



---

**Universidad de Valladolid**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA  
METALÚRGICA, EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA,  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA,  
INGENIERÍA MECÁNICA E INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE  
FABRICACIÓN**

**TESIS DOCTORAL:**

**GENERACIÓN SISTEMÁTICA DE UN MODELO DE  
GESTIÓN Y CONTROL DE ENSAYOS DE MÁQUINAS  
ELÉCTRICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS  
PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS Y SU  
IMPLEMENTACIÓN EN UN ENTORNO INDUSTRIAL**

Presentada por Moisés San Martín Ojeda para optar al grado  
de doctor por la **Universidad de Valladolid**

Dirigida por:

Dr. D. Alberto Sánchez Lite

Dr. D. Manuel García García

Valladolid, 2015



*“Dad gratis lo que gratis recibisteis” Mt. 10.8*

## **Dedicatoria**

*A mis padres, por la educación recibida.*



## Agradecimientos

*A Andrés y Eduardo, compañeros de trabajo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y, sin embargo, amigos, sin los cuales hubiera sido imposible la realización de esta Tesis.*

*A Marta, mi mujer, por todo su apoyo y en compensación por todo el tiempo robado a ella en la elaboración de esta Tesis.*

*A mis directores de Tesis, Alberto y Manuel, por su dedicación y sus acertadas indicaciones para extraer lo mejor de este trabajo.*

*A todas aquellas personas que han estado pendientes de mí y a las que no he podido dedicar mi tiempo en el periodo de elaboración de esta Tesis.*



## Índice

Índice de figuras .....	5
Índice de tablas .....	12
Índice de fórmulas .....	13
Capítulo 1.- Justificación y Objetivos .....	17
1.1- Justificación.....	17
1.2- Objetivos .....	19
1.3- Metodología de trabajo.....	21
1.4- Aportaciones originales.....	29
Capítulo 2.- Estado del Arte .....	33
2.1- Introducción.....	33
2.2- Simulación de Máquinas Eléctricas .....	35
2.3- Simulación en Tiempo Real .....	38
2.4- Comunicaciones .....	40
2.5- Monitorización y Tratamiento de datos.....	41
2.6- Nuevas Herramientas de Aprendizaje Online .....	42
2.7- Plataformas de Gestión y Control .....	44
2.8- Conclusiones del análisis del estado del arte.....	45
Capítulo 3.- Desarrollo de la Herramienta .....	51
3.1- Introducción.....	51
3.2- Dispositivos físicos empleados .....	56
3.2.1.- Aparatos de medida digitales.....	57
3.2.2.- Tarjetas de adquisición de datos y análogos.....	62
3.2.3.- Acondicionadores de las entradas analógicas.....	64
3.2.4.- Dispositivos de control .....	69
3.3- Software desarrollado.....	71
3.3.1.- Software para la gestión y control .....	72
3.3.2.- Creación de simuladores.....	92



3.4- Herramienta completa desarrollada.....	107
3.5- Discusión de resultados: Desarrollo de la Herramienta .....	108
Capítulo 4.- Aplicación de la herramienta desarrollada .....	115
4.1- Introducción.....	115
4.2- Aplicación herramienta a transformadores monofásicos .....	115
4.2.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar .....	115
4.2.2.- Transformador monofásico ensayado.....	119
4.2.3.- Ensayos y determinación del modelo .....	120
4.2.4.- Validación del modelo.....	129
4.2.5.- Equivalencia entre modelos de transformador monofásico.....	134
4.2.6.- Adquisición de la corriente de vacío .....	135
4.3- Aplicación herramienta a transformadores trifásicos.....	137
4.3.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar .....	137
4.3.2.- Transformador trifásico ensayado .....	138
4.3.3.- Ensayos y determinación del modelo .....	139
4.3.4.- Validación del modelo.....	145
4.3.5.- Desplazamiento de la tensión del neutro en banco trifásico.....	148
4.3.6.- Determinación experimental del índice horario .....	149
4.4- Aplicación herramienta a máquina de inducción .....	153
4.4.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar .....	153
4.4.2.- Máquina asíncrona de rotor de jaula de ardilla ensayada.....	157
4.4.3.- Adquisición de datos y determinación del modelo.....	158
4.4.4.- Análisis de los datos adquiridos .....	161
4.4.4.1.-Aplicación de los datos de adquisición al simulador de máquinas.....	165
4.4.4.2.-Nueva herramienta de aprendizaje.....	166
4.4.5.- Máquina asíncrona de rotor bobinado ensayada.....	168
4.4.6.- Adquisición de datos de corrientes en estator y rotor.....	169
4.4.7.- Determinación del momento de inercia.....	170
4.4.7.1.- Determinación de pérdidas.....	171
4.4.7.2.- Curva de deceleración.....	173

4.5- Aplicación herramienta a máquina síncrona .....	174
4.5.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar .....	174
4.5.2.- Máquina síncrona ensayada.....	180
4.5.3.- Adquisición de datos y obtención de curvas características.....	180
4.5.4.- Simulador de máquina síncrona.....	184
4.5.5.- Ensayo de deslizamiento de la máquina síncrona.....	185
4.6- Aplicación herramienta a máquina de corriente continua .....	187
4.6.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar .....	187
4.6.2.- Máquina de corriente continua ensayada.....	192
4.6.3.- Ensayos excitación independiente y determinación de curvas características.....	192
4.6.4.- Ensayos excitación derivación y determinación de curvas características.....	194
4.6.5.- Ensayos excitación serie y determinación de curvas características .....	195
4.6.6.- Ensayos excitación compuesta corta y determinación de curvas características.....	196
4.6.7.- Ensayos excitación compuesta larga y determinación de curvas características.....	198
4.7- Aplicaciones WEB e Internet .....	199
4.7.1.- Publicación de datos en la nube.....	199
4.7.2.- Visualización y control vía WEB .....	203
4.7.3.- Control WEB para el estudio de transitorios eléctricos.....	204
4.7.3.1.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden .....	208
4.7.3.2.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden.....	210
4.7.4.- Control WEB de cargas monofásicas .....	212
4.7.5.- Control WEB de cargas trifásicas.....	213
4.8- Aplicación industrial .....	214
4.8.1.- Validación de librerías de máquinas eléctricas en simulador EcosimPRO.....	216
4.8.2.- Sistema de Telegestión de Minicentrales Hidráulicas .....	219
4.8.3.- Gestión de alarmas de una planta de Cogeneración .....	221



---

4.9.- Discusión de resultados: Aplicación de la herramienta.....	223
Capítulo 5.- Conclusiones y líneas de futuro .....	229
5.1.- Conclusiones Generales .....	229
5.2.- Conclusiones Particulares.....	229
5.3.- Líneas Futuras .....	230
5.4.- Publicación de Resultados.....	231
Anexo.- Otras aplicaciones prácticas .....	237
A.1- Aplicación del sistema a transformadores monofásicos.....	237
A.1.1.- Transformador monofásico ensayado .....	237
A.1.2.- Ensayos y determinación del modelo .....	238
A.1.3.- Validación del modelo .....	242
A.2- Aplicación del sistema a transformadores trifásicos .....	245
A.2.1.- Transformador trifásico ensayado .....	245
A.2.2.- Ensayos y determinación del modelo .....	246
A.2.3.- Validación del modelo .....	251
Capítulo 6.- Referencias Bibliográficas .....	257

## Índice de figuras

Figura 1.- Máquinas eléctricas consideradas (Fuente: Elaboración propia)	22
Figura 2.- Dispositivos físicos de adquisición (Fuente: Elaboración propia)	22
Figura 3.- Dispositivos físicos de control (Fuente: Elaboración propia)	23
Figura 4.- Software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)	24
Figura 5.- Nuevas herramientas de aprendizaje (Fuente: Elaboración propia)	25
Figura 6.- Función de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia)	25
Figura 7.- Almacenamiento de datos en la nube (Fuente: Elaboración propia)	26
Figura 8.- Diagrama general (Fuente: Elaboración propia)	27
Figura 9.- Búsqueda en IEEE 1 (Fuente: WEB IEEE)	34
Figura 10.- Búsqueda en IEEE 2 (Fuente: WEB IEEE)	35
Figura 11.- Máquinas eléctricas objeto de esta tesis (Fuente: Elaboración propia)	51
Figura 12.- Dispositivos físicos de adquisición (Fuente: Elaboración propia)	52
Figura 13.- Dispositivos físicos de control (Fuente: Elaboración propia)	52
Figura 14.- Software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)	53
Figura 15.- Creación y validación de simuladores (Fuente: Elaboración propia)	53
Figura 16.- Función de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia)	54
Figura 17.- Diagrama general con elementos físicos (Fuente: Elaboración propia)	55
Figura 18.- Dispositivos físicos (Fuente: Elaboración propia)	56
Figura 19.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)	57
Figura 20.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)	58
Figura 21.- Medidor digital CA (Fuente: Elaboración propia)	59
Figura 22.- Medidor digital CC (Fuente: Elaboración propia)	59
Figura 23.- Analizador de red cc (Fuente: Elaboración propia)	59
Figura 24.- Analizador de red ca trifásico CVM144 (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 25.- Analizador de red ca trifásico CVM96 (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 26.- Analizador de red monofásico (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 27.- Transformadores de intensidad (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 28.- Conversor RS232/485 (Fuente: Elaboración propia)	61
Figura 29.- Conversor RS/Ethernet (Fuente: Elaboración propia)	61
Figura 30.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)	61
Figura 31.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)	62
Figura 32.- Plataforma CompactRIO (Fuente: WEB <a href="http://www.ni.com">www.ni.com</a> )	63
Figura 33.- Tarjeta de transductores A (Fuente: Elaboración propia)	64
Figura 34.- Tarjeta de transductores B (Fuente: Elaboración propia)	65
Figura 35.- Transductor LV25P (Fuente: Elaboración propia)	66
Figura 36.- Transductor de corriente LTA 50P (Fuente: Elaboración propia)	68
Figura 37.- Transductores de corriente LEM HY5P y HY 25P (Fuente: Elaboración propia)	69
Figura 38.- Autómata Modicom TSX Micro (Fuente: WEB <a href="http://www.schneiderelectric.es">http://www.schneiderelectric.es</a> )	69
Figura 39.- Autómata Modicom TSX Premium (Fuente: WEB <a href="http://www.schneiderelectric.es">http://www.schneiderelectric.es</a> )	70
Figura 40.- Plataforma CompactRIO (Fuente: WEB <a href="http://www.ni.com">www.ni.com</a> )	70
Figura 41.- Detalle software desarrollado (Fuente: Elaboración propia)	71
Figura 42.- Pantalla del software Gestión de Ensayos Eléctricos (Fuente: Elaboración propia)	72
Figura 43.- Gestión de ensayos: Transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	74



Figura 44.- Gestión de ensayos: Transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	74
Figura 45.- Gestión de ensayos: Circuito magnético (Fuente: Elaboración propia)	75
Figura 46.- Gestión de ensayos: Máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	75
Figura 47.- Gestión de ensayos: Máquina asíncrona con freno (Fuente: Elaboración propia)	76
Figura 48.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación independiente (Fuente: Elaboración propia)	76
Figura 49.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación shunt (Fuente: Elaboración propia)	77
Figura 50.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación serie (Fuente: Elaboración propia)	77
Figura 51.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación compuesta corta (Fuente: Elaboración propia)	78
Figura 52.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación compuesta larga (Fuente: Elaboración propia)	78
Figura 53.- Gestión de ensayos: Máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	79
Figura 54.- Adquisición de tensiones y corrientes en transformador eléctrico 1 (Fuente: Elaboración propia)	80
Figura 55.- Adquisición de tensiones y corrientes en transformador eléctrico 2 (Fuente: Elaboración propia)	80
Figura 56.- Corriente de vacío de un transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)	81
Figura 57.- Curva de vacío y obtención del ciclo de histéresis (Fuente: Elaboración propia)	81
Figura 58.- Determinación experimental de Índice Horario (Fuente: Elaboración propia)	82
Figura 59.- Desplazamiento de neutro en banco trifásico (Fuente: Elaboración propia)	82
Figura 60.- Corrientes de motor de inducción (Fuente: Elaboración propia)	83
Figura 61.- Detalle corrientes de motor de rotor bobinado (Fuente: Elaboración propia)	83
Figura 62.- Ensayo de deslizamiento de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	84
Figura 63.- Datos en servidor Box (1) (Fuente: Elaboración propia)	85
Figura 64.- Datos en servidor Box (2) (Fuente: Elaboración propia)	85
Figura 65.- Datos en servidor OwnCloud (1) (Fuente: Elaboración propia)	86
Figura 66.- Datos en servidor OwnCloud (2) (Fuente: Elaboración propia)	86
Figura 67.- Datos en servidor Google Drive (1) (Fuente: Elaboración propia)	87
Figura 68.- Datos en servidor Google Drive (2) (Fuente: Elaboración propia)	87
Figura 69.- Gestión de ficheros con el software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)	88
Figura 70.- Acceso desde dispositivo Tablet (Fuente: Elaboración propia)	89
Figura 71.- Acceso WEB desde ordenador (Fuente: Elaboración propia)	89
Figura 72.- Control WEB de cargas monofásicas (Fuente: Elaboración propia)	90
Figura 73.- Control WEB cargas trifásicas (Fuente: Elaboración propia)	91
Figura 74.- Control WEB de transitorio eléctrico (Fuente: Elaboración propia)	91
Figura 75.- Simulador de transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)	92
Figura 76.- Ejemplo cálculo circuito equivalente (Fuente: Elaboración propia)	93
Figura 77.- Detalle diagrama fasorial (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 78.- Detalle magnitudes gráfico (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 79.- Ejemplo representación evolución (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 80.- Pantalla inicial. Índices Horarios (Fuente: Elaboración propia)	95
Figura 81.- Índices horarios. Selección alimentación (Fuente: Elaboración propia)	95
Figura 82.- Índices horarios. Selección de la conexión del primario (Fuente: Elaboración propia)	96
Figura 83.- Índices horarios. Representación tensiones primario y secundario (Fuente: Elaboración propia)	96
Figura 84.- Índices horarios. Selección conexión secundario (Fuente: Elaboración propia)	97
Figura 85.- Índices horarios. Resultado (Fuente: Elaboración propia)	97

Figura 86.- Simulador teorema de Ferraris (Fuente: Elaboración propia)	98
Figura 87.- Teorema de Leblanc (Fuente: Elaboración propia)	98
Figura 88.- Simulador de máquina asíncrona. Curvas características (Fuente: Elaboración propia)	99
Figura 89.- Simulador de máquina asíncrona. Curvas control escalar (Fuente: Elaboración propia)	100
Figura 90.- Simulador de máquina asíncrona. Diagrama del círculo (Fuente: Elaboración propia)	100
Figura 91.- Simulador de máquina síncrona. Curvas en V (Fuente: Elaboración propia)	101
Figura 92.- Simulador máquina síncrona. Diagrama fasorial (Fuente: Elaboración propia)	102
Figura 93.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden (Fuente: Elaboración propia)	102
Figura 94.- Análisis del circuito RL en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	103
Figura 95.- Análisis del circuito RC en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	103
Figura 96.- Análisis del circuito RL en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	103
Figura 97.- Análisis del circuito RC en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	103
Figura 98.- Transitorios eléctricos de primer orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)	104
Figura 99.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden (Fuente: Elaboración propia)	104
Figura 100.- Análisis del circuito RLC serie en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	105
Figura 101.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	105
Figura 102.- Análisis del circuito RLC serie en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	105
Figura 103.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	106
Figura 104.- Transitorios eléctricos de segundo orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)	106
Figura 105.- Herramienta completa desarrollada (Fuente: Elaboración propia)	107
Figura 106.- Representación de transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	115
Figura 107.- Modelo de transformador ideal (Fuente: Elaboración propia)	117
Figura 108.- Modelo bobinas acopladas (Fuente: Elaboración propia)	117
Figura 109.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	118
Figura 110.- Modelo aproximado de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	118
Figura 111.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)	119
Figura 112.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)	120
Figura 113.- Ensayo en vacío del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	120
Figura 114.- Cálculo de los parámetros de la rama paralelo (Fuente: Elaboración propia)	121
Figura 115.- Media y desviación de $R_{fe}$ (Fuente: Elaboración propia)	122
Figura 116.- Histograma de $R_{fe}$ (Fuente: Elaboración propia)	122
Figura 117.- Media y desviación de $X_{\mu}$ (Fuente: Elaboración propia)	123
Figura 118.- Histograma de $X_{\mu}$ (Fuente: Elaboración propia)	123
Figura 119.- Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	124
Figura 120.- Cálculo de los parámetros de la rama serie (Fuente: Elaboración propia)	124
Figura 121.- Media y desviación de $R_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	126
Figura 122.- Histograma de $R_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	126
Figura 123.- Media y desviación de $X_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	126
Figura 124.- Histograma de $X_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	126
Figura 125.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	127
Figura 126.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	129
Figura 127.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)	129
Figura 128.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	134



---

Figura 129.- Modelo bobinas acopladas y modelo mejorado (Fuente: Elaboración propia)	134
Figura 130.- Equivalencia entre dos modelos de transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	135
Figura 131.- Corriente de vacío de un transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)	136
Figura 132.- Curva de vacío y obtención del ciclo de histéresis (Fuente: Elaboración propia)	136
Figura 133.- Transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	137
Figura 134.- Devanados transformador trifásico	137
Figura 135.- Modelo de transformador trifásico equilibrado (Fuente: Elaboración propia)	138
Figura 136.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)	138
Figura 137.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)	139
Figura 138.- Ensayo en vacío del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	139
Figura 139.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de $R_{FE}$ (Fuente: Elaboración propia)	141
Figura 140.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de $X_{\mu}$ (Fuente: Elaboración propia)	141
Figura 141.- Curva de vacío del transformador (Fuente: Elaboración propia)	142
Figura 142.- Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	143
Figura 143.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de $R_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	144
Figura 144.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de $X_{cc}$ (Fuente: Elaboración propia)	144
Figura 145.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	145
Figura 146.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	145
Figura 147.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)	147
Figura 148.- Desplazamiento de la tensión de neutro en banco trifásico (Fuente: Elaboración propia)	148
Figura 149.- Determinación experimental de Índice Horario (Fuente: Elaboración propia)	149
Figura 150.- Pantalla inicial. Índices Horarios (Fuente: Elaboración propia)	150
Figura 151.- Índices horarios. Selección alimentación	150
Figura 152.- Índices horarios. Selección de la conexión del primario (Fuente: Elaboración propia)	151
Figura 153.- Índices horarios. Representación tensiones primario y secundario (Fuente: Elaboración propia)	151
Figura 154.- Índices horarios. Selección conexión secundario (Fuente: Elaboración propia)	152
Figura 155.- Índices horarios. Resultado (Fuente: Elaboración propia)	152
Figura 156.- Circuito equivalente de máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	154
Figura 157.- Curvas características motor de inducción (Fuente: Elaboración propia)	155
Figura 158.- Diagrama fasorial de la máquina funcionando como motor (Fuente: Elaboración propia)	155
Figura 159.- Diagrama fasorial de la máquina funcionando como alternador (Fuente: Elaboración propia)	155
Figura 160.- Diagrama del círculo de una máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	156
Figura 161.- Curvas características máquina asíncrona (motor y alternador) (Fuente: Elaboración propia)	157
Figura 162.- Máquina asíncrona de rotor de jaula ensayada (Fuente: Elaboración propia)	158
Figura 163.- Curva potencia absorbida frente a la velocidad (Fuente: Elaboración propia)	158
Figura 164.- Curva corriente frente a velocidad de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	159
Figura 165.- Curva potencia reactiva frente a velocidad de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	159
Figura 166.- Diagrama del círculo de una máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	160
Figura 167.- Funcionamiento de la máquina en rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)	161

