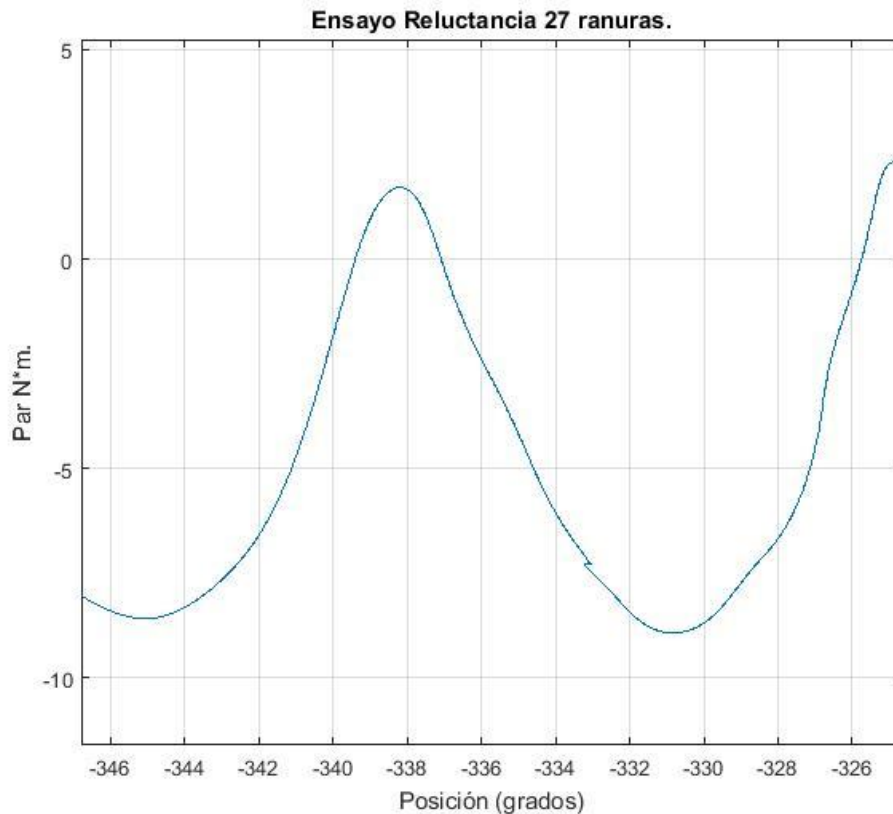
Para la realización del ensayo, se ha provisto de un volante mediante el cual ejerceremos un par de forma controlable para que únicamente ayudemos a la máquina a realizar el giro y poder medir el par de reluctancia, en las gráficas, esta acción corresponde con la subida de lo que podemos denominar la curva de par. El siguiente movimiento que debemos hacer es contrarrestar el par que ofrece la máquina para que de esta forma podamos medir de forma concisa el par de reluctancia, gráficamente esta zona corresponde con la bajada de la curva.

Se han ensayado los tres prototipos de generadores. A continuación, se expondrán las gráficas obtenidas.



#### 10.4.1 GENERADOR DE 27 RANURAS.

##### 10.4.1.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.



*Ilustración 68: Par- posición. Ensayo de reluctancia. Generador de 27 ranuras.*

Los resultados obtenidos del ensayo de reluctancia del generador de 27 ranuras se muestran en la ilustración 62. Se han tomado los datos para un periodo de unos 15 grados. No se observa simetría respecto al eje de abscisas (valor 0), debido, entre otras cosas, a los errores existentes en los aparatos de medida y a la dificultad de control del par de reluctancia.

Se aprecia una pendiente menor cuando el par de reluctancia decrece.

En el eje horizontal la posición es negativa debido al sentido de giro en el que se ha realizado este ensayo, los datos proporcionados por el encoder, en un sentido son positivos y en el contrario negativos. Se ha elegido este resultado de los múltiples obtenidos al ser el de mayor fiabilidad.

#### 10.4.1.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.

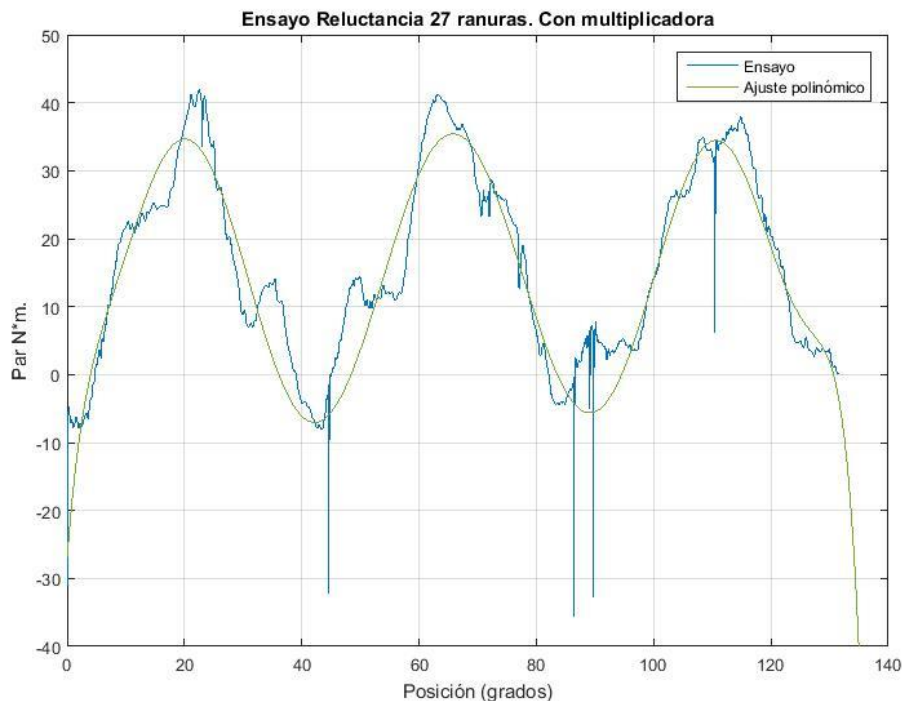


Ilustración 69: Par-posición. Ensayo de reluctancia con multiplicadora. Generador 27 ranuras.

En la ilustración 68 podemos distinguir el par de reluctancia medido para el generador de 27 ranuras. Lo singular de esta gráfica es el valor de par alcanzado, causado, en su medida, porque no se ha contemplado el par que presenta la multiplicadora, dato que puede influir en la obtención de resultados. Por el momento no se ha llegado a unos datos concluyentes con el sistema de medida adoptado. Sin embargo, nos podemos hacer una idea de la curva par-posición para este prototipo.