---

Figura 168.- Rama serie obtenida a partir del funcionamiento en rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)	161
Figura 169.- Funcionamiento en vacío de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	163
Figura 170.- Rama paralelo obtenida a partir del funcionamiento en vacío (Fuente: Elaboración propia)	164
Figura 171.- Potencia útil frente a la velocidad en la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)	165
Figura 172.- Diagrama del círculo con los datos adquiridos (Fuente: Elaboración propia)	166
Figura 173.- Curvas características de la máquina ensayada (Fuente: Elaboración propia)	167
Figura 174.- Curvas características de la máquina ensayada (control escalar) (Fuente: Elaboración propia)	167
Figura 175.- Estudio ante variaciones de la resistencia del rotor (Fuente: Elaboración propia)	168
Figura 176.- Máquina asíncrona de rotor bobinado ensayada (Fuente: Elaboración propia)	168
Figura 177.- Corrientes de estator y rotor 1 (Fuente: Elaboración propia)	169
Figura 178.- Corrientes de estator y rotor 2 (Fuente: Elaboración propia)	170
Figura 179.- Determinación del momento de inercia (Fuente: Elaboración propia)	170
Figura 180.- Separación de pérdidas mecánicas (Fuente: Elaboración propia)	172
Figura 181.- Curva de deceleración (Fuente: Elaboración propia)	173
Figura 182.- Constitución máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	174
Figura 183.- Esquema unifilar de la máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	175
Figura 184.- Esquema general máquina con carga (Fuente: Elaboración propia)	176
Figura 185.- Esquema en dominio fasorial (Fuente: Elaboración propia)	177
Figura 186.- Esquema monofásico equivalente (Fuente: Elaboración propia)	177
Figura 187.- Diagrama fasorial de la máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	178
Figura 188.- Máquina síncrona funcionando como generador y aportando energía reactiva capacitiva (Fuente: Elaboración propia)	178
Figura 189.- Máquina síncrona funcionando como motor y consumiendo energía reactiva capacitiva (Fuente: Elaboración propia)	179
Figura 190.- Máquina síncrona funcionando como motor y consumiendo energía reactiva inductiva (Fuente: Elaboración propia)	179
Figura 191.- Máquina síncrona ensayada (Fuente: Elaboración propia)	180
Figura 192.- Característica de vacío de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	181
Figura 193.- Tratamiento datos característica de vacío (Fuente: Elaboración propia)	181
Figura 194.- Característica reactiva de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	183
Figura 195.- Característica de cortocircuito de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	183
Figura 196.- Curvas en V de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	184
Figura 197.- Simulador de máquina síncrona. Curvas en V (Fuente: Elaboración propia)	185
Figura 198.- Ensayo de deslizamiento de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)	186
Figura 199.- Motor de corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	187
Figura 200.- Motor de corriente continua de excitación independiente (Fuente: Elaboración propia)	188
Figura 201.- Motor de corriente continua excitación derivación (Fuente: Elaboración propia)	189
Figura 202.- Motor de corriente continua excitación serie (Fuente: Elaboración propia)	189
Figura 203.- Motor de corriente continua excitación compuesta corta (Fuente: Elaboración propia)	190
Figura 204.- Motor de corriente continua excitación compuesta larga (Fuente: Elaboración propia)	190
Figura 205.- Máquina de cc ensayada (Fuente: Elaboración propia)	192
Figura 206.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)	193



Figura 207.- Variación de velocidad frente a la excitación	193
Figura 208.- Variación de velocidad frente a la tensión aplicada (Fuente: Elaboración propia)	194
Figura 209.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)	195
Figura 210.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)	195
Figura 211.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)	197
Figura 212.- Curva de par-velocidad (Fuente: Elaboración propia)	197
Figura 213.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)	198
Figura 214.- Curva de par-velocidad (Fuente: Elaboración propia)	199
Figura 215.- Datos en servidor Box (1) (Fuente: Elaboración propia)	200
Figura 216.- Datos en servidor Box (2) (Fuente: Elaboración propia)	200
Figura 217.- Datos en servidor OwnCloud (1) (Fuente: Elaboración propia)	201
Figura 218.- Datos en servidor OwnCloud (2) (Fuente: Elaboración propia)	201
Figura 219.- Datos en servidor Google Drive (1) (Fuente: Elaboración propia)	202
Figura 220.- Datos en servidor Google Drive (2) (Fuente: Elaboración propia)	202
Figura 221.- Gestión de ficheros con el software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)	203
Figura 222.- Acceso desde dispositivo Tablet (Fuente: Elaboración propia)	203
Figura 223.- Acceso WEB desde ordenador (Fuente: Elaboración propia)	204
Figura 224.- Transitorio en resistencia eléctrica (Fuente: Elaboración propia)	205
Figura 225.- Transitorio en bobina con núcleo de aire (Fuente: Elaboración propia)	205
Figura 226.- Transitorio en bobina con núcleo ferromagnético (Fuente: Elaboración propia)	206
Figura 227.- Bobina con núcleo ferromagnético en estado estacionario (Fuente: Elaboración propia)	206
Figura 228.- Transitorio en condensador (Fuente: Elaboración propia)	207
Figura 229.- Detalle transitorio en condensador (Fuente: Elaboración propia)	207
Figura 230.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden (Fuente: Elaboración propia)	208
Figura 231.- Análisis del circuito RL en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	209
Figura 232.- Análisis del circuito RC en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	209
Figura 233.- Análisis del circuito RL en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	209
Figura 234.- Análisis del circuito RC en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	209
Figura 235.- Transitorios eléctricos de primer orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)	210
Figura 236.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden (Fuente: Elaboración propia)	210
Figura 237.- Análisis del circuito RLC serie en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	211
Figura 238.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)	211
Figura 239.- Análisis del circuito RLC serie en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	211
Figura 240.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	212
Figura 241.- Transitorios eléctricos de segundo orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)	212
Figura 242.- Control WEB de cargas monofásicas (Fuente: Elaboración propia)	213
Figura 243.- Control WEB cargas trifásicas (Fuente: Elaboración propia)	214
Figura 244.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)	214
Figura 245.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)	215
Figura 246.- Autómata utilizado (Fuente: Elaboración propia)	215
Figura 247.- Equipo de control en tiempo real utilizado (Fuente: Elaboración propia)	215
Figura 248.- Parte de la librería de Máquinas Eléctricas de EcosimPRO (Fuente: WEB <a href="http://www.ecosimpro.com">www.ecosimpro.com</a> )	218

---

Figura 249.- Ejemplo de simulación de motor en EcosimPRO (Fuente: WEB <a href="http://www.ecosimpro.com">www.ecosimpro.com</a> )	218
Figura 250.- Telegestión de Minicentral El Cabildo (Fuente: Elaboración propia)	220
Figura 251.- Gestión de alarmas en S. A. La Cerámica (Fuente: Elaboración propia)	222
Figura 252.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)	237
Figura 253.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)	238
Figura 254.- Ensayo en vacío del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	238
Figura 255.- Cálculo de los parámetros de la rama paralelo (Fuente: Elaboración propia)	239
Figura 256.- Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	240
Figura 257.- Cálculo de los parámetros de la rama serie (Fuente: Elaboración propia)	241
Figura 258.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	242
Figura 259.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	243
Figura 260.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)	243
Figura 261.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)	244
Figura 262.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)	245
Figura 263.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)	246
Figura 264.- Ensayo en vacío del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	246
Figura 265.- Curva de vacío del transformador (Fuente: Elaboración propia)	248
Figura 266.- Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	249
Figura 267.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	251
Figura 268.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)	251
Figura 269.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)	252
Figura 270.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)	252



## Índice de tablas

Tabla 1.- Características del transductor de tensión LEM LV 25P .....	66
Tabla 2.- Características del transductor de corriente LEM LTA 50P .....	67
Tabla 3.- Características del transductor de corriente LEM HY 5P y LEM HY 25P .....	68
Tabla 4.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador.....	121
Tabla 5.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito .....	125
Tabla 6.- Datos del ensayo en carga del transformador monofásico.....	128
Tabla 7.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores medios ( $\mu$ ).....	130
Tabla 8.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ ).....	130
Tabla 9.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ ).....	131
Tabla 10.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores medios ( $\mu$ ).....	131
Tabla 11.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ ).....	132
Tabla 12.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ ).....	132
Tabla 13.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores medios ( $\mu$ ).....	132
Tabla 14.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ ).....	133
Tabla 15.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ ).....	133
Tabla 16.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador.....	140
Tabla 17.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito.....	143
Tabla 18.- Datos del ensayo en carga del transformador trifásico .....	146
Tabla 19.- Resultados para el ensayo en carga de 868 W.....	147
Tabla 20.- Resultados para el ensayo en carga de 560 W.....	148
Tabla 21.- Datos del diagrama del círculo exportados a Excel .....	160
Tabla 22.- Valores obtenido de la máquina con rotor bloqueado .....	162
Tabla 23.- Valores obtenido de la máquina a velocidad de sincronismo.....	164
Tabla 24.- Detalle datos característica de vacío (Excel) .....	182
Tabla 25.- Variación de velocidad frente a la carga .....	196
Tabla 26.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador.....	239
Tabla 27.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito.....	241
Tabla 28.- Resultados del ensayo en carga de 1023,49 W .....	244
Tabla 29.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador.....	247
Tabla 30.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito.....	250

## Índice de fórmulas

Fórmula 1.- Ley de Faraday .....	116
Fórmula 2.- Relación de transformación .....	116
Fórmula 3.- Transformador ideal.....	117
Fórmula 4.- Tensión primario .....	117
Fórmula 5.- Tensión secundario.....	117
Fórmula 6.- Coeficiente de autoinducción L1 .....	135
Fórmula 7.- Coeficiente de autoinducción L2 .....	135
Fórmula 8.- Coeficiente de inductancia mutua M .....	135
Fórmula 9.- Velocidad síncrona (rps).....	153
Fórmula 10.- Velocidad síncrona (rpm) .....	153
Fórmula 11.- Ley de Faraday .....	153
Fórmula 12.- Fuerza magnética.....	154
Fórmula 13.- Potencia activa.....	156
Fórmula 14.- Potencia reactiva.....	156
Fórmula 15.-Movimiento rotativo .....	171
Fórmula 16.- Par en la desconexión.....	171
Fórmula 17.- Potencia en la desconexión .....	171
Fórmula 18.- Momento de inercia J.....	171
Fórmula 19.- Aproximación de pérdidas a ecuación de segundo grado.....	172
Fórmula 20.- Pérdidas en el hierro más perdidas devanados en vacío.....	172
Fórmula 21.- Pérdidas en el devanado del estator en vacío.....	173
Fórmula 22.- Pérdidas en el hierro .....	173
Fórmula 23.- Momento de inercia .....	173
Fórmula 24.- Velocidad síncrona .....	175
Fórmula 25.- Tensiones entre fase y neutro .....	176
Fórmula 26.- Corrientes de línea .....	176
Fórmula 27.- Tensión en bornes .....	176
Fórmula 28.- Fasor tensión generador .....	177
Fórmula 29.- Fasor tensión en bornes .....	177
Fórmula 30.- Fasor corriente de línea.....	177
Fórmula 31.- Segunda ley de Kirchhoff.....	177
Fórmula 32.- Potencias activa y reactiva.....	177
Fórmula 33.- Ley de Ampere.....	187
Fórmula 34.- Fórmula de Lorentz .....	188
Fórmula 35.- Fuerza contraelectromotriz 1 .....	190
Fórmula 36.- Fuerza contraelectromotriz 2.....	191
Fórmula 37.- Velocidad.....	191





# Capítulo 1

## Justificación y Objetivos



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*

## Capítulo 1.- Justificación y Objetivos

### 1.1- Justificación

Esta Tesis Doctoral tiene como título: “*Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial*”.

El avance imparable de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones ha permitido incorporar nuevos elementos en el análisis y estudio de cualquier fenómeno en Ingeniería, también en el ámbito de las Máquinas Eléctricas.

El primero y más básico de estos nuevos elementos para el estudio y análisis es la simulación, que consiste en la obtención de un modelo matemático que exprese el comportamiento del fenómeno objeto de estudio. Si bien la técnica de simulación viene usándose desde hace varias décadas, los avances en tecnologías de la computación han conseguido mejorar los modelos tradicionales para la representación de las máquinas eléctricas [1 – 3].

Uno de los requisitos necesarios para una óptima simulación de máquinas eléctricas es la determinación de los parámetros de los modelos de las diferentes máquinas para una mejor estimación y/o observación de variables no medibles. Los parámetros específicos para cada máquina se suelen obtener a partir de una serie de ensayos sobre las propias máquinas eléctricas.

Como indica el propio título de la tesis, se pretende crear una herramienta que posibilite los “*ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos*” y permita, a través de simulación, el análisis y estudio de estas máquinas eléctricas.

El segundo de los nuevos elementos que proporcionan las Nuevas Tecnologías y que consideramos en este trabajo es la simulación en Tiempo Real: Si bien el modelado y la simulación son importantes para la comprensión (y posterior optimización) de los diferentes fenómenos en Ingeniería, la experimentación en Tiempo Real complementa de manera perfecta al modelado y simulación, ya que permite ir corrigiendo y adaptando los modelos de las máquinas eléctricas [4, 5].

En este sentido, la herramienta que se pretende desarrollar ha de implementar la experimentación (mediante monitorización y ensayos) para la determinación y cálculo, en Tiempo Real, de los parámetros característicos.



Un tercer elemento que ha permitido una “revolución” en los sistemas industriales han sido las comunicaciones. Éstas posibilitan la interconexión de dispositivos físicos (de diferentes fabricantes y distintas funcionalidades), sin más que compartir el protocolo de comunicaciones. Además, las comunicaciones interconectan los diferentes dispositivos físicos con software para su gestión y control [6].

Mediante las comunicaciones se va a aumentar grandemente la funcionalidad del sistema permitiendo integrar dispositivos de oficina (dispositivos móviles, computadoras, etc.) con dispositivos industriales para, por ejemplo, realizar control remoto y control vía WEB, o disponer en tiempo real de los datos adquiridos.

La herramienta a desarrollar ha de incorporar, por tanto, diferentes niveles de comunicaciones que permitan el control remoto y control vía WEB del fenómeno objeto de estudio. Los protocolos que se usarán serán protocolos industriales con el fin de que sea posible *“su implementación en un entorno industrial”*. De la misma manera, los dispositivos físicos a utilizar deberán ser dispositivos utilizados en sistemas industriales.

Otro elemento que permiten las Nuevas Tecnologías, y que consideramos en este trabajo en cuarto lugar, es el tratamiento sistemático de los datos adquiridos procedentes de la monitorización y ensayos de las máquinas eléctricas. Este tratamiento sistemático permitirá la determinación, también sistemática de los parámetros de las máquinas eléctricas, y por tanto, de los modelos que las caracterizan.

Esta característica del tratamiento sistemático de los datos también ha de ser implementada en la herramienta a desarrollar en esta tesis. Con esto se conseguirá la generación sistemáticas de los diferentes modelos de máquinas eléctricas.

Un quinto elemento fruto de las Nuevas Tecnologías es la creación de nuevas herramientas de aprendizaje online para el análisis del funcionamiento de las máquinas eléctricas.

En la herramienta a desarrollar será posible la creación de nuevas herramientas de aprendizaje a partir de los datos adquiridos en la monitorización y ensayos de las máquinas, y mediante la utilización de los simuladores elaborados [7 – 9].

La tendencia actual en los sistemas industriales es que tengan la característica de abiertos y configurables. Por una parte deben permitir la integración, tanto hardware como software, de elementos de diferentes fabricantes y marcas. Por otra parte, van a poder adaptarse, mediante configuración, a la función que se desee implementar.

En este sentido, se pretende crear una herramienta que posibilite el estudio y análisis de diferentes máquinas eléctricas (transformadores, máquinas de inducción, síncronas y de corriente continua), que permita la configuración de diferentes ensayos

en estas máquinas eléctricas, y que sea capaz de integrar dispositivos físicos de distintos fabricantes. De esta manera se conseguirá la “*Generación sistemática de un modelo de gestión y control de máquinas eléctricas*” que da título al trabajo presentado en esta tesis.

## 1.2- Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es la incorporación de nuevos elementos de análisis y estudio de máquinas eléctricas a partir del avance de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones (simulación, control remoto, monitorización, control WEB, herramientas de aprendizaje, etc.) con el fin de elaborar un modelo sistemático de adquisición de datos y control para la determinación de los parámetros fundamentales de las máquinas eléctricas.

Este objetivo principal se traduce en los objetivos específicos relacionados a continuación.

El primer objetivo específico es el de crear un sistema multimáquina que permita ser implementado tanto en transformadores eléctricos, máquinas de inducción, máquinas síncronas, máquinas de corriente continua, e incluso en la propia red eléctrica.

Mediante el desarrollo de un sistema multimáquina se conseguirá que la plataforma desarrollada sea versátil y permita múltiples aplicaciones. De esta forma se obtiene una única plataforma que puede ser utilizada en momentos diferentes para distintas aplicaciones y máquinas eléctricas. Con esto se va a conseguir que la explotación, uso y mantenimiento de esta plataforma sea bastante más simple que el caso de disponer de una plataforma para cada tipo de máquina objeto de estudio y análisis.

El segundo objetivo específico es el tratamiento sistemático de los datos adquiridos con el fin de disponer de una buena base de información de la máquina objeto de análisis y estudio. Esta fuente de información procedente de los datos adquiridos permitirá la validación de simuladores útiles para la comprensión del funcionamiento de la máquina, y para funciones de diagnóstico y mantenimiento.

La creación de ficheros sistemáticos posibilita un tratamiento automatizado de los mismos y, por tanto, su utilización masiva para estudios de funcionamiento, análisis, etc.

Además, el tratamiento sistemático de los datos adquiridos va a permitir la interconexión con otros sistemas tales como simuladores, sistemas en tiempo real, etc.



El tercer objetivo específico será la elaboración de simuladores, lo que facilitará la comprensión del funcionamiento de la máquina.