Se ha de destacar que el periodo mostrado es de unos 45 grados, correspondientes al paso por el polo de la máquina.

Se ha incorporado un ajuste polinómico con la intención de hacernos una idea de la curva par-velocidad para este ensayo.

El par para el ensayo con multiplicadora es ocho veces mayor al ser medido en el lado de baja velocidad de la multiplicadora. Sin embargo, la posición es la misma al estar situado el encoder en el eje del generador. Esta situación se dará para los ensayos posteriores.

## 10.4.2 GENERADOR 24 RANURAS.

### 10.4.2.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.

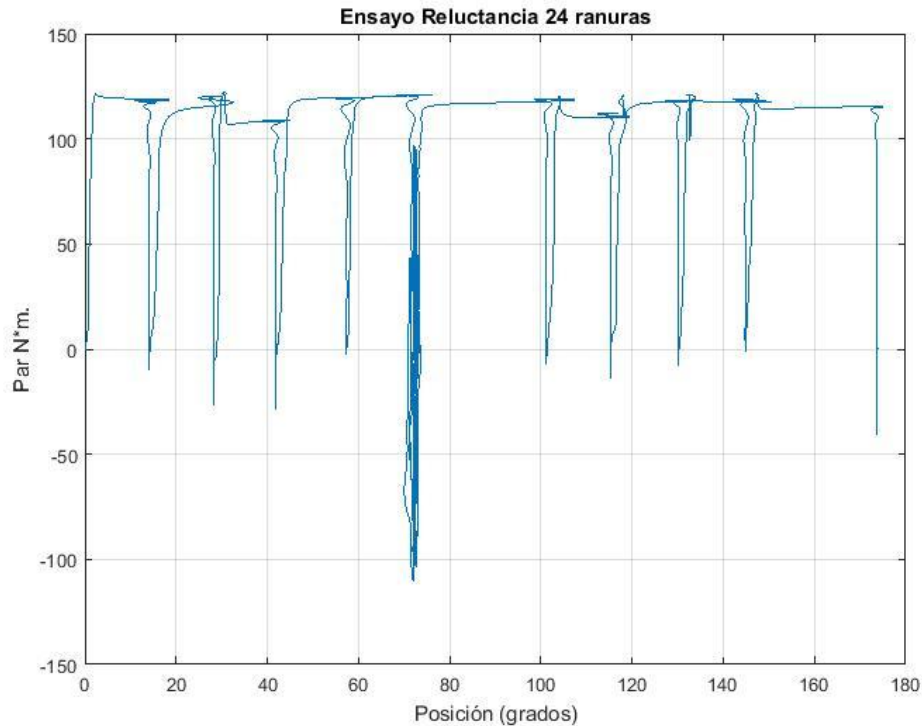


Ilustración 70: Par- posición. Ensayo de reluctancia. Generador de 24 ranuras.

Los resultados mostrados para el ensayo de reluctancia fueron insatisfactorios. La dificultad de controlar el fuerte par que presenta la máquina no permitió obtener unos resultados concluyentes. El hecho de realizar el ensayo con la multiplicadora permite esclarecer los resultados.

A pesar de los resultados, si podemos afirmar que el par de reluctancia es elevado, algo que ya sabíamos al realizar el ensayo y que terminamos de confirmar al observar el alto valor de par que muestra la gráfica.

El valor al que tiende el par máximo es a unos 120 Nm.

#### 10.4.2.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.

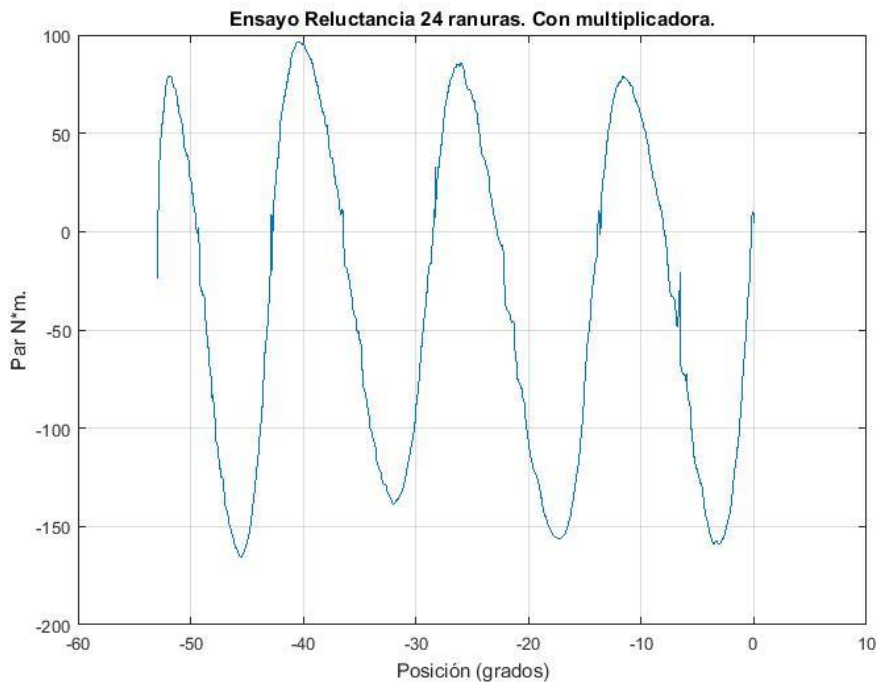


Ilustración 71: Par-posición. Ensayo de reluctancia con multiplicadora. Generador 24 ranuras.