La generación de simuladores a partir de los datos adquiridos de los ensayos permite realizar un estudio más profundo de la máquina concreta que se está analizando.

La tendencia actual es la incorporación de simuladores como nuevo elemento de análisis del fenómeno objeto de estudio.

El cuarto objetivo específico es que el sistema desarrollado incorpore distintos niveles de comunicaciones con el fin de poder realizar un control remoto, monitorización, integración entre diversos sistemas, control vía WEB, utilización de la “nube” para almacenamiento, etc.

Hoy no se concibe ningún sistema, incluidos los sistemas industriales, que no incorpore las comunicaciones para todo tipo de tareas como las mencionadas (control remoto, monitorización, integración entre diversos sistemas, control vía WEB, utilización de la “nube” para almacenamiento, etc.).

Esta característica de las comunicaciones va a aumentar en gran medida la funcionalidad del sistema permitiendo utilizar el elemento idóneo para cada tarea específica. Por ejemplo, si existe un software que realiza de manera eficiente los informes, los datos pueden ser enviados a dicho software mediante los protocolos correspondientes y dejar que la tarea de realizar informes la realice este software. Y lo mismo se puede decir de tareas de análisis estadístico, análisis por elementos finitos, etc.

La incorporación de las comunicaciones permitirá una simulación en tiempo real.

El quinto objetivo específico es que sea un sistema válido para entornos industriales.

Con ello se conseguirá que el sistema sea válido tanto para educación superior, industria y laboratorios de investigación.

De esta manera se conseguirá una herramienta que se pueda aplicar al análisis de cualquier fenómeno eléctrico en el ambiente propio de las máquinas eléctricas, el ambiente industrial. Por otra parte, el que la herramienta sea válida para entornos industriales facilita las tareas de mantenimiento de la propia herramienta, dado que estará formada principalmente por dispositivos industriales.

Actualmente tanto por su rapidez de respuesta como su posibilidad de reconfiguración se utilizan dispositivos embebidos FPGA, dispositivos que serán susceptibles de ser integrados en la plataforma a desarrollar.

El sexto objetivo específico es que el sistema sea abierto y configurable permitiendo tanto la interconexión con dispositivos (software y hardware) diversos como la adaptación del propio dispositivo a la tarea inmediata requerida.

Este objetivo permitirá la aplicación de la herramienta desarrollada prácticamente a cualquier fenómeno que se desee estudiar, sin más que cambiar los parámetros de configuración y utilizar los dispositivos específicos para la realización de esta tarea.

Además, el que el sistema sea abierto posibilitará la incorporación de nuevos fenómenos objeto de estudio en tiempo de explotación de la propia plataforma desarrollada.

El séptimo objetivo específico es la creación de nuevas herramientas de aprendizaje útiles para los Estudios de Educación Superior que incorporen tanto elementos offline (Laboratorios Virtuales) como elementos online (Laboratorios Remotos).

Las nuevas herramientas de aprendizaje constituyen un primer contacto con el fenómeno objeto de estudio en un ambiente seguro y, en algunos casos, una etapa anterior al proceso de aprendizaje que continúa con los Laboratorios Remotos experimentando con el sistema real.

### **1.3- Metodología de trabajo**

El trabajo desarrollado en esta tesis se ha dividido en tres capítulos (Estado del Arte, Desarrollo de la Herramienta y Aplicación de la herramienta desarrollada), además del presente capítulo de introducción, el capítulo de conclusiones y el de referencias bibliográficas.

El Estado del Arte, capítulo 2, se ha estructurado en seis partes en las que se hace una revisión del estado actual de la técnica respecto a los aspectos fundamentales tratados en el desarrollo de esta tesis:

- Simulación de Máquinas Eléctricas.
- Simulación en Tiempo Real.
- Comunicaciones.
- Monitorización y Tratamiento de datos.
- Nuevas herramientas de Aprendizaje Online.
- Plataformas de Gestión y Control.

En el Desarrollo de la Herramienta, capítulo 3, se hace una exposición de las herramientas desarrolladas en esta tesis doctoral, así como los diferentes dispositivos utilizados en la misma, para la consecución de los objetivos marcados en el capítulo primero y teniendo en cuenta el estado de la técnica.

Dado que se pretende la “Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas” el sistema desarrollado ha de permitir el análisis y la caracterización de cualquier máquina eléctrica. Las máquinas eléctricas más habituales en el entorno industrial son los transformadores eléctricos (monofásicos y trifásicos), las máquinas de inducción, máquinas síncronas y máquinas de corriente continua (figura 1).

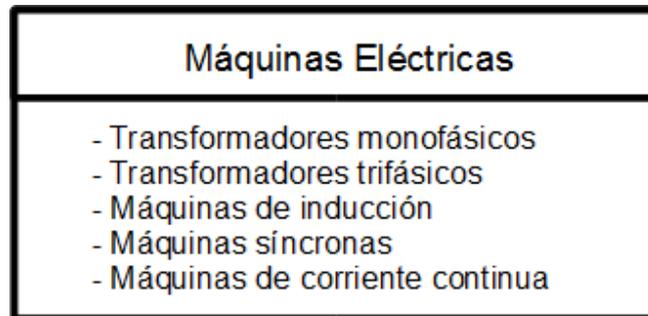


Figura 1.- Máquinas eléctricas consideradas (Fuente: Elaboración propia)

Para la “determinación de sus parámetros característicos” es necesaria la medición de una serie de variables eléctricas, principalmente tensiones, corrientes, potencias y energías, así como velocidades en el caso de máquinas rotativas (véase la figura 2 en la que se detallan alguno de estos elementos).

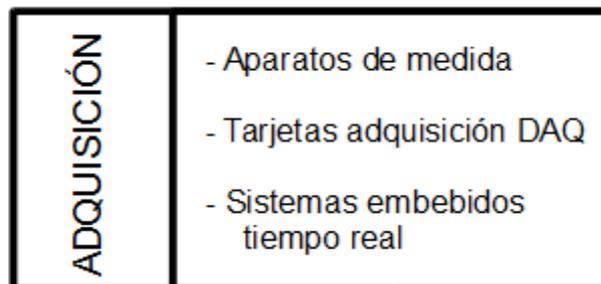


Figura 2.- Dispositivos físicos de adquisición (Fuente: Elaboración propia)

Estos equipos físicos de medida permiten “su implementación en un entorno industrial” por lo que la elección de los mismos se ha realizado teniendo presente esta característica.

Con el fin de realizar el “control de ensayos de máquinas eléctricas” el sistema a desarrollar utiliza una serie de dispositivos físicos que permiten la realización de distintas configuraciones de montaje (véase la figura 3 en la que se detallan algunos elementos utilizados).

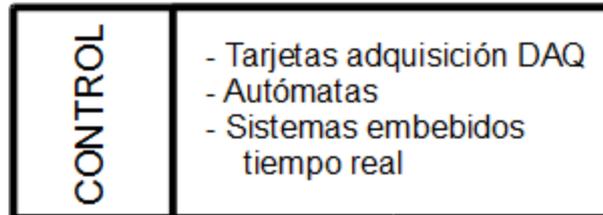


Figura 3.- Dispositivos físicos de control (Fuente: Elaboración propia)

Como en el caso de los equipos físicos de medida, los dispositivos de control posibilitan “su implementación en un entorno industrial”.

La “gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas” consiste en la configuración de los diferentes montajes (por medio de los dispositivos físicos de control), y la adquisición de unas determinadas variables eléctricas (por medio de los dispositivos físicos de medida) con el fin de analizar el fenómeno deseado. Para realizar esta tarea de gestión y control ha sido necesario desarrollar un software (que constituirá el elemento central del sistema) que interconecte los dispositivos de medida y los dispositivos de control (véase figura 4), abierto y configurable, y que permite establecer para cada máquina objeto de estudio los componentes siguientes:

- Variables medidas de adquisición necesarias para caracterizar la máquina. Estas variables serán principalmente tensiones eléctricas, corrientes eléctricas, potencias eléctricas, energía, par y velocidad.
- Variables calculadas a partir de los datos de las variables medidas.
- Factores de escala para cada una de las variables (medidas y calculadas).
- Diferentes dispositivos que se utilizarán para realizar la adquisición de datos de las variables medidas (aparatos de medida, tarjetas de adquisición de datos, etc.).
- Variables de control que permitirán la activación de las salidas.
- Dispositivos de control que efectúan la activación de las diferentes salidas (autómatas, dispositivos de control en tiempo real, etc.).
- Gráficas para visualizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo o para relacionar unas variables con otras.
- Elementos de visualización tales como diagramas fasoriales, indicadores gráficos, elementos de animación, etc.
- Dibujos y esquemas representativos de la máquina eléctrica, para ilustrar los diferentes montajes.

El software a desarrollar permite discriminar, por lo tanto cada máquina eléctrica, y también el fenómeno eléctrico objeto de estudio asociado a esa máquina eléctrica.

La configuración de cada máquina (o fenómeno) se puede hacer en tiempo de ejecución, por lo que es posible añadir nuevos ensayos o máquinas eléctricas posteriormente sin alterar el software desarrollado.

Por otra parte, el software desarrollado permite también el tratamiento multidispositivo, es decir, para las funciones principales de adquisición y control permite la inclusión de dispositivos de diferentes características: dispositivos de medida que proporcionan valores medios y eficaces, dispositivos de medida que proporcionan valores instantáneos, dispositivos de control tales como autómatas u otros dispositivos de control en tiempo real, etc. En definitiva permite la integración de dispositivos procedentes de diferentes fabricantes.

Este mismo software, según la tendencia actual de las aplicaciones industriales, permite un control remoto del sistema, así como un control vía WEB.

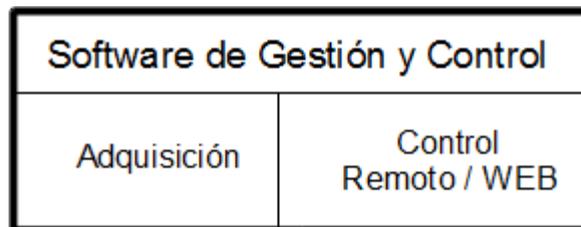


Figura 4.- Software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)

Para conseguir la “*Generación sistemática...*” todos los datos adquiridos son almacenados, de forma automática y sistemática, en diferentes ficheros para su posterior utilización para el análisis o reproducción del experimento realizado.

En la primera fase, de almacenamiento, y con el tratamiento sistemático se consigue generar ficheros homogéneos para todas las máquinas eléctricas. Esta homogeneidad permite la visualización de los mismos con una única herramienta software.

En una segunda fase, la generación sistemática de ficheros sirve para la determinación, también sistemática, de los parámetros que conforman los modelos de máquinas eléctricas, así como la consideración de los mismos para el establecimiento de alarmas, estrategias de control, etc.

A partir de los diferentes modelos de máquinas eléctricas se han generado simuladores del funcionamiento de diversas máquinas eléctricas. Estos simuladores van a permitir visualizar de forma gráfica e intuitiva el funcionamiento de las máquinas

eléctricas, calculando la variación de la respuesta de la máquina ante el cambio en las condiciones de las entradas o variables independientes. Además, permiten obtener las condiciones necesarias para que la máquina funcione en un estado óptimo según ciertas especificaciones.

La gran cantidad de datos procedentes de los ficheros sistemáticos permitirán la validación de estos simuladores generados en el ámbito de esta tesis.

De igual manera, estos ficheros permitirán también la validación de simuladores externos al sistema desarrollado en este trabajo.

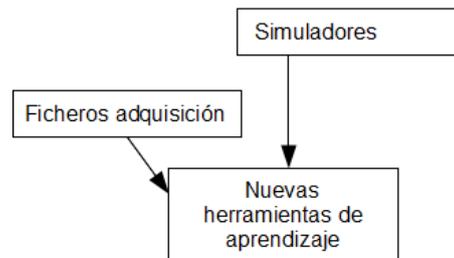


Figura 5.- Nuevas herramientas de aprendizaje (Fuente: Elaboración propia)

Estos simuladores, junto con los datos adquiridos, constituyen nuevas herramientas de aprendizaje de los diferentes fenómenos de las máquinas eléctricas (véase la figura 5).

La tendencia actual en el análisis y estudio de las máquinas eléctricas es la monitorización de los diferentes fenómenos eléctricos. Para conseguir esta característica de monitorización ha sido necesario incorporar distintos niveles de comunicaciones (figura 6) en la plataforma desarrollada.

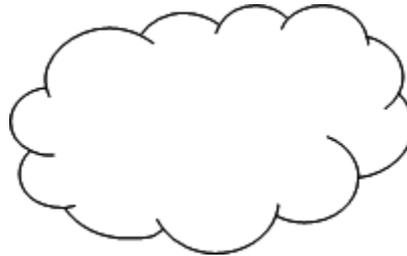


Figura 6.- Función de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia)

El modelo desarrollado ha de implementar los diferentes niveles en las comunicaciones:

- Comunicación entre los dispositivos de medida y control del propio sistema, que asegura la transferencia de datos (de medida y control) hacia el motor principal (software de gestión y control) para que proceda a su almacenamiento y tratamiento. Para su uso en laboratorios y entornos industriales se utilizan protocolos industriales de comunicaciones.
- Comunicación que permitan el control remoto del sistema de gestión y control. Se implementara, mediante diferentes aplicaciones, el control remoto del sistema de gestión y control. Este control remoto es posible realizarlo desde diferentes dispositivos (ordenadores, tablets, etc.).

- Comunicación para la visualización vía WEB del sistema desarrollado. El sistema a desarrollar permitirá su visualización mediante navegadores WEB, con lo que no será necesario la instalación del propio software de gestión y control.
- Comunicación para la interconexión entre diferentes software, para poder enviar y recibir datos de otras aplicaciones software.
- Comunicación para el almacenamiento de datos en la nube, mediante los protocolos FTP y WebDAV (véase figura 7).



**Figura 7.- Almacenamiento de datos en la nube (Fuente: Elaboración propia)**

Como resumen de los diferentes elementos desarrollados en esta tesis, en la figura 8 se representa un diagrama general.

En Aplicación de la herramienta desarrollada, capítulo 4, se estructura en dos fases: Primeramente se detallan una serie de aplicaciones de la herramienta sobre diversas máquinas eléctricas realizadas en un laboratorio de máquinas eléctricas. En la segunda parte se muestran una serie de aplicaciones desarrolladas en el ámbito industrial a partir de los elementos utilizados en la elaboración de esta tesis.

Se comienza el capítulo 4 exponiendo una aplicación de la herramienta desarrollada al análisis de los transformadores monofásicos. Se detallan los ensayos realizados y la adquisición de datos. Se calculan los parámetros del modelo a partir del análisis estadístico de los datos adquiridos. Se realizan varios ensayos de funcionamiento normal (en carga) para la validación del modelo. A continuación se genera un software simulador para analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga eléctrica conectada en su secundario.

Posteriormente se expone una aplicación práctica de la plataforma desarrollada al análisis de los transformadores trifásicos. Se detallan los ensayos realizados y la adquisición de datos. Se calculan los parámetros del modelo a partir del análisis estadístico de los datos adquiridos. Se realizan varios ensayos de funcionamiento normal (en carga) para la validación del modelo. A continuación se genera un software simulador para analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga

eléctrica conectada en su secundario. Se genera también un simulador de las diferentes conexiones de un transformador trifásico y determinación de su índice horario.

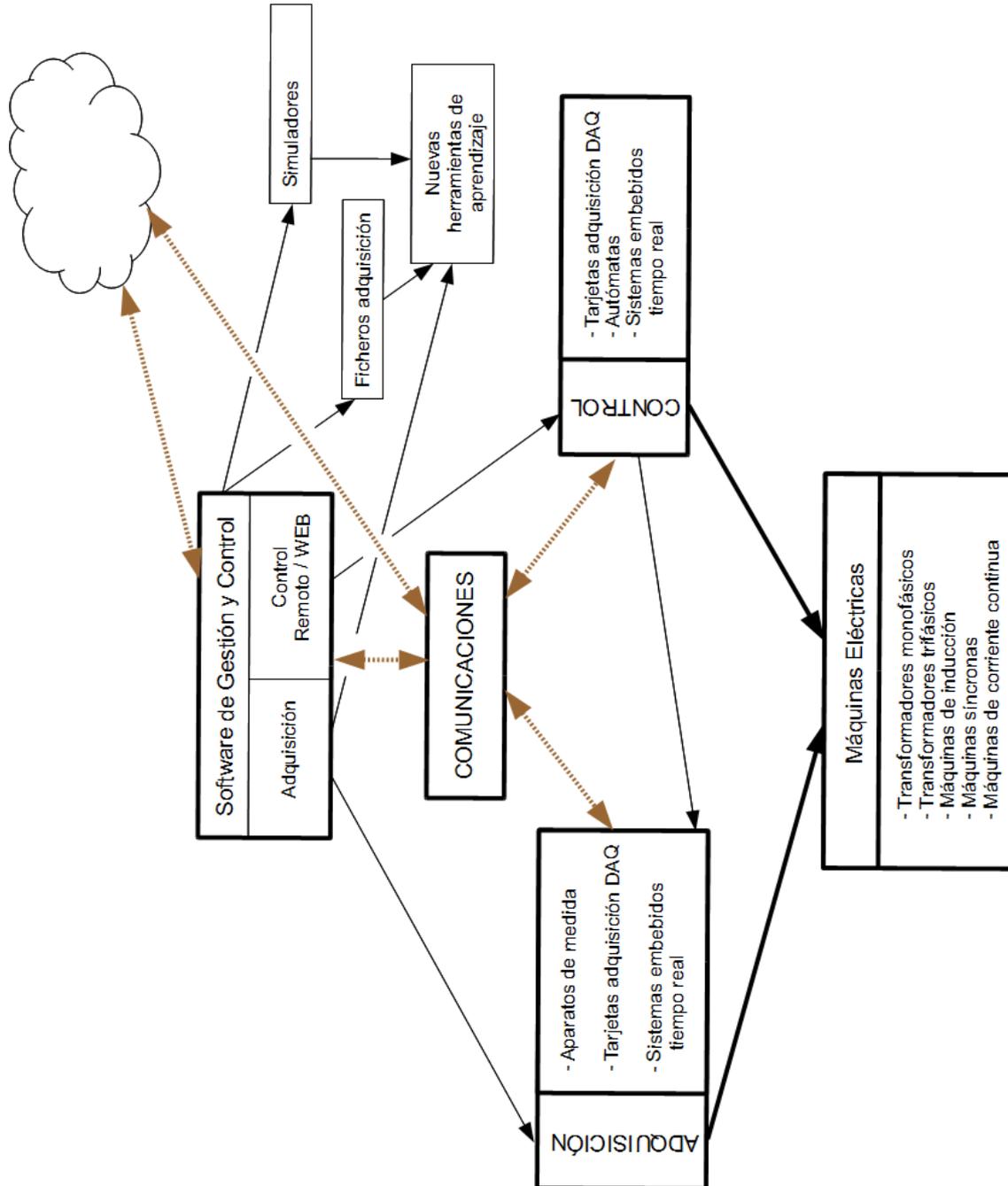


Figura 8.- Diagrama general (Fuente: Elaboración propia)

Seguidamente se expone una aplicación práctica de la plataforma desarrollada al análisis de las máquinas de inducción. Se detallan los ensayos realizados y la adquisición de datos. Se calculan los parámetros del modelo a partir del análisis estadístico de los datos adquiridos. Se realizan varios ensayos de funcionamiento



normal para la validación del modelo. A continuación se genera un software simulador para analizar el comportamiento de la máquina de inducción para cualquier régimen de funcionamiento. Se ha generado, además, otro software para la visualización del campo magnético giratorio de una máquina eléctrica de corriente alterna.