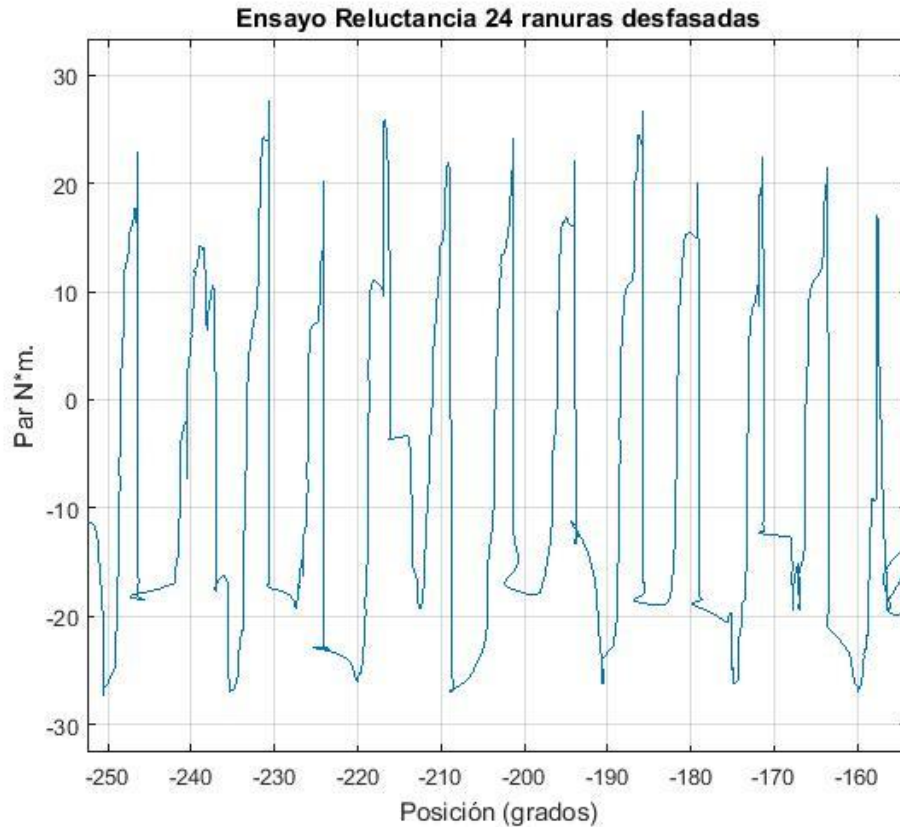
Notoria la diferencia de resultados respecto al ensayo sin multiplicadora. Se puede percibir una curva mucho más suave con un control del par de reluctancia mucho más efectivo que el anterior. El periodo percibido es de 15 grados

En la zona ascendente de la curva se aprecia algo más de pendiente, causado por un peor control del par de reluctancia presente en la máquina, algo contrario a lo que sucede en la zona descendente.

Se observa un valor máximo de par de 150 Nm.

### 10.4.3 GENERADOR 24 RANURAS DESFASADAS.

#### 10.4.3.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA SIN MULTIPLICADORA.



*Ilustración 72: Par- posición. Ensayo de reluctancia. Generador de 24 ranuras desfasadas.*

Como en el caso del generador de 24 ranuras, los resultados mostrados para el ensayo de reluctancia fueron insatisfactorios. La dificultad de controlar el fuerte par que presenta la máquina no permitió obtener unos resultados concluyentes. El hecho de realizar el ensayo con la multiplicadora permite esclarecer los resultados.

Si que se aprecia un par menor cercano a los 30 Nm.

### 10.4.3.1 ENSAYO DE RELUCTANCIA CON MULTIPLICADORA.

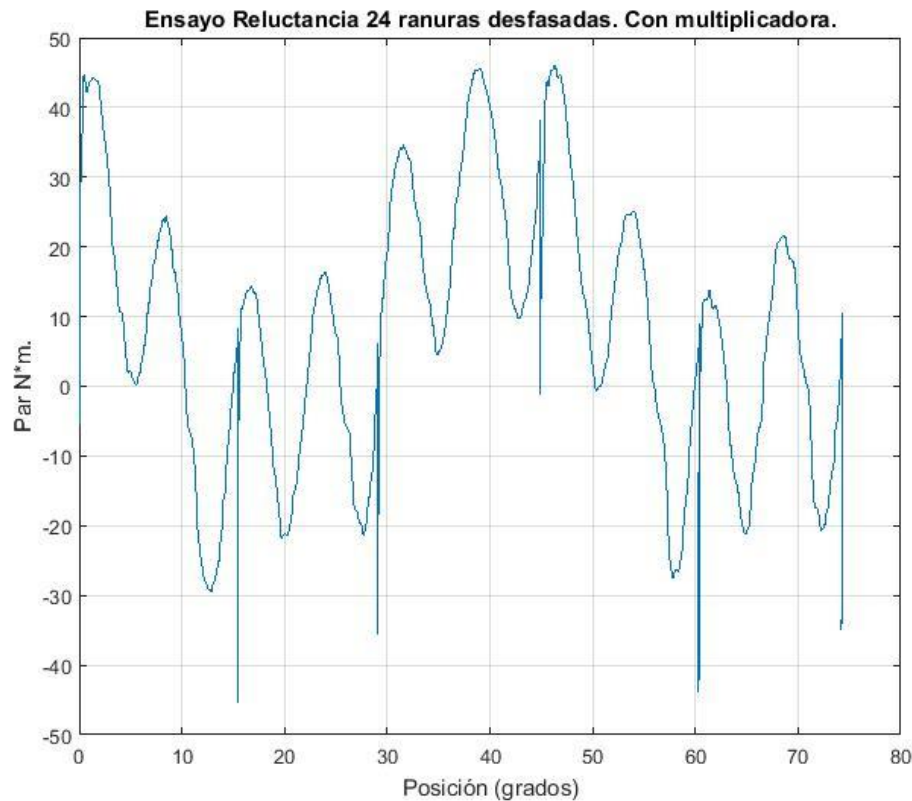


Ilustración 73: Ensayo de reluctancia con multiplicadora. Generador 24 ranuras desfasadas.

En este ensayo sucede algo que ya estaba de manifiesto en ensayos anteriores, que es los errores producidos en el movimiento manual al realizar varios giros del generador. En este caso los resultados son algo más dispersos debido a que al no existir mucha reluctancia, el ensayo está aún más condicionado por la fuerza y velocidad que se aplique al volante pese a los resultados insatisfechos, se ha mejorado el sistema de giro pasado de una barra a un volante por lo que el par residual aplicado en la barra es eliminado a la hora de utilizar el volante.

Algo destacable es que, aunque en la gráfica se muestren 80 grados, equivalente más o menos a un cuarto de vuelta, al utilizar la multiplicadora, manualmente había que realizar 8 veces más giro para conseguir eso, es decir, el giro real aplicado sobre el volante es 720 grados. Esto produce tergiversación en los resultados debido a la imprecisión humana.

Por último, recordar que la multiplicadora ejerce un par que no se ha tenido en cuenta en las medidas pero que está presente.



## **11 CONCLUSIONES.**

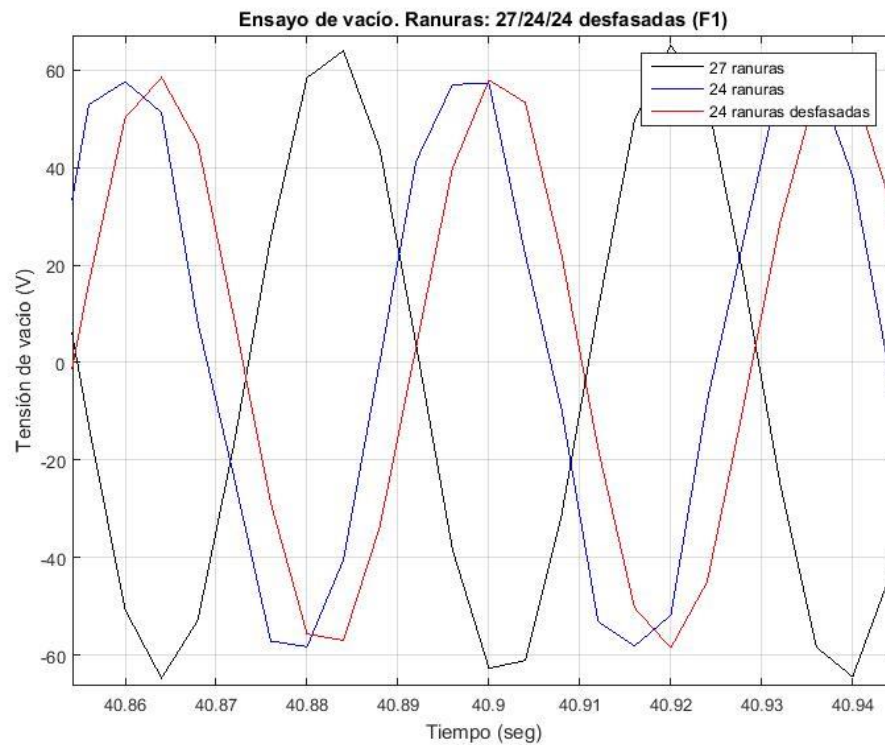
Las conclusiones extraídas del presente trabajo fin de grado se basarán en la comparación y contrastación de los resultados obtenidos de los tres prototipos ensayados. En particular se equiparán los resultados de los tres prototipos bajo las condiciones dadas en los ensayos de vacío, cortocircuito, carga y reluctancia.

Para evitar el exceso de datos en las gráficas, al estar ante un sistema eléctrico equilibrado, se representará, por lo general, una única fase, salvo que se requiera la representación de varias sí lo exige las condiciones.

Una vez concluido el proceso de desarrollo para la obtención de conclusiones, que va desde la preparación y puesta a punto del banco de ensayos dinamométrico hasta la captación y adquisición de datos pasando por la programación en Simulink y la creación de la interfaz en ControlDesk, así como programación requerida en Matlab, estaremos en disposición de cotejar los datos obtenidos de los tres prototipos.

### **11.1 ENSAYO DE VACÍO.**

Se confeccionará una primera gráfica que representaremos la tensión de vacío instantánea a lo largo del tiempo y una segunda gráfica que muestre la tensión de vacío eficaz frente a la velocidad de giro de cada generador aplicando una rampa de subida de velocidad.



*Ilustración 74: Comparación de la tensión de línea de cada generador. Ensayo en vacío.*

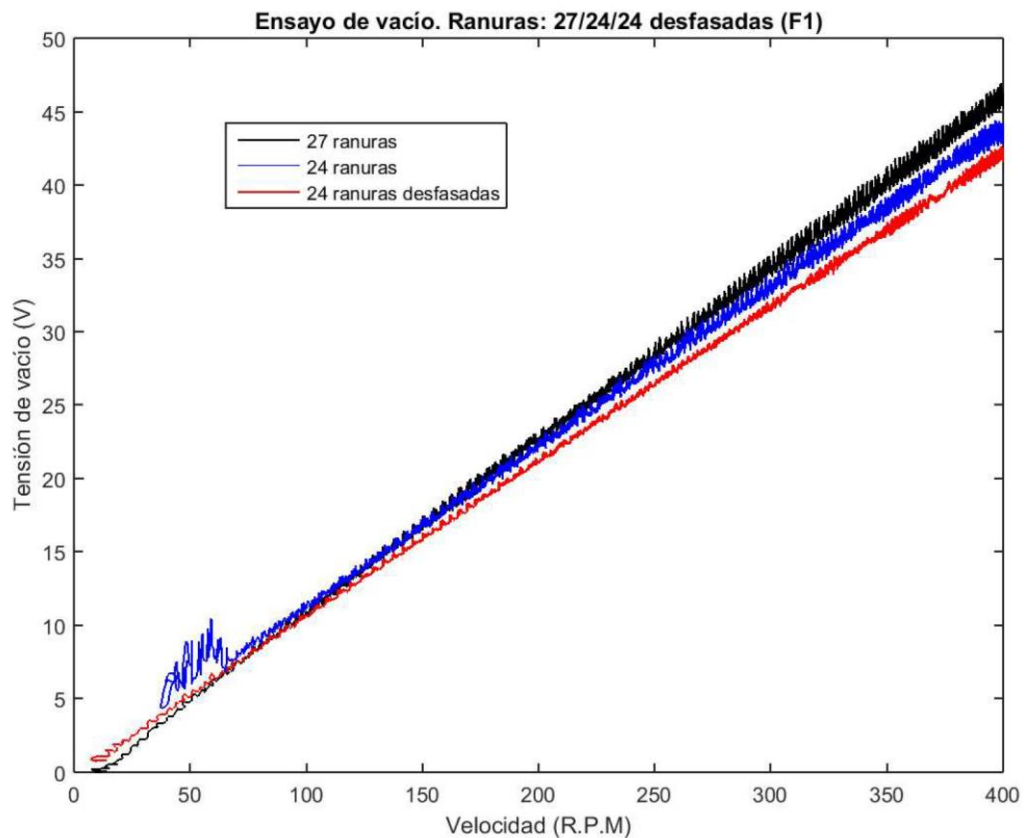
En el ensayo de vacío, una vez realizada la puesta a punto del banco de dinamométrico pasado por todo el proceso en cuanto a programación de simulink, creación de la interfaz de ControlDesk, incluyendo la captura de datos, y tratamiento de estos mediante Matlab; estamos en disposición de comparar los resultados obtenidos y extraer una serie de conclusiones.

La tensión de línea del generador de 27 ranuras es ligeramente superior a la de los otros dos prototipos con esto podemos concluir que a mayor número de ranuras mayor es la tensión de línea en vacío que se obtiene. Esto está ligado a la reluctancia de la máquina puesto que el generador de 27 ranuras posee menos par de reluctancia que los otros dos por lo que puede girar con mayor libertad y de ahí esa diferencia respecto al resto.

A mayor bobinado, como es el caso del generador de 27 ranuras respecto al resto, mayor es la fuerza electromotriz que se induce por lo que se obtiene una mayor tensión de línea.

Se aprecia un desfase respecto a otro en los tres prototipos, siendo menor entre los generadores con el mismo número de ranuras. Este desfase es debido a que se ha capturado los datos en distintos momentos de tiempo.