A continuación se expone una aplicación práctica de la plataforma desarrollada al análisis de las máquinas síncronas. Se detallan diversos ensayos realizados y la adquisición de datos. A continuación se genera un software simulador para analizar el comportamiento de la máquina síncrona como alternador para análisis de su funcionamiento en modo aislado y en modo conectado a la red eléctrica.

Se continúa con la exposición de una aplicación práctica de la plataforma desarrollada al análisis de las máquinas de corriente continua. Se detallan diversos ensayos realizados y la adquisición de datos. A continuación se muestran diversas curvas características obtenidas de los propios ensayos.

Seguidamente se expone algunas de las aplicaciones Internet y WEB mediante el uso de esta plataforma. En este apartado se expone el control de la plataforma desde navegadores WEB, y también desde aplicaciones Internet con Tablet o teléfonos móviles. Además, se presenta la utilización de diversos servidores WEB de almacenamiento de datos (“nube”) para el almacenamiento de los datos adquiridos sin necesidad de utilizar el dispositivo físico de la plataforma.

Respecto al control WEB se presentan tres aplicaciones;

- a) Control de cargas monofásicas, que permite la conexión de diferentes cargas monofásicas (resistencia, bobina de núcleo de aire, bobina de núcleo ferromagnético y condensador) y visualizar la respuesta estacionaria ante tensiones de corriente alterna.
- b) Control de cargas trifásicas, que permite la conexión de diferentes cargas trifásicas (resistencia, bobina de núcleo de aire, bobina de núcleo ferromagnético y condensador) y visualizar la respuesta estacionaria ante tensiones de corriente alterna.
- c) Control de transitorios eléctricos, que permite la conexión de diferentes cargas (resistencia, bobina de núcleo de aire, bobina de núcleo ferromagnético y condensador) y visualizar la respuesta transitoria de conexión y desconexión. En este apartado se presenta el desarrollo de un simulador de transitorios eléctricos de primer orden y otro simulador de transitorios de segundo orden.

Se termina este capítulo cuatro con varias aplicaciones industriales desarrolladas por el autor en el ámbito de esta tesis doctoral:

- Validación de librerías de simuladores EcosimPRO
- Sistema de Telegestión de Minicentrales Hidráulicas
- Gestión de alarmas de planta de Cogeneración

En Conclusiones y líneas de futuro, capítulo cinco, se muestran las conclusiones de este trabajo, así como las líneas de futuro que permitan continuar con el trabajo realizado en esta tesis.

En Anexos se exponen algunas aplicaciones más realizadas con la herramienta desarrollada, similares a las expuestas en el capítulo cuarto, pero con otras máquinas diferentes, con el fin de justificar la utilización de la plataforma en un sistema multimáquina.

Finalmente en la Bibliografía, capítulo seis, se exponen todas las referencias bibliográficas utilizadas en este documento.

## 1.4- Aportaciones originales

Las aportaciones originales de este trabajo están ligadas a la consecución de los objetivos planteados. Dentro de estas se pueden enumerar:

- Se ha establecido una equivalencia entre diferentes modelos de transformadores eléctricos, el modelo usado en Electricidad y el modelo usado en Automática y Electrónica. Incluso se propone un nuevo modelo incorporando nuevos elementos al usado frecuentemente en Automática y Electrónica.
- Generación de nuevas herramientas de aprendizaje de circuitos de corriente alterna, a partir de simuladores, laboratorios remotos y datos experimentales.
- Generación de nuevas herramientas de aprendizaje de transitorios en los circuitos eléctricos, a partir de simuladores, laboratorios remotos y datos experimentales.
- Hasta donde alcanza el conocimiento del autor, no se ha desarrollado una herramienta que permita el análisis y estudio de diferentes máquinas eléctricas con una sola plataforma, el control vía WEB, el almacenamiento en la nube, y todas las características que el sistema de gestión y control desarrollado incorporan.



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



# Capítulo 2

## Estado del Arte



## Capítulo 2.- Estado del Arte

### 2.1- Introducción

Para la elaboración de un modelo de gestión y control de Máquinas Eléctricas se debe considerar una serie de funcionalidades y características inherentes al proceso de gestión y control, como son la simulación, simulación en tiempo real, monitorización, comunicaciones, etc.

En este capítulo se hace una revisión del estado actual de la técnica respecto a los aspectos fundamentales tratados en el desarrollo de esta tesis.

Se realiza a continuación un análisis de publicaciones relacionadas con el objeto de esta tesis. Se ha considerado tanto tesis doctorales como artículos publicados en los últimos años.

Las fuentes de información, que se enumeran a continuación, se han obtenido desde las fuentes disponibles de la Universidad de Valladolid:

- IEEE Xplore Digital Library: Búsqueda artículos Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Bases de datos de tesis doctorales (TESEO).
- Tesis digitales de REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias).
- Xarxa: Tesis Doctorales en Red gestionadas por el Consorcio de Bibliotecas Universitarias de Cataluña.
- DIALNET: Tesis doctorales de las universidades españolas.
- WILEY: Búsqueda bases electrónicas publicaciones de libros y artículos.
- DART: Repositorio europeo que contiene tesis a texto completo de 213 universidades de 16 países europeos.
- UMI PROQUEST: Catálogo de tesis digitales principalmente norteamericanas recogidos por ProQuest.

El criterio principal de búsqueda ha sido electrical machines, que se ha filtrado con las siguientes palabras clave:

- Monitoring
- Simulated
- Control
- Remote control
- Remote labs
- Modeling
- Learning



De todos los resultados obtenidos se han escogido algunas de las relacionadas directamente en el ámbito de esta tesis, y principalmente de los últimos 10 años.

Dada la gran cantidad de referencias obtenida según este criterio de los 10 años, y que tengan relación directa con esta tesis, no se presentan todas ellas, sino las que a juicio del autor son las más representativas.

A modo de ejemplo se representa en la figura 9 una búsqueda en IEEE con las palabras clave “electrical machines” y “monitoring”, en el que se han obtenido 1.315 resultados procedentes de publicaciones desde el año 2004 al 2014.

The screenshot shows the IEEE Xplore Digital Library search interface. The search query is "electrical machines .and. monitoring". The results are filtered by "Publication Year: 2004 - 2015", resulting in 1,315 results. The interface includes a search bar, navigation tabs (Basic Search, Author Search, Publication Search), and a sidebar with filters for content type and publication year. A "Need Full-Text?" banner is visible on the right, along with a "SEARCH HISTORY" section.

Figura 9.- Búsqueda en IEEE 1 (Fuente: WEB IEEE)

Otro ejemplo, que se representa en la figura 10, consiste en una búsqueda en IEEE con las palabras clave “electrical machines” y “simulated”, en el que se han obtenido 1.155 resultados procedentes de publicaciones desde el año 2004 al 2014.

Figura 10.- Búsqueda en IEEE 2 (Fuente: WEB IEEE)

## 2.2- Simulación de Máquinas Eléctricas

Las nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones han permitido incorporar nuevos elementos en el análisis y estudio de cualquier fenómeno en Ingeniería. El primero y más básico de los elementos para el estudio y análisis es la simulación [1, 2, 4], que consiste en la obtención de un modelo matemático que expresa el comportamiento del fenómeno objeto de estudio. Dado que un modelo es una simplificación de la realidad objeto de estudio, lo natural es que el análisis aporte resultados aproximados y raramente aportará resultados exactos.

En el ámbito de esta tesis, las máquinas eléctricas, existe una gran cantidad de fenómenos de interés objeto de simulación. Se mencionan a continuación algunas simulaciones que aparecen con mayor frecuencia en el ámbito de las máquinas eléctricas:

- Elementos de educación interactivos para simulación e identificación de máquinas y transformadores eléctricos [10, 11].
- Simulación del circuito magnético para optimización de máquinas eléctricas y transformadores eléctricos de potencia [12 – 14].
- Simulación de máquina de inducción con varios objetivos:
  - Análisis del régimen transitorio [15],
  - Aplicaciones de gran potencia [16],



- Estudio de su comportamiento ante pequeñas perturbaciones [17] y ante asimetrías en el rotor [18],
- etc.
- Simulación de motores eléctricos en accionamientos eléctricos [19, 20].
- Determinación de parámetros de generadores mediante simulación [7, 21].
- Simulación de cargas eléctricas no lineales [22].

Mediante la simulación es posible considerar otros fenómenos como la diferente longitud de las columnas de un transformador eléctrico cuando se analiza su comportamiento magnético (véase la simulación realizada por Fuchs, E. F. [23]).

Si bien la técnica de la simulación viene usándose desde hace varias décadas, los avances en tecnologías de la computación han conseguido mejorar los modelos tradicionales para la representación de máquinas eléctricas. Se relacionan a continuación algunos ejemplos de modelos mejorados:

- Circuito equivalente utilizado para la consideración de las corrientes de Foucault [24] en los transformadores eléctricos.
- Modelo de ciclo de histéresis de transformadores eléctricos [3, 25].
- Nuevos modelos para la estimación de parámetros del motor de inducción [26].
- Modelo de máquina de inducción en aplicaciones de generación eólica [27].
- Estimación de parámetros de máquina de inducción considerando el modelo de estado estacionario y la función de transferencia [28].
- Determinación de los parámetros del circuito equivalente, momento de inercia, fricción y par a partir del transitorio de la corriente de arranque [29].
- Modelo de motor de inducción acoplado a variador de frecuencia de control vectorial [30].
- Nuevo modelo de identificación de motor de inducción mediante la aplicación de tensiones variables en vacío [31].
- Identificación de modelos de máquina de inducción multifase (5 fases) [32].
- Determinación de parámetros de la máquina de inducción mediante nuevo algoritmo recursivo de mínimos cuadrados [33].
- Estudio de la estabilidad de máquinas síncronas en sistemas eléctricos de potencia [34].
- Estimación de la temperatura de los devanados de un motor de inducción [35].
- Modelo de circuito equivalente de Motor utilizado en bomba sumergible [36].
- Nuevos modelos de máquinas eléctricas: “Field Reconstruction Method (FRM)” [37].
- Análisis del funcionamiento de las máquinas de inducción en régimen estacionario mediante técnicas en el dominio de la frecuencia [38].

- Determinación de la reactancia directa y en cuadratura de máquinas síncronas [39]

Uno de los requisitos necesarios para una óptima simulación de Máquinas Eléctricas es la determinación de los parámetros de los modelos de las diferentes máquinas para una mejor estimación y/o observación [40] de variables no medibles (p. ej. observador del flujo, estimación del par, etc.), o para el control de la misma [41 - 43]. Los parámetros específicos para cada máquina se suelen obtener mediante experimentación a partir de una serie de ensayos sobre las propias máquinas eléctricas, o también de las características proporcionadas por el fabricante.

La simulación va a permitir la introducción de componentes no lineales, tan frecuentes en las máquinas eléctricas por ejemplo en el comportamiento de los circuitos magnéticos [44 - 46], el funcionamiento de los transformadores ante tensiones no sinusoidales en primario y cargas no lineales en secundario [47].

Una vez generados los simuladores se utilizarán tanto para analizar el comportamiento de la máquina ante unas condiciones determinadas, como para observar la evolución de la respuesta ante la variación de las condiciones de entrada. Incluso se puede obtener las condiciones de las variables de entrada que determinan una respuesta óptima.

Tan importante como la obtención de la respuesta del sistema será la visualización de la evolución de las variables más importantes, por lo que, además de herramientas propias de simulación tendremos herramientas de visualización y/o de animación, almacenamiento de datos, etc. [48]. El simulador deberá integrar cada una de estas herramientas.

Distintas técnicas pueden ser usadas para implementar los modelos matemáticos: Algoritmos Genéticos [49, 50], Elementos Finitos [51, 52], Ecuaciones Diferenciales [53], Técnicas Metaheurísticas [54] o mediante un simple circuito equivalente [55, 56].

Es posible la coexistencia de varias herramientas de simulación en un mismo sistema. La tendencia actual es que estas herramientas permitan integrarse unas con otras [448] aprovechando la mayor eficiencia de cada una de ellas o implementando lo que algunos autores denominan “co-simulación” [57].

Si bien la respuesta proporcionada por los simuladores es una solución aproximada, la incorporación de modelos más complejos, y la velocidad de cálculo que proporciona la tecnología actual, permite la obtención de resultados más precisos en el estudio de cualquier fenómeno.



Diversos autores han realizado una comparación de los diferentes modelos de una máquina eléctrica [13, 15], comparación que es útil para determinar el modelo idóneo según el objetivo que se persiga: precisión en el modelo, rapidez de cálculo, modelo simple, etc. Por ejemplo, Mosayyebi, S.R. compara diferentes modelos de ciclo de histéresis de un circuito magnético [58].

Habitualmente se utiliza un software para la implementación del modelo de la simulación de tal manera que se determina la respuesta del sistema a analizar a partir de ciertas variables independientes de entrada. Diversas herramientas pueden ser utilizadas para la implementación del simulador: Destacamos, a modo de ejemplo, algunas simulaciones (relacionadas con las máquinas eléctricas, objeto de esta tesis) realizadas con Matlab/Simulink [23, 25, 59 - 61], con MWorks [62], con MathCAD [63], con Java EJS (Easy Java Simulations) [64], con LabVIEW [65, 66] y Matlab/SimPowerSystems [67].

### 2.3- Simulación en Tiempo Real

Si bien el modelado y la simulación son importantes para la comprensión (y posterior optimización) de los diferentes fenómenos en Ingeniería, la experimentación en tiempo real complementa de manera perfecta al modelado y simulación, ya que permite ir corrigiendo y adaptando los modelos de las Máquinas Eléctricas.

Es decir, si tradicionalmente los modelos se obtenían realizando una serie de ensayos cada cierto tiempo, mediante la adquisición de datos en tiempo real se consigue validar permanentemente los modelos de las máquinas eléctricas para realizar una mejor definición de los mismos.

A esta técnica que une la simulación con la experimentación en tiempo real se le denomina simulación en tiempo real. Debido al gran avance de herramientas de simulación como Matlab/Simulink con su Real Time Workshop (RTW), la simulación en tiempo real se está utilizando ampliamente en muchos campos de la ingeniería, tales como industria, educación e institutos de investigación [5, 8, 9, 70].

En las últimas tres décadas se ha producido una gran evolución de las herramientas de simulación debidas principalmente a la rápida evolución de las tecnologías de la computación. Estas tecnologías han disminuido en coste y han mejorado notablemente sus tiempos de respuesta lo que ha permitido el desarrollo de plataformas de bajo coste para la resolución de problemas complejos [5].

La simulación en tiempo real obtiene unos tiempos de respuesta mucho menores por tratarse de código compilado frente a los lenguajes interpretados que utilizan la mayoría de simuladores offline [5].

Las herramientas de simulación en tiempo real [22], como una parte de los experimentos de laboratorio de Máquinas Eléctricas, posibilita una experiencia mejorada del aprendizaje como consecuencia del manejo de situaciones en tiempo real [4, 68], constituyendo los llamados Laboratorios Remotos [69].

Por otra parte, la simulación en tiempo real proporciona un marco sólido para testear nuevas estrategias de control y protección con el fin de detectar, analizar y corregir problemas potenciales antes de entrar en servicio [70].

La implementación de esta característica de modelado y experimentación en tiempo real puede ser realizada en dispositivos muy diversos.

Inicialmente se utilizaron los microprocesadores de los computadores (da Costa realiza un prototipo con microprocesador de control PWM de una máquina de inducción [71]). También se utilizaron (hoy en día se siguen utilizando) dispositivos basados en tecnologías PC [72, 73].

Posteriormente se utilizaron otros dispositivos tales como Microcontroladores DSP. La tendencia actual es la implementación en sistemas embebidos FPGA (Field Programmable Gate Array) [5, 68, 74 - 77] que van a permitir una alta rapidez de respuesta y el prototipado rápido.

Otro de los avances actuales de la simulación en tiempo real es incluir hardware en lazo cerrado [78 - 88] con lo que se obtiene información eficiente del comportamiento del dispositivo a través de la realimentación. La inclusión de hardware en lazo cerrado posibilita la comprobación in situ de nuevas topologías de circuitos así como de nuevas técnicas de control [19, 59, 66, 81, 89, 90].

La simulación en tiempo real permite mejorar los modelos de la simulación offline. Por ejemplo, Zhou [91] en una aplicación de simulación en tiempo real de máquinas eléctricas realiza una revisión del método Runge-Kutta de cuarto orden consiguiendo que la computación de cinco pasos por iteración se realice en un solo paso por iteración aprovechando la capacidad de procesamiento en paralelo de los dispositivos FPGA [5, 67, 68, 73]. Respecto a los tiempos de computación, Pak Lok-Fu diseña un simulador en tiempo real cuyo máximo tiempo de computación es de  $5,35\mu\text{s}$  [92].

Para el ajuste y modificación de las estrategias de control se vienen utilizando dispositivos de rápido prototipado [59, 80, 81], que posibilitan la creación y adaptación del propio dispositivo en tiempo de explotación [77, 93].



La tendencia actual de los sistemas de simulación en tiempo real es que son abiertos [57], reactivos (reaccionan ante un cambio de condiciones), proactivos (evolucionan según unas funciones objetivo) e integrables con otros sistemas. Con estas características se podrá configurar lo que se empieza a denominar “Sistemas Multiagente” [94, 95].

La nueva generación de herramientas de simulación en tiempo real deberán tener las siguientes características [96]:

- Capaces de simular grandes sistemas, incluyendo sistemas electrónicos de potencia, con sistemas equilibrados y desequilibrados, con rápidas transiciones que operen en tiempos del tamaño de paso inferiores al microsegundo.
- Fácilmente escalables para permitir pequeños y grandes sistemas, con la posibilidad de incorporar plataformas de bajo coste.
- Capaces de conseguir una simulación multidominio (que integre análisis eléctrico, mecánico, térmico, etc.) y multiagente [94, 95].
- Basados en las herramientas de simulación con una arquitectura abierta [97] que facilite la interconexión de los sistemas de simulación con sistemas de prototipado desarrollados por diferentes equipos que permitan una simulación integral.
- Fácilmente actualizable y capaz de integrar procesadores de propósito general con procesadores reconfigurables, tales como FPGA, para conseguir la mejor implementación al menor precio.