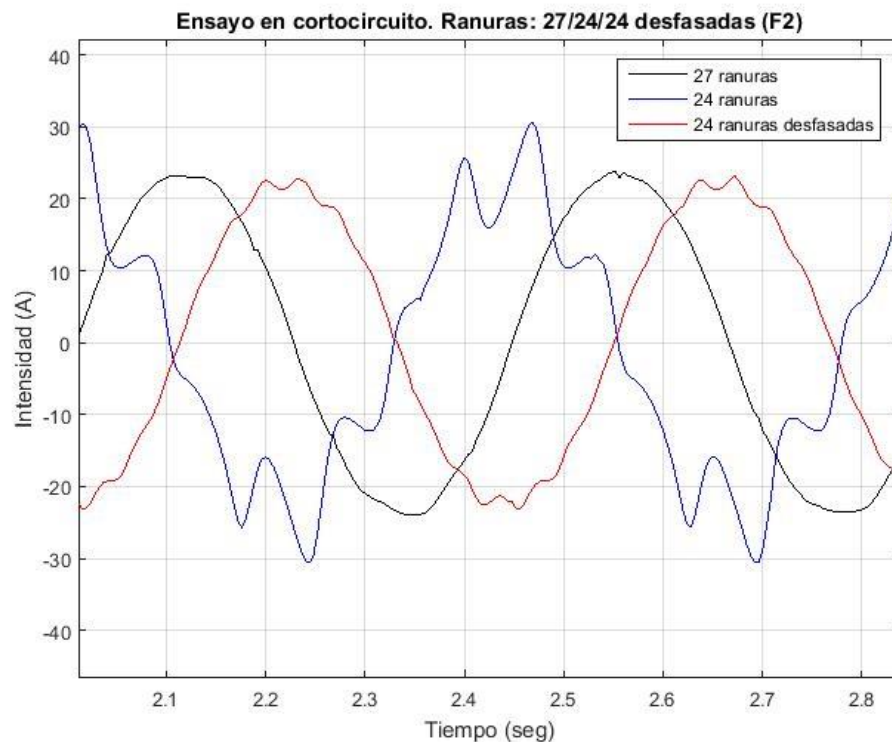
*Ilustración 75: Comparación tensión de línea ante una rampa de velocidad. Ensayo en vacío.*

Siguiendo un razonamiento lógico, si en la anterior gráfica (**Ilustración 74: Comparación de la tensión de línea de cada generador. Ensayo en vacío.**) la tensión de línea era mayor en el generador de 27 ranuras también debe de serlo en la gráfica tensión de línea – velocidad ante una rampa de subida de velocidad.

Se observa una pequeña inestabilidad inicial en la gráfica del generador de 24 ranuras derivado del alto par de reluctancia presente en la máquina, en las que produce una serie de dificultades para vencer dicho par.

## 11.2 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

Se equiparán las tres intensidades de línea para cada uno de los prototipos ensayados bajo las condiciones de cortocircuito.



*Ilustración 76: Comparación de la intensidad de línea de cada generador. Ensayo en cortocircuito.*

Como habíamos comentado en el apartado de resultados, más en concreto, en el ensayo de cortocircuito, se ve claramente cómo afecta el par de reluctancia propio de cada máquina en la intensidad.

Estudiando las gráficas podemos concluir que la máquina de 24 ranuras es la que más par de reluctancia presenta seguida de la de 24 ranuras desfasadas y por último la de 27 ranuras. Esto es debido a que se ha perseguido dicho fin desde el diseño de los tres prototipos.

El hecho de que la intensidad de línea se vea aumentada en la máquina de 24 ranuras se debe, a como ya hemos dicho al par de reluctancia, puesto que se ejerce un mayor par de giro como consecuencia de magnetismo presente en el rotor.

En el ámbito de generación de energía eólica este par de reluctancia es un gran inconveniente dado que los arranques de los motores son desde velocidades bajas hasta velocidades altas, por lo que en el caso de que exista gran par de reluctancia a vencer, será necesario aportar mayor cantidad de energía mecánica que si este par fuera menor. No obstante, una vez vencido por inercia ese par de reluctancia, el motor de comporta de manera eficiente en estado estacionario.

### 11.3 ENSAYO EN CARGA.

Este apartado tratará de confrontar una serie de magnitudes derivadas de los ensayos realizados. Las gráficas más representativas que trazaremos se nombran a continuación:

- ✓ Evolución de la temperatura durante el ensayo de carga para una duración de 4 horas de cada una de las partes de la máquina.
- ✓ Curva de rendimiento de cada uno de los prototipos.
- ✓ Rampa de subida de la potencia mecánica y eléctrica frente a la velocidad.

#### 11.3.1 COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS

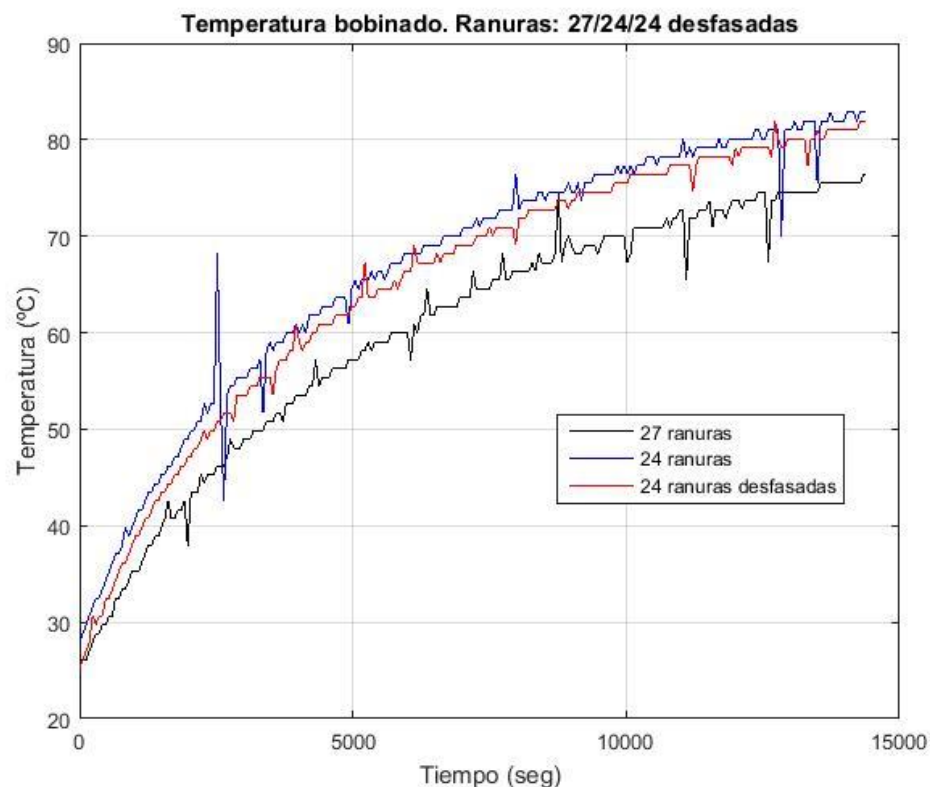
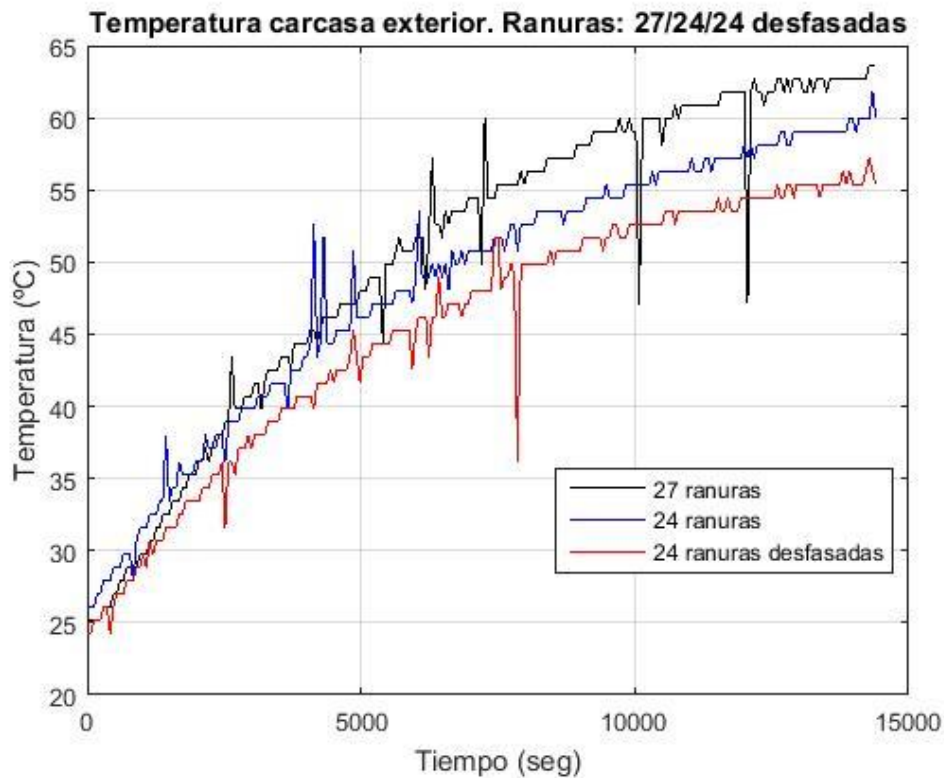


Ilustración 77: Evolución de la temperatura del bobinado. Ensayo en carga larga.

Podemos apreciar que el generador que adquiere más temperatura es el de 24 ranuras. La diferencia de temperatura que se da respecto al de 27 es debido a que éste último posee un bobinado con una mayor longitud lo que permite distribuir uniformemente el calor a lo largo de todo el bobinado.



*Ilustración 78: Evolución de la temperatura de la carcasa exterior. Ensayo en carga larga.*

En contra de lo que se podía pensar, ya que el generador de 27 ranuras adquiriría la mayor temperatura de los tres prototipos en el bobinado, la mayor temperatura la alcanza el generador de 27 ranuras, esto es debido a que, al tratarse de un generador de mayor número de ranuras, la temperatura por ranura es menor no siendo así en su conjunto, de ahí el hecho de que la gráfica muestre el mayor valor de temperatura para el generador de 27 ranuras.

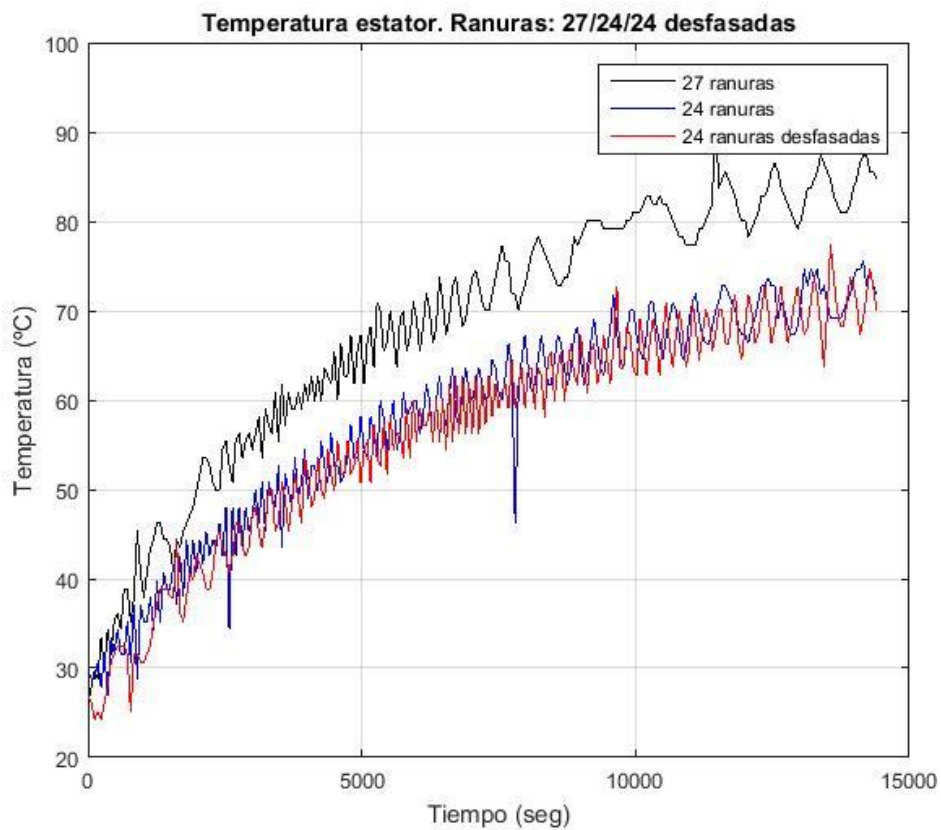
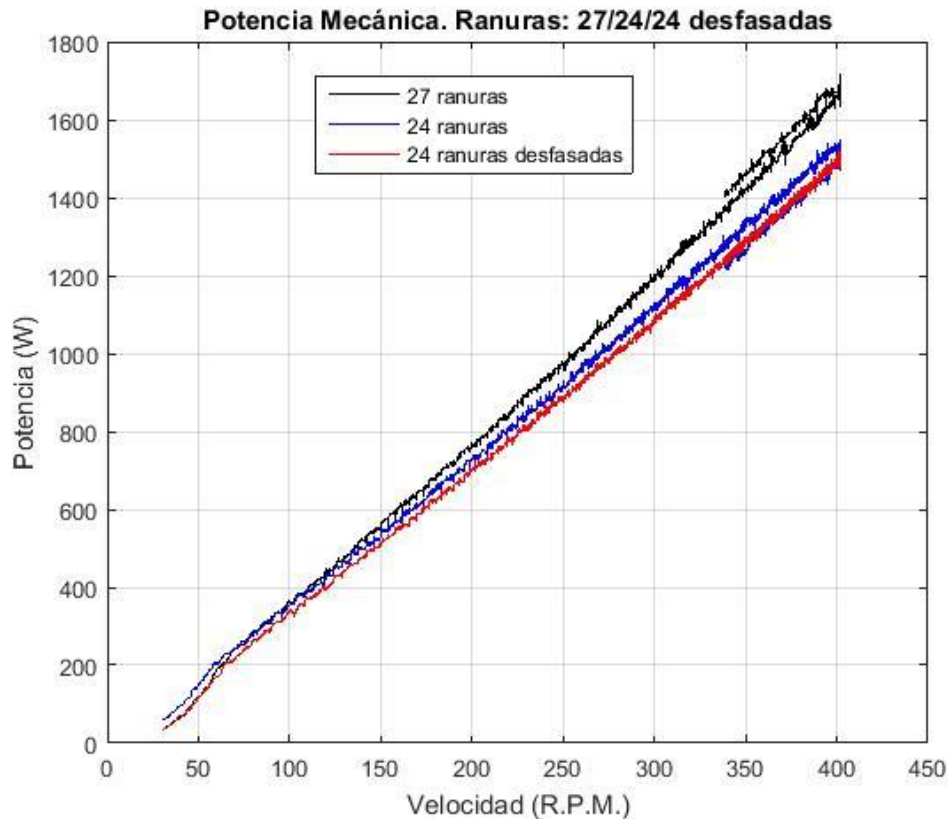