## 2.4- Comunicaciones

Las comunicaciones es otro de los aspectos que han permitido una “revolución” en los sistemas industriales. Los diferentes protocolos y en especial el protocolo basado en Ethernet [6] permiten la integración de dispositivos correspondientes a diferentes niveles de comunicaciones.

Un primer nivel de comunicaciones sería la conexión entre los propios equipos industriales que controlan la planta del sistema. En estos casos, esta comunicación debe ser de tipo determinista, para asegurar el funcionamiento de la misma.

Un segundo nivel de las comunicaciones sería el que permitiera el Control Remoto [98] de los sistemas de gestión. En este caso solamente una serie de funciones claramente establecida están habilitadas para su realización de forma remota. La implementación de la función de Control Remoto también puede ser realizada mediante plataformas de bajo coste [99].

El Control Remoto posibilita la experimentación en Ingeniería Eléctrica evitando los riesgos de altas tensiones y corrientes [100]. Además, proporciona una de las características importantes de la monitorización Online [101].

La tendencia actual en la implementación de la función de Control Remoto es mediante Interfaces WEB (o mediante WEB Services), que posibilita un acceso más universal desde diferentes dispositivos [65, 66, 101 - 105].

Diferentes enlaces físicos pueden ser usados para el control remoto, dependiendo de su disponibilidad (Ethernet, GSM [102, 106 - 109], Serial, etc.).

Un tercer nivel en las comunicaciones (presente en la simulación en tiempo real) es la interconexión entre distintos software y sistemas lo que permite, por ejemplo, la transferencia de datos entre programa de Elementos Finitos y Software Simulador, mejorando notablemente el modelo de máquina objeto de estudio [52].

Un cuarto nivel en las comunicaciones es el denominado de informes que permite la generación automática de informes sobre el estado del sistema para diversos departamentos: mantenimiento, explotación, propiedad, etc. La comunicación de equipos de oficina con equipos industriales requerirá la utilización de protocolos industriales (p.ej. ModBUS [109, 110]) y ModBUS/TCP [111 - 115]), componentes OPCs (Ole For Process Control) [111, 116 - 119], componentes Web-services [120, 121], etc.

Un quinto nivel en las comunicaciones será el uso de la “nube” para el almacenamiento y posterior tratamiento de los datos mediante los protocolos WEB adecuados (WebDAV – Web Based Distributed Authoring and Versioning) [122 - 123]. Este tipo de comunicaciones cada vez van tomando más protagonismo de tal manera que incluso se está implementando el procesamiento de los datos en la propia “nube”.

## **2.5- Monitorización y Tratamiento de datos**

La tendencia actual en los sistemas industriales, también en el caso de sistemas con máquinas eléctricas, es la monitorización, que consiste en adquirir de forma continua una serie de variables para saber, en todo momento, el estado de la máquina o instalación [1, 22, 66, 100, 102, 103, 124 - 128].

Si en el pasado para comprobar el estado de una máquina era necesario sacarla del sistema de producción para realizar todo tipo de ensayos que determinen si su funcionamiento es correcto, mediante la monitorización no va a ser necesario parar el proceso de producción, y se va a detectar de forma temprana posibles problemas en el equipamiento.



Muchas son las aplicaciones de la monitorización, entre las que destacamos algunas de ellas:

- A partir del transitorio de arranque se realiza una detección temprana de fallas [129 - 134].
- Mediante el análisis de la corriente estatórica [135, 136] es posible diagnosticar excentricidades y otras asimetrías rotóricas [65, 98, 137 - 140].
- La monitorización de la tensión va a permitir detectar los huecos de tensión en máquinas de inducción y transformadores eléctricos [141].
- Detección de fallas mecánicas en motores de inducción [75, 76, 142 - 148].
- Diagnóstico de fallas en generadores síncronos [149, 150].
- Detección de fallas en motores síncronos [151].
- Detección de cortocircuitos entre espiras [152, 153].
- Monitorización de la red eléctrica para detección de fallas [154, 155] reconfigurable [93].
- Elaboración de un sistema de mantenimiento predictivo [156 - 158].

Para conseguir el objetivo de la monitorización (estudio, mantenimiento, etc.) es importante determinar el número mínimo de variables (condition monitoring) a considerar [159, 160]. Ligu Hou propone un sistema para motor de inducción mediante una red de sensores “wireless” [112].

Además de la monitorización de la señal correspondiente, es importante el tratamiento de los datos proporcionados por la monitorización. Distintas técnicas son utilizadas para el tratamiento de esta señal; “Empirical Mode Decomposition (EMD)” [50, 75, 161] y redes neuronales [50, 161], transformada Wavelet [132 - 134, 162 - 165], Support Vector Machine (SVM) [166], Demodulación Multidimensional, etc.

La implementación del tratamiento de la señal se realiza modernamente en dispositivos embebidos FPGA (Field Programmable Gate Array) [5, 68, 74 - 77] que van a permitir una alta rapidez de respuesta e implementa el prototipado rápido.

## **2.6- Nuevas Herramientas de Aprendizaje Online**

El uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones prácticamente en cualquier campo de la Industria ha generado nuevas herramientas de aprendizaje online [7 - 9, 167 - 175], también para el análisis del funcionamiento de las máquinas eléctricas.

Estas herramientas ayudan a los estudiantes en la visualización de los conceptos y a proporcionar una realimentación en el proceso de aprendizaje mediante la presentación gráfica de los resultados (por ejemplo, mediante gráficos animados [176]). También permiten ayudar en la visualización de nuevos conceptos tales como diagramas fasoriales, espaciales, curvas características, etc. [177, 178].

El aprendizaje online es una de las fuertes tendencias en la educación superior, principalmente en las materias de ingeniería [179] gracias al incremento de los anchos de banda en las comunicaciones, las herramientas WEB, comunicaciones Wireless, etc.

Estas herramientas consisten principalmente en experimentos en tiempo real accesibles vía internet complementados con presentaciones teóricas con animaciones y simulaciones de modelos matemáticos de máquinas eléctricas [10, 66, 74, 105, 180]. Estas herramientas pueden constituir los llamados “Laboratorios Virtuales de Aprendizaje” [181 - 185] que incorporan principalmente elementos de simulación para el estudio de diversas materias, entre ellas, las máquinas eléctricas [10, 64, 186]. Estos Laboratorios Virtuales tienen, como característica principal, la facilidad de replicarse con un coste mínimo. Bibudhendu propone un modelo para evaluar la efectividad de los laboratorios virtuales en Ingeniería [187].

La característica de Control Remoto [100] en las nuevas herramientas de aprendizaje permite compartir recursos entre centros de enseñanza y Universidades, con lo que no es necesario disponer del equipo completo de estudio. Es lo que se acostumbra a denominar “Laboratorios Remotos” [188 - 192]. Estos laboratorios remotos van a permitir su acceso a personas interesadas en su formación sin restricciones de tiempo y espacio [184, 193].

Los “Laboratorios Virtuales de Aprendizaje” constituyen un primer contacto con el fenómeno objeto de estudio en un ambiente seguro y, en algunos casos, una etapa anterior al proceso de aprendizaje que continúa con los “Laboratorios Remotos” experimentando con el sistema real [194].

Muchas Universidades están creando laboratorios (virtuales y remotos) [195, 196] que funcionan de manera autónoma para el aprendizaje de sus estudiantes, pero también se están creando redes que permitan la integración de laboratorios mediante arquitecturas abiertas [197, 198]. También existen casos de asociación de Universidades de una misma región para la creación de sistemas abiertos de aprendizaje [199].

Diferentes tecnologías pueden ser utilizadas para la generación de laboratorios remotos: Aplicaciones de Escritorio, ActiveX, LabVIEW [190], Java Applets [201 - 203], Adobe Flash, AJAX [204, 205], Aplicaciones HTML tradicional [203, 206],



JavaFX y Microsoft Silverlight. Garcia-Juba realiza un análisis del impacto de las diferentes tecnologías para el diseño de laboratorios remotos [207].

Este aprendizaje no solamente es aplicable a los estudiantes o personas interesadas en la materia de máquinas eléctricas, sino que puede ser utilizado en el campo del Aprendizaje Computacional (AC) en la implementación de sistemas automáticos de mantenimiento predictivo de maquinaria rotativa mediante la detección de patrones en conjunto de datos que pueden haber sido originados por fenómenos de la más variada tipología [129].

Por otro lado, y mediante el uso de la tecnología existente actualmente, es posible constituir proyectos multidisciplinarios que permitan recrear un completo sistema industrial incorporando tanto herramientas de simulación como de experimentación, que permitirá realizar estudios más globales analizando el comportamiento de cada uno de los componentes locales. Entre otras, las disciplinas que pueden ser integradas, pueden ser Eléctrica, Electrónica y Mecánica [208].

La incorporación de la tecnología constituye un paso en la adaptación de las diferentes materias de estudio en Ingeniería al Espacio Europeo de Educación Superior, ya que permite el Aprendizaje Basado en Proyectos [209] como un modelo pedagógico que ponga las bases de un “lenguaje de modelos educativos” en las actividades de entrenamiento de los estudiantes en el ámbito de las máquinas eléctricas [60].

Las distintas herramientas desarrolladas permiten generar ejercicios de aprendizaje, así como documentación sobre la materia objeto de estudio [122].

## **2.7- Plataformas de Gestión y Control**

Por gestión entendemos la posibilidad de implementar diversos montajes, y por control la capacidad de conectar y desconectar equipos eléctricos.

La diversidad de elementos y dispositivos en un proceso industrial constituye una compleja arquitectura [210] que debe ser eficientemente gestionada para que los dispositivos estén plenamente integrados. Omer, Abdu Idris [210] cita los siguientes niveles del proceso industrial que deben estar coordinados:

- Sensores y actuadores
- Control automático
- Supervisión y control
- Control de producción
- Empresa

La implementación de las diversas funciones [210 - 212] también requiere de distintos dispositivos que también deben coordinarse:

- Online, software en Tiempo Real
- Dispositivos de propósito general
- Tiempo Real (Software/Hardware)
- Sistemas Embebidos (Software/Hardware)

Cada vez es más frecuente encontrarnos con dispositivos físicos abiertos y reconfigurables [92] que posibilitan la integración con otros dispositivos, así como la reprogramación in situ para adaptarlo a su función inmediata asignada.

En el ámbito del software también se requiere una arquitectura abierta [10, 65] y flexible para interconectar con otros componentes de software y con dispositivos físicos [52].

En el análisis del estado del arte de la simulación en tiempo real, control remoto, monitorización y herramientas online de aprendizaje encontramos elementos comunes a estas funcionalidades.

Estos elementos comunes pueden ser aplicables tanto a simulación en laboratorio como a control y/o monitorización en planta industrial, e incluso en laboratorios de investigación.

De igual manera, los dispositivos físicos hardware existentes actualmente son válidos tanto para realizar una simulación en tiempo real como para el control y/o monitorización en sistema industrial.

## **2.8- Conclusiones del análisis del estado del arte**

Del análisis del estado del arte podemos extraer las siguientes conclusiones, que exponemos a continuación, y que serán consideradas para el desarrollo de la herramienta elaborada en esta tesis.

Las herramientas para análisis y estudio de máquinas eléctricas deberán incorporar la característica de simulación, que permitirá conocer su funcionamiento a partir de un modelo.

Estas herramientas serán abiertas tanto para permitir la introducción de nuevos modelos que caracterizen las máquinas eléctricas, como para comunicarse con otros software de simulación.



Una característica interesante que complementa al modelado y simulación es la “simulación en tiempo real” que incorpora elementos de simulación y de experimentación con el fin de ir adaptando los modelos de máquinas eléctricas.

Una de las funciones esenciales en una herramienta de estas características es la implementación de diferentes niveles de comunicaciones que permitan la conexión de diversos dispositivos físicos de adquisición y control, el establecimiento de laboratorios remotos, controles desde dispositivos móviles y vía WEB, almacenamiento de datos en la nube, etc.

La tendencia actual en los sistemas industriales que debe ser implementada es la monitorización de las variables fundamentales del fenómeno objeto de estudio para conocer en todo momento el estado de la máquina o instalación.

El uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones prácticamente en cualquier campo de la Industria ha generado nuevas herramientas de aprendizaje online, también para el análisis del funcionamiento de las máquinas eléctricas.

*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



**Universidad de Valladolid**

---





# Capítulo 3

## Desarrollo de la Herramienta



## Capítulo 3.- Desarrollo de la Herramienta

### 3.1- Introducción

En este capítulo se va a hacer una exposición de las herramientas desarrolladas en esta tesis, así como los diferentes dispositivos utilizados en la misma, con objeto de conseguir la “*Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial*”.

Los elementos principales objeto de estudio en esta tesis doctoral son las distintas Máquinas Eléctricas más habituales en el entorno industrial (véase figura 11):

- Transformadores eléctricos monofásicos
- Transformadores eléctricos trifásicos
- Máquina asíncrona o de inducción
- Máquina síncrona
- Máquinas de corriente continua



Figura 11.- Máquinas eléctricas objeto de esta tesis (Fuente: Elaboración propia)

Para la adquisición de las variables más importantes (principalmente tensiones eléctricas, corrientes eléctricas, potencias y energía, y, en las máquinas rotativas, la velocidad) se han utilizado una serie de dispositivos físicos de medida (véase la figura 12):

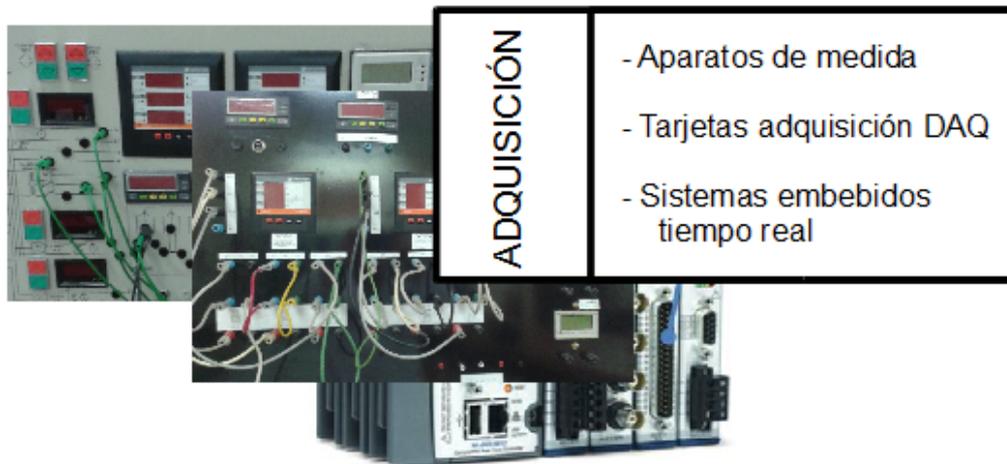


Figura 12.- Dispositivos físicos de adquisición (Fuente: Elaboración propia)

El control para la ejecución práctica de los diferentes esquemas de montaje va a ser realizado por una serie de dispositivos físicos de control, principalmente de carácter industrial (véase la figura 13).



Figura 13.- Dispositivos físicos de control (Fuente: Elaboración propia)

Como elemento central que realice el control y gestión de todos los dispositivos físicos que interactúan con las diferentes máquinas eléctricas será un software totalmente desarrollado en el ámbito de esta tesis (véase figura 14).

Este software se encarga de leer los datos procedentes de los dispositivos físicos de adquisición, y realiza el control de los accionadores para la configuración de los diferentes esquemas de montaje. Este mismo software va a permitir un control remoto del sistema, así como un control vía WEB.

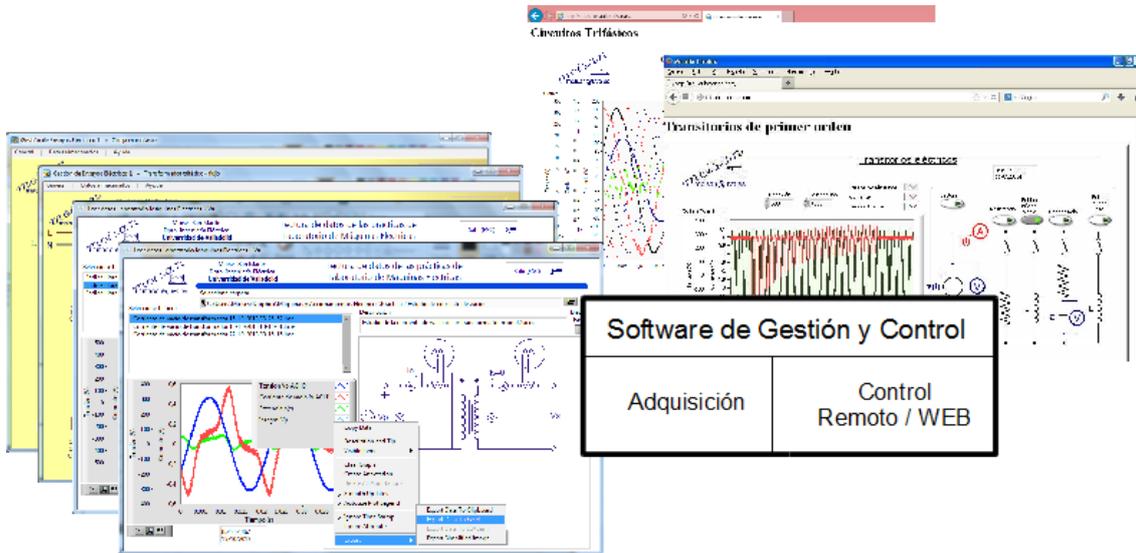


Figura 14.- Software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)

Todos los datos adquiridos van a ser almacenados, de forma automática y sistemática, en diferentes ficheros para su posterior utilización para el análisis o reproducción del experimento realizado.

Estos datos almacenados, junto con el propio software de gestión y control, permiten la realización y validación de simuladores para analizar el comportamiento de las máquinas eléctricas. Estos simuladores junto con los datos adquiridos van a constituir nuevas herramientas de aprendizaje de los diferentes fenómenos de las máquinas eléctricas (véase la figura 15).