Ilustración 79: Evolución de la temperatura del estator. Ensayo en carga larga.

La temperatura observada en el estator es consecuencia de lo comentado anteriormente. El generador de 27 ranuras está dotado de una longitud de bobinado mayor lo que acarrea un mayor calentamiento en su conjunto. Se produce un mayor número de pérdidas por efecto Joule.

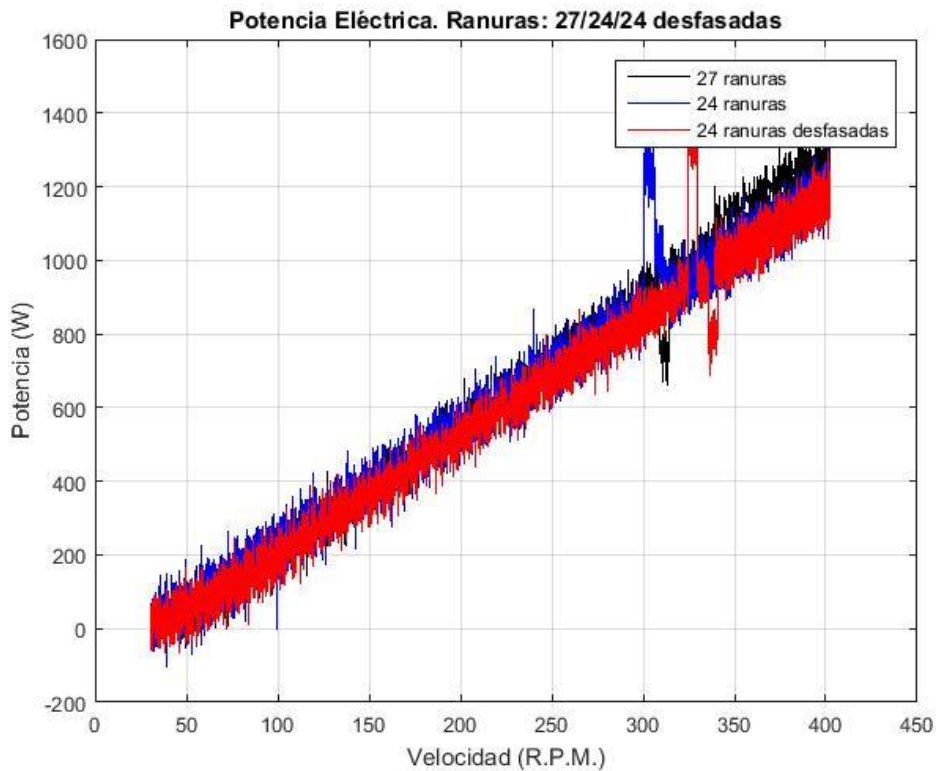
## 11.3.2 COMPARACIÓN POTENCIA MECÁNICA.



*Ilustración 80: Comparación de potencia mecánica. Ensayo en carga.*

La mayor potencia mecánica se da en el generador de 27 ranuras la explicación de este fenómeno reside en las características de diseño, en concreto en la longitud del bobinado, al ser éste de mayor longitud mayor serán las pérdidas resistivas del conductor por lo que para entregar la misma potencia eléctrica hay que aplicar una mayor potencia mecánica.

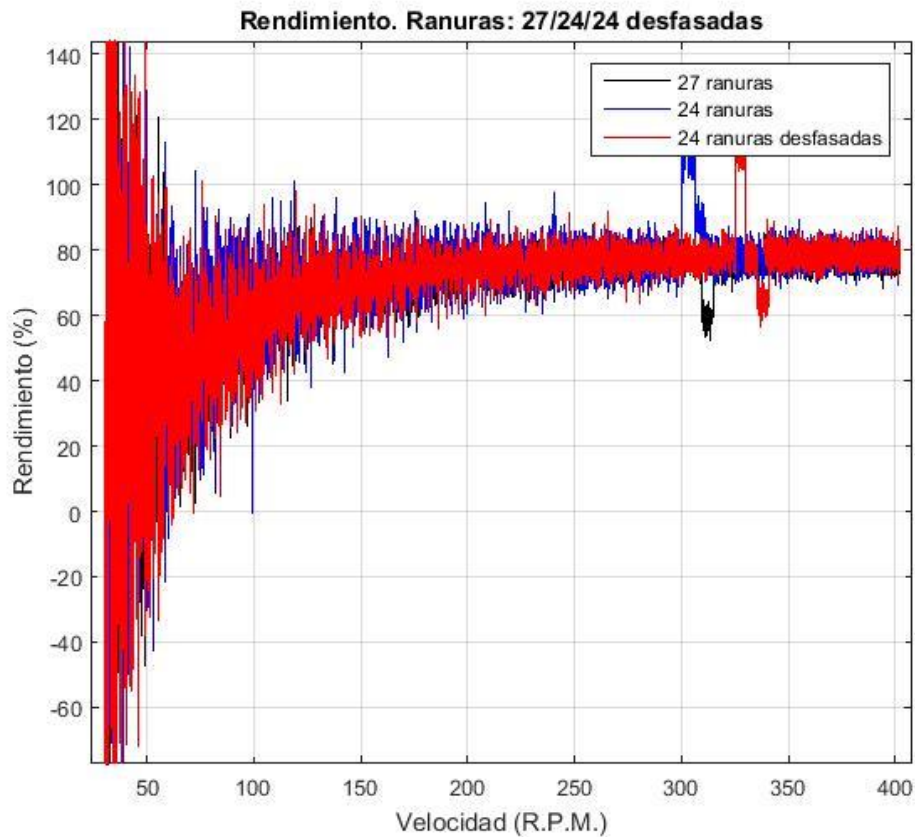
### 11.3.3 COMPARACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA.