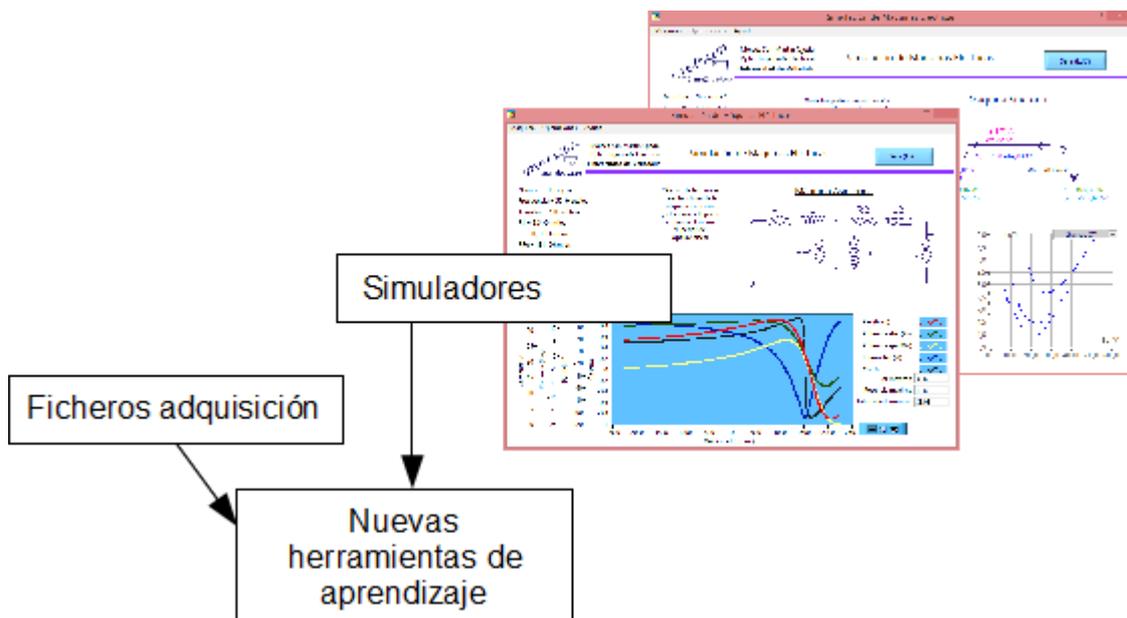


Figura 15.- Creación y validación de simuladores (Fuente: Elaboración propia)

Otro de los elementos fundamentales en el sistema serán las comunicaciones, que van a permitir la interconexión de todos los elementos del sistema. El sistema dispone de diferentes niveles de comunicaciones (véase la figura 16):

- Comunicación entre el software y los dispositivos físicos de adquisición.
- Comunicación entre el software y los dispositivos físicos de control.
- Comunicación entre dispositivos físicos.
- Comunicación para almacenamiento de datos en la nube.
- Etc.

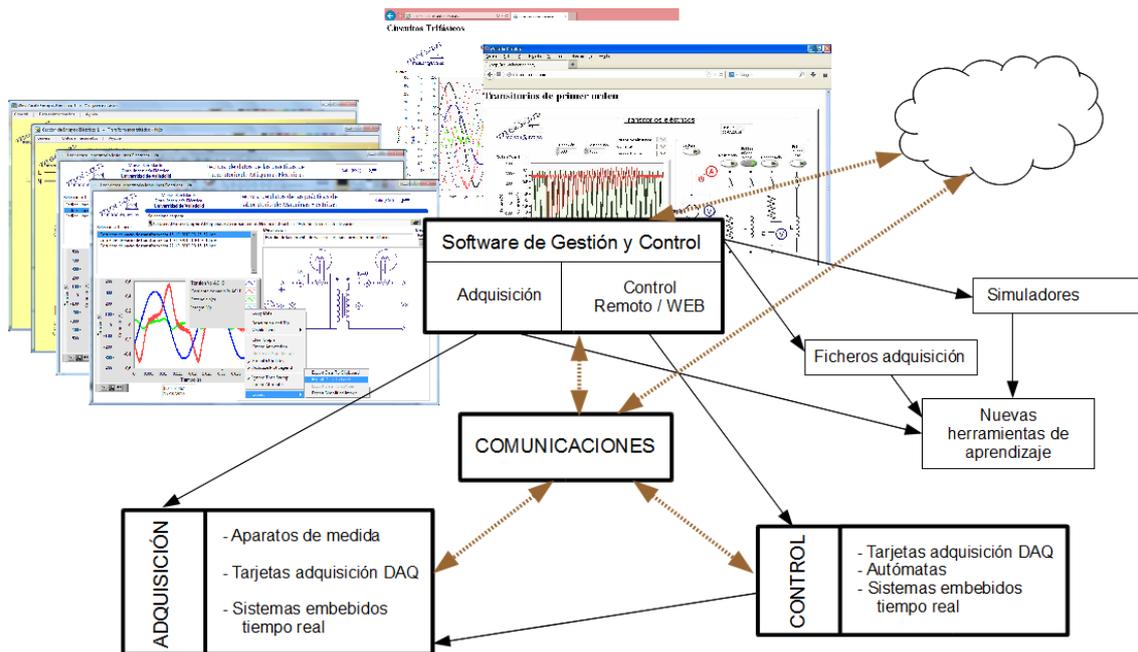


Figura 16.- Función de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 17 se presenta de forma global el sistema de gestión y control desarrollado en el ámbito de esta tesis, en el que intervienen cada uno de los elementos mencionados.

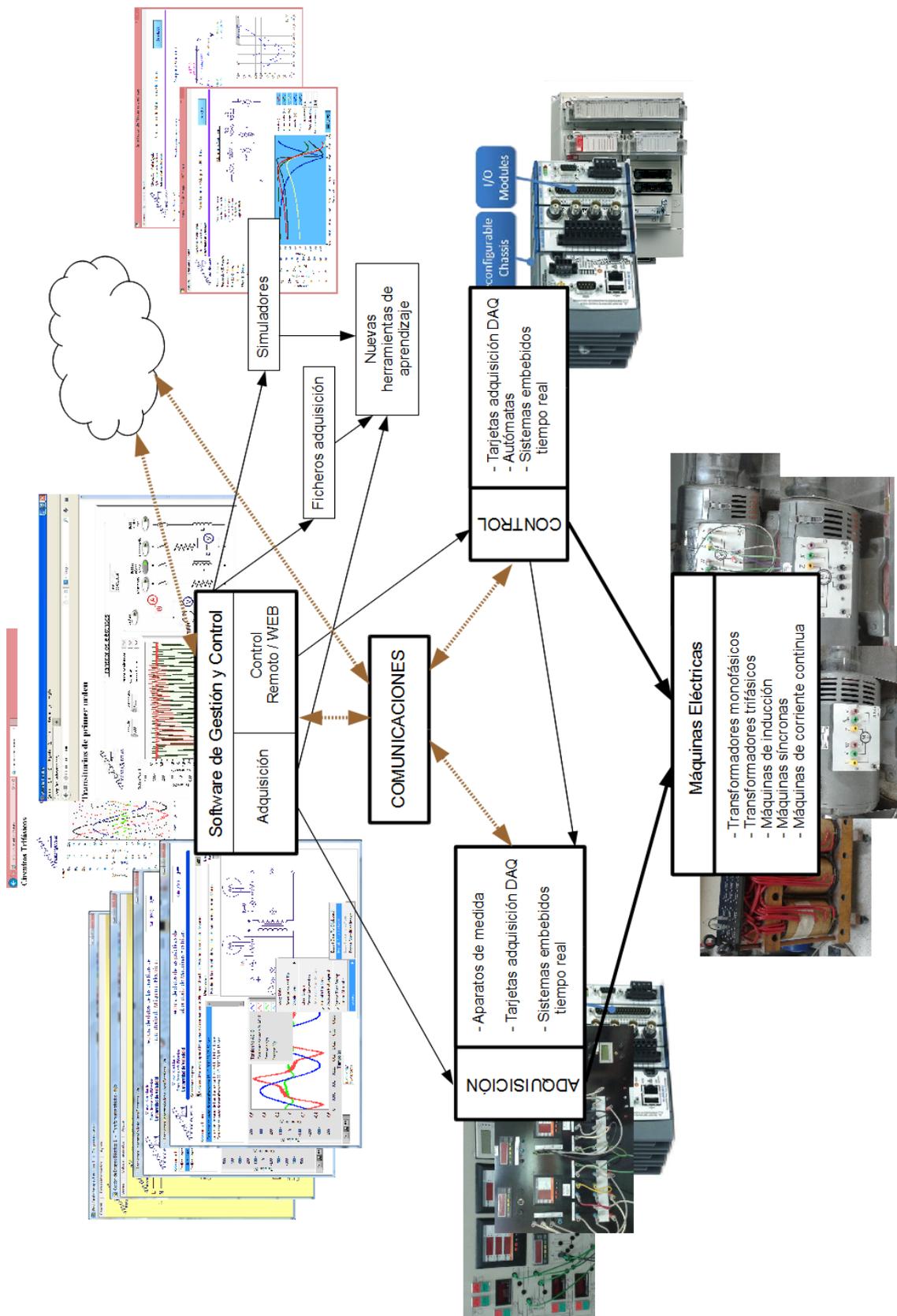


Figura 17.- Diagrama general con elementos físicos (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2- Dispositivos físicos empleados

En el desarrollo realizado en esta tesis se han utilizado una serie de dispositivos físicos correspondientes a elementos de adquisición y control (véase la figura 18), y que se expondrán detalladamente.

La elección de los diferentes dispositivos de adquisición y control se ha hecho en base a una serie de características que se relacionan a continuación:

- Principalmente dispositivos industriales, si bien otros dispositivos pueden ser utilizados a nivel de laboratorio.
- Incorporación de protocolos industriales, principalmente ModBUS, ampliamente utilizados en Industria.

Con estas dos únicas características principales, existen una gran variedad de modelos de diferentes fabricantes, lo que permite una facilidad de mantenimiento y reposición en caso de avería y/o sustitución de cualquiera de ellos.

Debemos indicar que, si bien se exponen una serie de dispositivos propiedad del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, se podrían haber utilizado otros equipos disponibles en el mercado siempre que tengan las características mencionadas anteriormente.

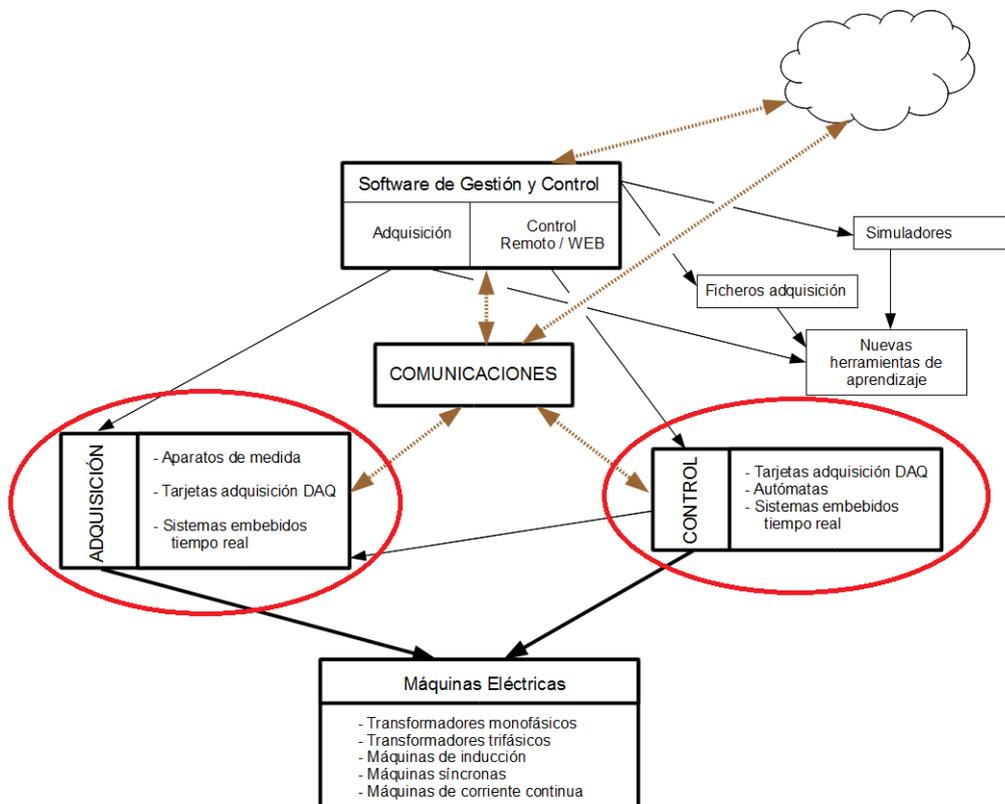


Figura 18.- Dispositivos físicos (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.1.- Aparatos de medida digitales

Comenzamos la exposición de equipos utilizados con aparatos de medidas digitales (de uso industrial) que proporcionarán medidas de las variables eléctricas en estado estacionario, principalmente valores medios y eficaces de tensiones, corrientes, potencias, energía, etc.

En el desarrollo de esta tesis se han generado dos paneles de medida, con diferentes dispositivos físicos de adquisición.

Las siguientes figuras representan sendos esquemas de los paneles de medidas.

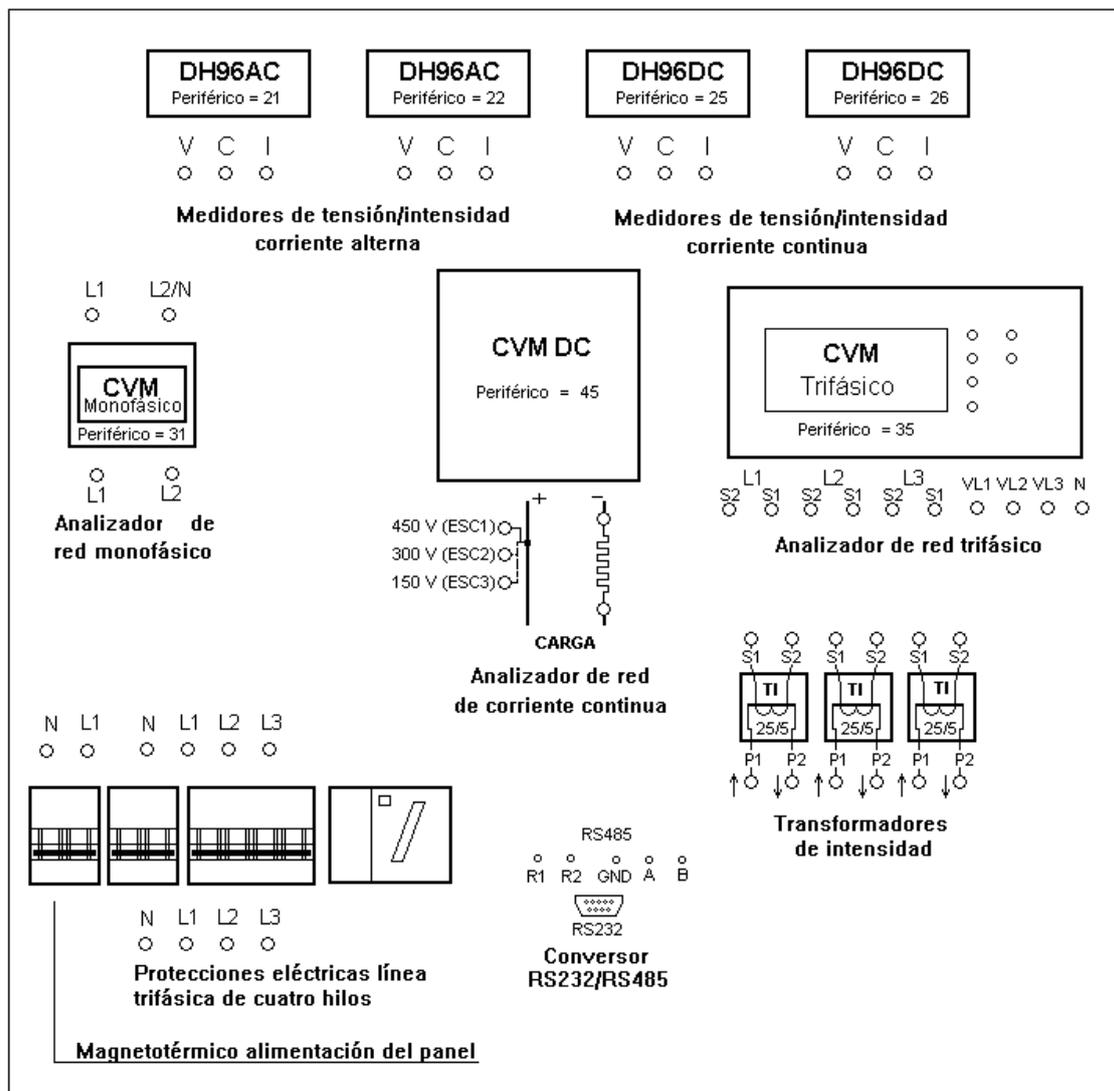


Figura 19.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)

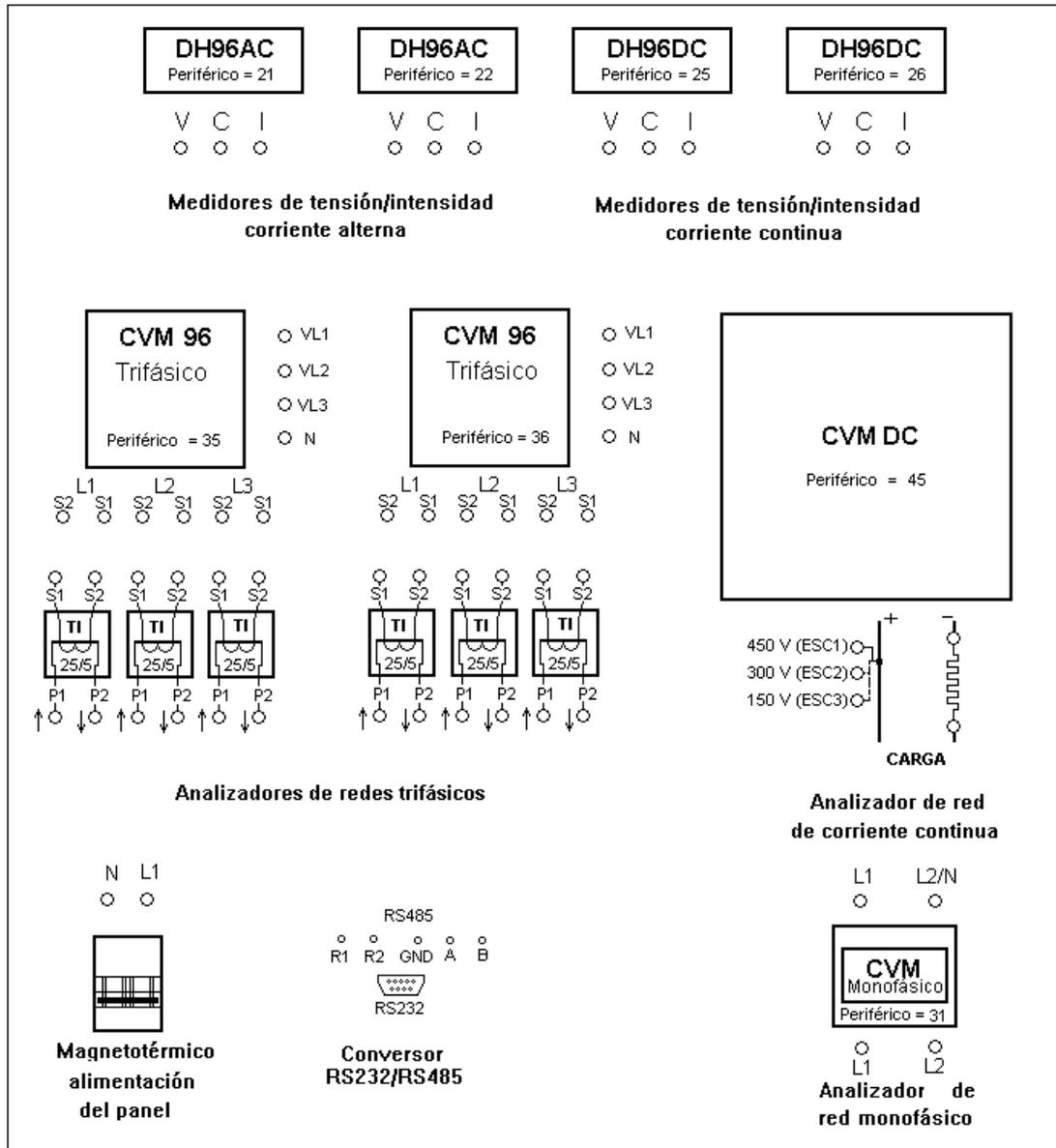


Figura 20.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)

Explicaremos con detalle cada uno de los distintos aparatos de medida y accesorios que aparecen en el panel.



Figura 21.- Medidor digital CA  
(Fuente: Elaboración propia)

**Medidor digital de tensión/intensidad de corriente alterna CIRCUTOR DH96A:** Mide tensión o intensidad (nunca las dos magnitudes simultáneamente) dependiendo de cómo esté configurado (figura 21).

En la parte superior tenemos los conectores de las comunicaciones y en la parte inferior tenemos los conectores para la toma de tensión (**V** y **C**), y para la toma de intensidad (**I** y **C**). Lógicamente, el terminal **C** es el terminal común.

Permite medir tensiones hasta 500 voltios e intensidades hasta 5 amperios.



Figura 22.- Medidor digital CC  
(Fuente: Elaboración propia)

**Medidor digital de tensión/intensidad de corriente continua CIRCUTOR DH96D:** Mide tensión o intensidad (nunca las dos magnitudes) dependiendo de cómo esté configurado (figura 22).

Dispone de los mismos conectores que el medidor de corriente alterna.

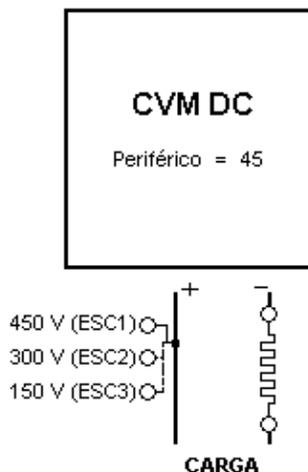


Figura 23.- Analizador de red cc  
(Fuente: Elaboración propia)

**Analizador de red de corriente continua:** Aparato de medida para medida simultánea de tensión, corriente, potencia y energía en corriente continua. Para la medida de intensidad es obligatorio conectar un shunt. En el panel está conectado un shunt de 25 A (figura 23).

Dispone de tres tomas de tensión correspondiente a los fondos de escala (o alcance) de 450, 300 y 150 voltios, de las que sólo habrá que conectar una de ellas.

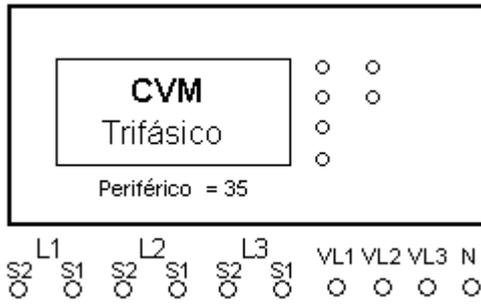


Figura 24.- Analizador de red ca trifásico CVM144 (Fuente: Elaboración propia)

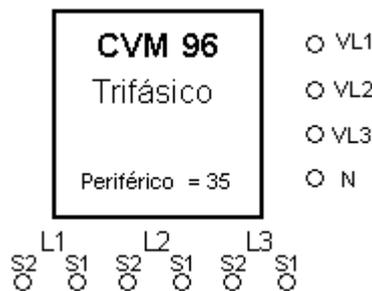


Figura 25.- Analizador de red ca trifásico CVM96 (Fuente: Elaboración propia)

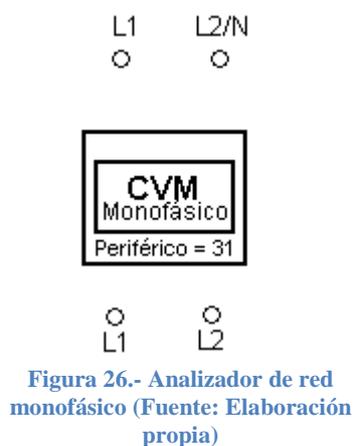


Figura 26.- Analizador de red monofásico (Fuente: Elaboración propia)

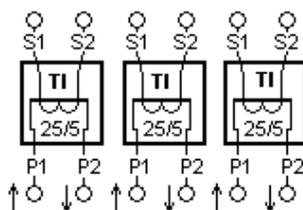


Figura 27.- Transformadores de intensidad (Fuente: Elaboración propia)

### Analizadores de red trifásicos

**CIRCUTOR CVM:** Aparato de medida para medida simultánea de tensión, corriente, potencias activa y reactiva, potencia máxímetro, tasas de armónicos, factor de potencia, frecuencia y energías de las tres fase de un sistema trifásico (figura 24 y figura 25).

Dispone de las tres tomas de tensión (hasta **500 voltios**) y las seis tomas de intensidad, que **obligatoriamente habrá que pasarlas por transformadores de intensidad**.

De este modelo tenemos los dos tipos representados en la figura adjunta.

### Analizador de red monofásico CVM-SP:

Aparato de medida con terminales de entrada y de salida que permiten tomar medidas de circuitos monofásicos de tensión hasta **230 voltios** e intensidad hasta **25 amperios** (figura 26).

Con este equipo obtenemos simultáneamente valores de tensión, corriente, potencias activa y reactiva, potencia máxímetro, tasas de armónicos, factor de potencia, frecuencia y energías.

### Transformadores de intensidad:

Disponemos de tres transformadores de intensidad con relación **25/5 A** para la conexión de las tomas de intensidad del analizador de redes CVM trifásico (figura 27).

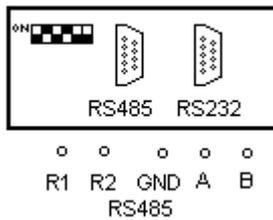


Figura 28.- Conversor RS232/485  
(Fuente: Elaboración propia)

**Conversor de puerto de comunicaciones CIRCUTOR RS232/RS485:** Con el fin de poder conectar al ordenador (puerto RS232) todos los aparatos de medida necesitamos un puerto que permita la conexión de más aparatos (puerto RS485), por lo que utilizamos este conversor de puerto (figura 28).

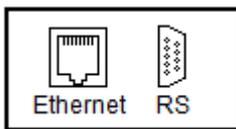


Figura 29.- Conversor RS/Ethernet  
(Fuente: Elaboración propia)

**Conversor de puerto de comunicaciones CIRCUTOR Serie/Ethernet:** Convertidor que permite transformar la conexión serie en Ethernet (figura 29).

Se presenta en la figura 30 y en la figura 31 los equipos físicos desarrollados en el ámbito de esta tesis.



Figura 30.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)



Figura 31.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.2.- Tarjetas de adquisición de datos y análogos

Para la medida de los valores instantáneos de tensiones y corrientes se han utilizado tarjetas de adquisición de datos de propósito general (y dispositivos industriales análogos con el fin de su implementación en ambiente industrial).

#### Tarjeta Low Cost E Series Multifunction DAQ NI PCI 6036E

Disponemos de tarjetas de la empresa *National Instruments* DAQ NI PCI 6036E cuyas características principales son las siguientes:

- 16 entradas analógicas de resolución de 16 bit y 200kS/s
- 2 salidas analógicas de resolución de 16 bit (65536)  $\pm 10V$  y 10 kS/s.
- 8 entradas/salidas I/O digitales (5 V TTL/CMOS)
- Nivel de tensión de entrada digital: OFF  $0V \div 0.8V$  y ON  $2V \div 5V$
- Nivel de tensión de salida digital: OFF  $0.4V$  y ON  $4.35V$
- 2 contadores de 24 bit de resolución
- 4 rangos diferentes para las entradas analógicas:  $\pm 10V$  ,  $\pm 5V$  ,  $\pm 500mV$  y  $\pm 50mV$  .
- Conexión al ordenador mediante bus PCI
- Conector de 68 pines.

### Tarjeta Basic Multifunction DAQ NI PCI 6014

Además, se dispone de tarjetas de la empresa *National Instruments* DAQ NI PCI 6014 cuyas características principales son las siguientes:

- 16 entradas analógicas de resolución de 16 bit y 200kS/s
- 2 salidas analógicas de resolución de 16 bit (65536)  $\pm 10V$  y 10 kS/s.
- 8 entradas/salidas I/O digitales (5 V TTL)
- Nivel de tensión de entrada digital: OFF 0V  $\div$  0.8V y ON 2V  $\div$  5V
- Nivel de tensión de salida digital: OFF 0.4V y ON 4.35V
- 2 contadores de 24 bit de resolución
- 4 rangos diferentes para las entradas analógicas:  $\pm 10V$  ,  $\pm 5V$  ,  $\pm 500mV$  y  $\pm 50mV$  .
- Conexión al ordenador mediante bus PCI
- Conector de 68 pines.

### Módulos entradas analógicas USB

Además, se dispone de tarjetas USB de la empresa *National Instruments* NI-6009 cuyas características principales son las siguientes:

- 8 entradas analógicas de resolución de 14 bits y 48kS/s
- 2 salidas analógicas de resolución de 12 bit y 150 S/s.
- 12 entradas/salidas I/O digitales (5 V TTL)
- 1 contadores de 32 bit de resolución
- Conexión al ordenador mediante USB

### Módulos entradas analógicas CompactRIO

Además, se dispone de módulos para la plataforma CompactRIO de la empresa *National Instruments* (figura 32):

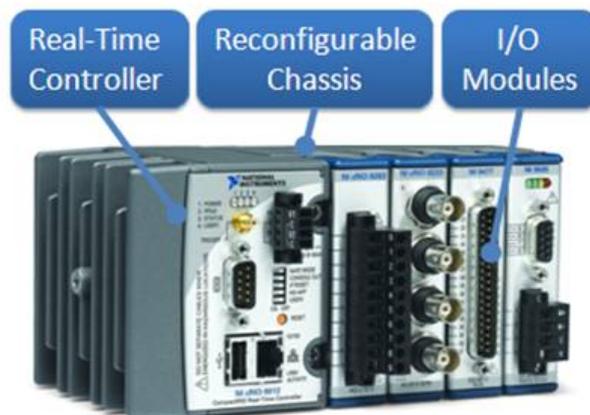


Figura 32.- Plataforma CompactRIO (Fuente: WEB [www.ni.com](http://www.ni.com))

CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición. La arquitectura robusta del hardware del sistema CompactRIO incluye módulos de E/S, un chasis FPGA reconfigurable y un controlador embebido. Además, CompactRIO se programa con herramientas de programación gráfica de NI LabVIEW y puede usarse en una variedad de aplicaciones de control y monitoreo embebidos.

En particular, y para la adquisición de datos, se ha utilizado el módulo NI-9201 con 8 entradas analógicas de resolución de 12 bits y 500kS/s, con un rango de medida  $\pm 10V$ .

### 3.2.3.- Acondicionadores de las entradas analógicas

Por acondicionamiento de señal entendemos la adaptación de las magnitudes a medir a las señales de la tarjeta de adquisición de datos. En cuanto a las señales analógicas, las magnitudes fundamentales que nos interesan en la adquisición de datos en máquinas eléctricas son la tensión y la corriente. A partir de estas dos, podremos obtener otras derivadas, tales como potencia, energía, etc.

Por lo tanto, los transductores que utilizaremos serán de tensión y de corriente, que han sido previamente montados en una placa de circuito impreso, y que describiremos a continuación.

La figura 33 representa un esquema de la placa de transductores **A** donde van alojado los distintos transductores de tensión y corriente, que se explicarán en apartados posteriores. La placa dispone de una fuente de alimentación *TRACO TMS 25215* que aporta tensión de alimentación de  $\pm 15V$  a todos los transductores.

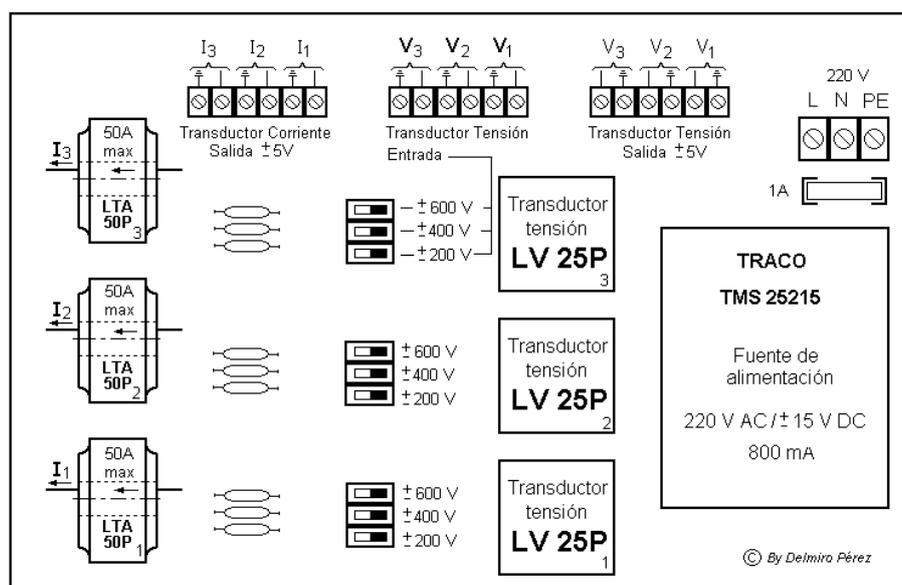


Figura 33.- Tarjeta de transductores A (Fuente: Elaboración propia)

La placa está compuesta por tres transductores de tensión *LEM LV 25P* y tres transductores de corriente *LEM LTA 50P*.

La figura 34 representa un esquema de la placa de transductores *B* donde van alojado los distintos transductores de tensión y corriente, que se explicarán en apartados posteriores. La placa dispone de una fuente de alimentación *TRACO TMS 25215* que aporta tensión de alimentación de  $\pm 15V$  a todos los transductores.

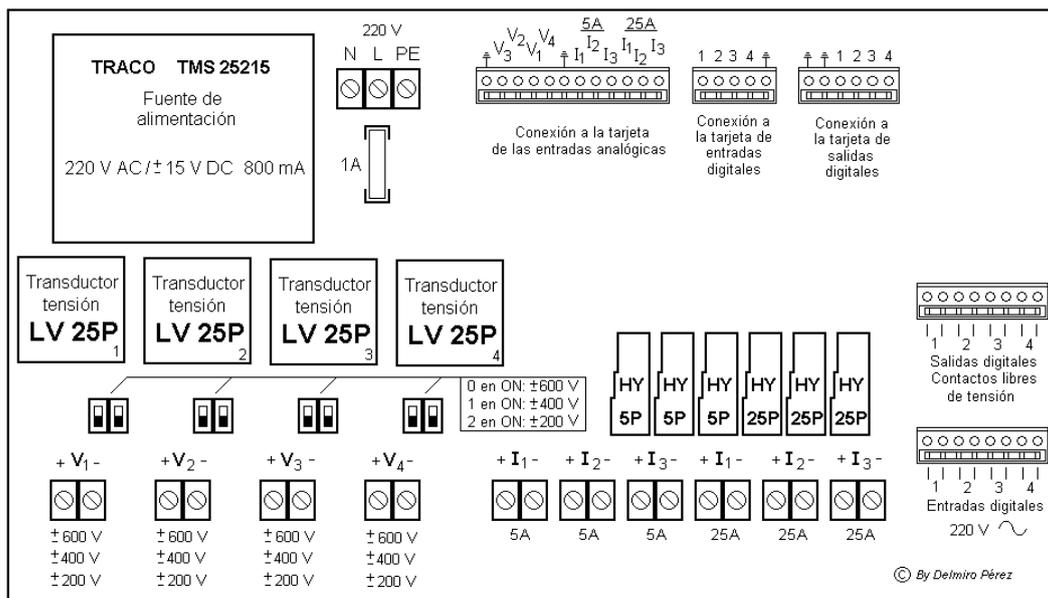


Figura 34.- Tarjeta de transductores B (Fuente: Elaboración propia)

La placa está compuesta por cuatro transductores de tensión *LEM LV 25P*, tres transductores de corriente *LEM HY 5P* y tres transductores de corriente *LEM HY 25P* en cuanto a transductores de señales analógicas. También dispone de los elementos necesarios para 4 entradas digitales y 4 salidas digitales.

#### Transductor de tensión LV 25 P

Las tensiones habituales de un laboratorio de máquinas eléctricas son de  $380V$  eficaces, por lo que los transductores deberán convertir esas señales en otras que puedan ser conectadas a las tarjetas de adquisición de datos. Las características completas del transductor de tensión de la empresa *LEM LV 25P* viene dado en la tabla 1.

Para la medida de tensión se usará el transductor de tensión *LV 25 P*, que haciéndole pasar una corriente proporcional al voltaje a medir en su circuito primario genera en su salida (secundario) una corriente proporcional a aquella. Véase la figura 35.

Características del transductor de tensión LEM LV 25P	
Corriente nominal del primario	10 mA
Corriente de salida analógica	25 mA
Relación de transformación	2500 : 1000
Precisión total a +25°C	$\pm 0.6\%$ de $I_1$
Tensión de alimentación	$\pm 15V (\pm 5\%)$
Aislamiento	2.5 kV <sub>rms</sub> /50Hz/1 min
Linealidad	<0.2%
Tiempo de respuesta	<40 $\mu$ s para $R_1=25k\Omega$
Temperatura de operación	0°C a +70°C
Temperatura de almacenaje	-25°C a +85°C
Consumo de corriente	10 mA + corriente de salida
Resistencia interna primaria	250 $\Omega$ (a +70°C)
Resistencia interna secundaria	110 $\Omega$ (a +70°C)
Peso	22g

Tabla 1.- Características del transductor de tensión LEM LV 25P

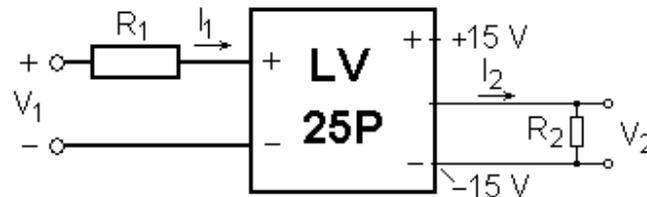


Figura 35.- Transductor LV25P (Fuente: Elaboración propia)

La corriente del primario  $I_1$  debe circular por una resistencia exterior  $R_1$  cuyo valor puede ser fijado por el usuario en función de la tensión a medir. La corriente máxima de primario  $I_1$  es de 10 mA que se corresponde con una corriente de salida  $I_2$  de 25 mA. Por ejemplo, si se desea medir tensiones de valor pico de 500 V se colocarán resistencias de 50 k $\Omega$ . Dado que a la tarjeta de adquisición de datos se va a introducir una tensión de entrada de  $\pm 5V$ , la resistencia a colocar en el secundario  $R_2$  valdrá 200  $\Omega$ .