*Ilustración 81: Comparación de potencia eléctrica. Ensayo en carga.*

Las potencias eléctricas son muy similares en los tres casos debido a que las máquinas están diseñadas para generar las mismas prestaciones. En cambio, la potencia mecánica de entrada depende de cada prototipo.

### 11.3.4 COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS.



*Ilustración 82: Curva de rendimientos. Ensayo en carga.*

Se visualiza unos rendimientos muy similares para cada uno de los prototipos ensayados, hacer hincapié, en que a bajas velocidades los tres prototipos presentan cierta inestabilidad en cuanto a potencia se refiere. El rendimiento para los tres prototipos es del 80% aproximadamente, un bajo rendimiento tratándose de una máquina eléctrica rotativa.

Es desaconsejable el uso del generador a un régimen de giro mínimo dado que su trabajo a bajas velocidades no es eficaz, el generador gira “a tirones” debido a la gran reluctancia y es necesario una velocidad considerable para que el rotor adquiera inercia.

Mientras que en los demás prototipos en cuanto el motor se somete a una potencia mecánica comienza a aportar energía, en esta máquina existen momentos de potencia mecánica negativa al hacer más par el generador con la reluctancia que el motor de arrastre con su consigna de par.



#### 11.4 ENSAYO DE RELUCTANCIA.

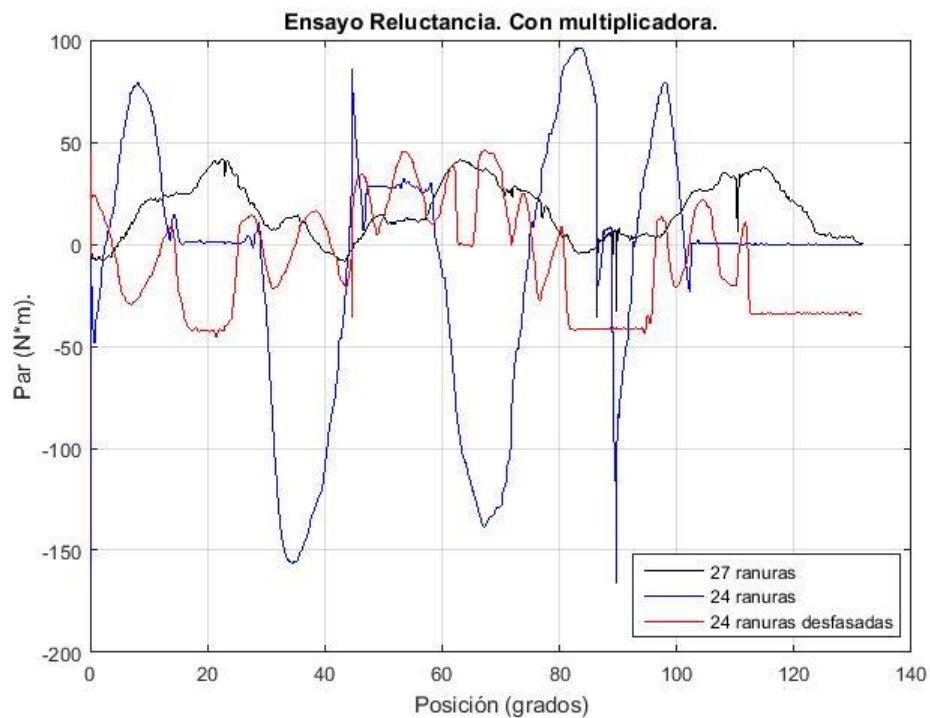


Ilustración 83: Comparación par de reluctancia. Ensayo con multiplicadora.

A la vista de la imagen podemos afirmar que los ensayos de reluctancia con multiplicadora no son concluyentes. Pese a la mejora que supone la incorporación del volante para la realización del ensayo, nos hemos visto incapaces de controlar el par de reluctancia ejercido por los prototipos estudiados.

Como objetivo de posteriores estudios, el analizar el par que ejerce la multiplicadora, con lo que eso conlleva; la instalación de un encoder a la multiplicadora y un medidor de par que se ajuste a los acoplamientos necesarios.





## 12 BIBLIOGRAFÍA.

1. “Brushless Permanent-Magnet Motor Desing”, por Duane C. Hanselman. Editorial McGraw-Hill,1994.
2. Tesis doctoral “Estudio del campo magnético en vacío en el entrehierro de una máquina eléctrica de imanes permanentes y flujo axial mediante el Método de los Subdominios”, por Julián Manuel Pérez García.
3. Proyecto Fin de Carrera “Puesta en funcionamiento del banco de ensayos dinamométrico “, por Eva Vicente Rico y Diego Alonso Ortega.
4. Guía de usuario de la carga electrónica “User’s Guide Agilent Technologies DC Electronic Loads, Model N3300A”.
5. Manual medidor de par “Lebow, Operating Instructions”.
6. Manual vatímetro “4-Channel Power Meter LMG450, Universal meter for motors, power electronics and energy analysis”.
7. Manual de instrucciones sonda “HZ56-2 HAMEG”.
8. Manual dSPACE “DS1103 PPC Controller Board, Hardware Reference”.
9. Manual ControlDesk “Experiment Guide for ControlDesk Version 2.0, January 2001”.
10. Manual de instrucciones “Digital Control Unit for torque transducer DCU 285 Version 01”.
11. Guía de usuario “Unidrive VTC model size 1 to 5, Universal Variable Speed Drive for induction and servo motors”.
12. Las imágenes en las que no aparecen referencias cruzadas son de elaboración propia.