Con el fin de aumentar la precisión en la medida de tensiones se han diseñado tres escalas para la medida de tensiones (600 V, 400 V y 200 V) mediante variación de la resistencia conectada al primario. Esta variación se hace mediante los pequeños interruptores situados junto a los transductores de tensión.

En la placa de circuito impreso *B*, para cambiar la escala de entrada de tensiones existen dos pequeños contactos (switches), configurados de la siguiente manera:

- Si los dos contactos están a OFF, la escala es de 600 V.
- Si está conectado (a ON) uno de los contactos, la escala es de 400 V.
- Si están conectados (a ON) los dos contactos, la escala es de 200 V.

#### Transductor de corriente LEM LTA 50P

Las corrientes habituales de un laboratorio de máquinas eléctricas son de unos 25 A eficaces, por lo que los transductores deberán convertir esas señales en otras que puedan ser conectadas a las tarjetas de adquisición de datos. Las características completas del transductor de corriente de la empresa *LEM LTA 50P* viene dado en la tabla 2.

Características del transductor de corriente LEM LTA 50P	
Corriente nominal del primario	50 A
Tensión de salida analógica instantánea	5 V
Relación de transformación	1 : 1000
Precisión total a +25°C	± 0.5% de $I_I$
Tensión de alimentación	± 15V (±5%)
Aislamiento	3 kV <sub>rms</sub> /50Hz/1 min
Linealidad	<0.1% de $I_I$
Tiempo de respuesta	<1 μs
DI/DT	>50A/μs
Temperatura de operación	0°C a +70°C
Temperatura de almacenaje	-25°C a +85°C
Consumo de corriente	15 mA + corriente de salida
Resistencia interna secundaria	25 Ω
Peso	15g

Tabla 2.- Características del transductor de corriente LEM LTA 50P

Para la medida de intensidad primaria  $I_I$  se deberá insertar el conductor por el orificio central de 10 mm de diámetro, como se haría en una pinza amperimétrica. Véase la figura 36.

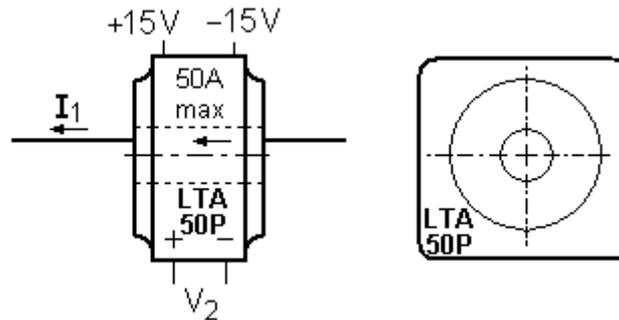


Figura 36.- Transductor de corriente LTA 50P (Fuente: Elaboración propia)

En este caso, la tensión de salida  $V_2$  se puede aplicar directamente a la tarjeta de adquisición de datos DAQ pues su rango de variación será de  $\pm 5V$ .

#### Transductor de corriente LEM HY 5P y LEM HY 25P

Otros transductores de corriente utilizados son *LEM HY 5P* y *LEM HY 25P* (figura 37) cuyas características vienen relacionadas en la tabla 3.

Características del transductor de corriente LEM HY 5P y LEM HY 25P	
Corriente nominal del primario	5 y 25 A
Tensión de salida analógica instantánea	$\pm 4V$
Precisión total a $+25^\circ C$	$\pm 1\%$ de $I_I$
Tensión de alimentación	$\pm 15V (\pm 5\%)$
Aislamiento	$2.5 \text{ kV}_{\text{rms}}/50\text{Hz}/1 \text{ min}$
Linealidad	$< 0.1\%$ de $I_I$
Tiempo de respuesta	$< 3\mu\text{s}$
DI/DT	$> 50\text{A}/\mu\text{s}$
Temperatura de operación	$-10^\circ C$ a $+80^\circ C$
Temperatura de almacenaje	$-25^\circ C$ a $+85^\circ C$
Consumo de corriente	10 mA
Resistencia interna secundaria	$100 \Omega$
Peso	14g
Relación de transformación	1 : 1000

Tabla 3.- Características del transductor de corriente LEM HY 5P y LEM HY 25P

En este caso, la tensión de salida  $V_2$  se puede aplicar directamente a la tarjeta de adquisición de datos DAQ pues su rango de variación será de  $\pm 4V$ .

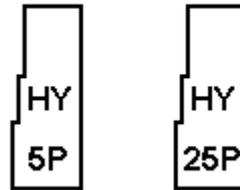


Figura 37.- Transductores de corriente LEM HY5P y HY 25P (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.4.- Dispositivos de control

Los dispositivos de control que conforman el sistema de gestión y control diseñado tienen como característica la de tener implementado el protocolo ModBUS (Serial o Ethernet), por lo que cualquier dispositivo que cumpla esta característica sería válido para su incorporación en este sistema.

En particular, los dispositivos usados en la ejecución de esta tesis doctoral se relacionan a continuación.

#### Autómata Modicom TSX Micro

Para la conexión y desconexión de equipos se ha utilizado autómatas de la marca Modicom (Modelo TSX Micro), perteneciente al Grupo Schneider (figura 38). Principalmente se ha utilizado entradas y salidas digitales, si bien es posible incorporar señales analógicas al sistema.

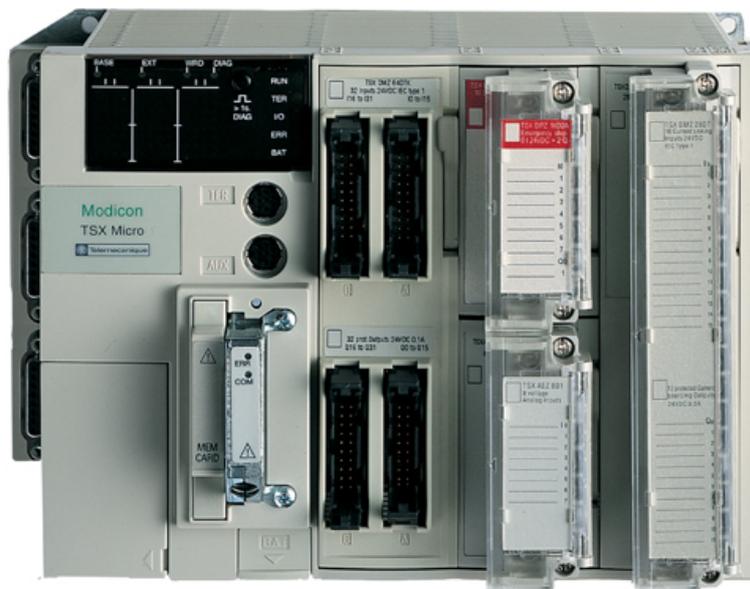


Figura 38.- Autómata Modicom TSX Micro (Fuente: WEB <http://www.schneiderelectric.es>)

### Autómata Modicom TSX Premium

Para la conexión y desconexión de equipos se ha utilizado autómatas de la marca Modicom (Modelo TSX Premium), perteneciente al Grupo Schneider (figura 39). Principalmente se ha utilizado entradas y salidas digitales, si bien es posible incorporar señales analógicas al sistema.



Figura 39.- Autómata Modicom TSX Premium (Fuente: WEB <http://www.schneiderelectric.es>)

### Dispositivo de control en tiempo real plataforma NI CompactRIO

Se ha utilizado para el desarrollo del sistema de gestión y control dispositivos de National Instruments, pertenecientes a la plataforma CompactRIO (figura 40). CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición. La arquitectura robusta del hardware del sistema CompactRIO incluye módulos de E/S, un chasis FPGA reconfigurable y un controlador embebido. Además, CompactRIO se programa con herramientas de programación gráfica de NI LabVIEW y puede usarse en una variedad de aplicaciones de control y monitoreo embebidos.

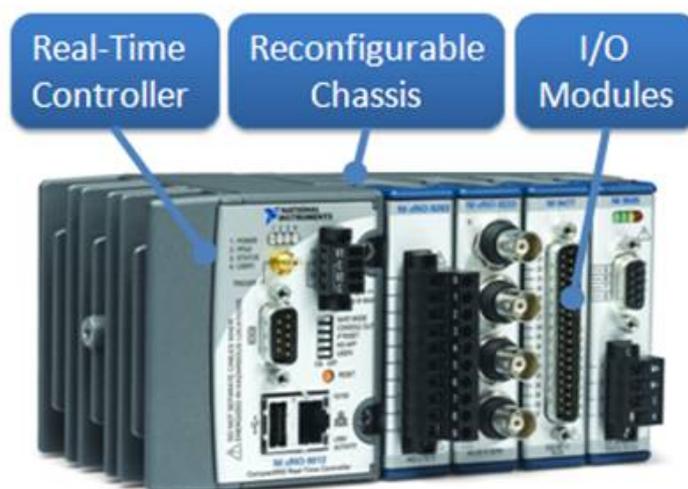


Figura 40.- Plataforma CompactRIO (Fuente: WEB [www.ni.com](http://www.ni.com))

En particular, y para control, se ha utilizado el módulo NI-9403 de 32 entradas/salidas digitales configurables (tiempos de 7  $\mu$ s) y el módulo NI-9485 de 8 salidas digitales relé estado sólido (SSR).

### 3.3- Software desarrollado

Para la interconexión de los diferentes aparatos de medida y de control ha sido necesaria la creación de una serie de programas a partir de la plataforma LabVIEW [200], de National Instruments. La elección de esta plataforma se debe a que cumple con las características especificadas para esta tesis, incorporación de protocolos industriales, posibilidad de creación de simuladores, interconexión con diferentes paquetes software, posibilidad de control remoto y control WEB, etc.

Se han creado dos elementos de software que se explicarán posteriormente: software de gestión y control, y software para la elaboración de simuladores (véase la figura 41).

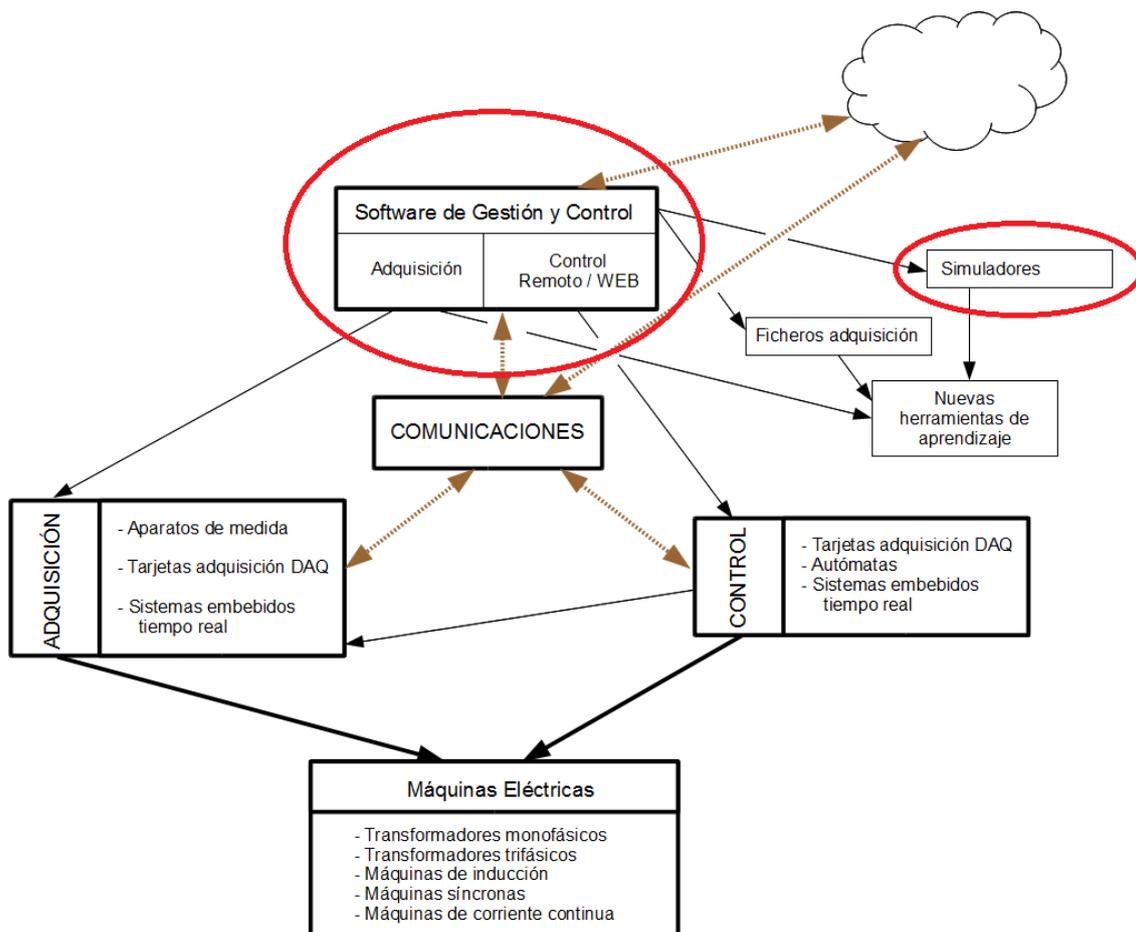


Figura 41.- Detalle software desarrollado (Fuente: Elaboración propia)

### 3.3.1.- Software para la gestión y control

Como elemento principal de gestión y control que interconecte los diferentes dispositivos físicos ha sido necesario la creación del software específico denominado Gestión de ensayos eléctricos. Por gestión entendemos la posibilidad de implementar diversos montajes, y por control la capacidad de conectar y desconectar equipos eléctricos.

#### Gestión de Ensayos Eléctricos

*Gestión de ensayos eléctricos vía ModBUS* es el primero de los programas desarrollados en esta Tesis, con la característica de propósito general para el control y adquisición de datos de equipos que incorporan módulo de comunicaciones con protocolo MODBUS (tanto Serie como Ethernet). Los equipos de control pueden ser autómatas, variadores de frecuencia, etc., y los equipos de adquisición pueden ser cualquier aparato de medida.

Al hablar de propósito general entendemos un programa que sirva para el control de la adquisición de datos de cualquier instalación con Máquinas Eléctricas. En particular, se ha realizado este desarrollo en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Valladolid (figura 42), si bien su aplicación se puede extender a cualquier entorno industrial que disponga de máquinas eléctricas.

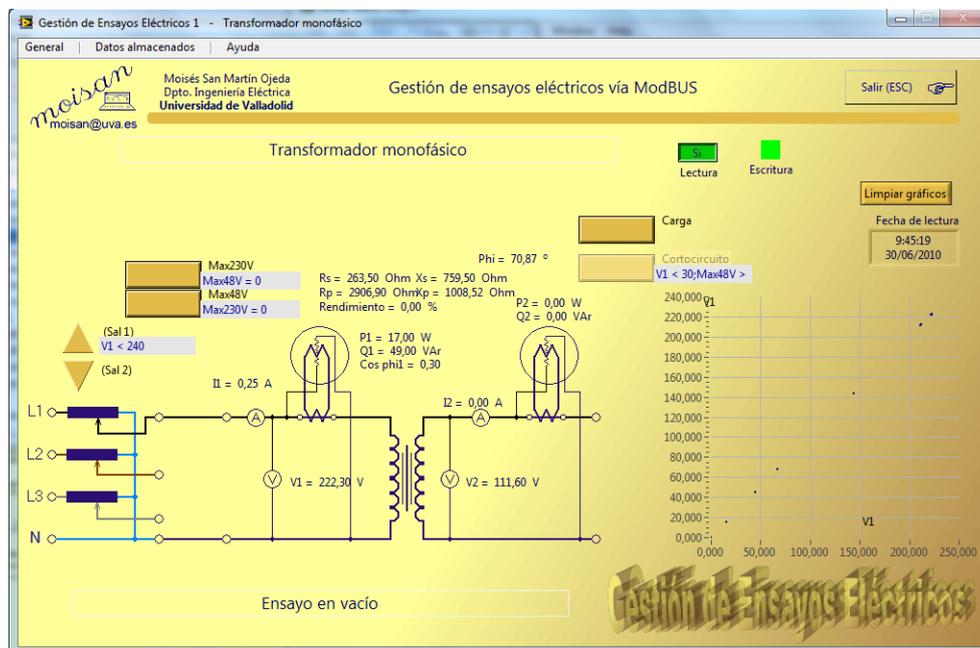


Figura 42.- Pantalla del software Gestión de Ensayos Eléctricos (Fuente: Elaboración propia)

Con el presente programa se podrán configurar distintos esquemas, dependiendo del ensayo deseado. Incluso es posible diseñar una pantalla para cada ensayo que se

realice sobre las máquinas. Por lo tanto, el software va a permitir modificar la apariencia de la pantalla, el número de medidas del ensayo, los cálculos necesarios para cada ensayo, y en general, todos aquellos elementos que aparezcan en el programa.

El programa no sólo tomará las lecturas de los aparatos de medida, sino que va a permitir su manipulación. Así, es posible, a partir de las lecturas tomadas, calcular otras nuevas, lo que llamaremos medidas virtuales. Estas operaciones las realizará en cada instante en el que se miden nuevas variables.

Otra característica incluida en el programa es el almacenamiento de los valores de las magnitudes. Todos los datos adquiridos son almacenados (de manera automática) para su posterior tratamiento, por lo que el programa puede ser usado tanto para adquirir datos, como para el posterior análisis de ellos sin necesidad de estar conectado a los aparatos de medida.

Los datos que el programa almacena son únicamente las lecturas reales, dado que las virtuales van a poder ser nuevamente calculadas a partir de aquellas. Esto va a permitir el modificar las variables virtuales tanto para realizar nuevas medidas como en el tratamiento posterior, cuando ya se trabaja con los datos almacenados.

Como característica fundamental, y para que se pueda trabajar con los datos sin necesidad de disponer de este programa, se incluye la función de Exportar, que pasará los datos obtenidos de los aparatos de medido a un fichero con formato de hoja de cálculo.

El software permite la realización de diversos esquemas de ensayos eléctricos. Los siguientes esquemas vienen ya configurados (si bien se pueden añadir nuevos esquemas):

- Transformador monofásico
- Transformador trifásico
- Circuito magnético de doble ventana
- Máquina asíncrona
- Máquina asíncrona con freno
- Motor de corriente continua independiente
- Motor de corriente continua shunt
- Motor de corriente continua serie
- Motor de corriente continua compuesta
- Máquina síncrona

Representaremos, a continuación y a modo de ilustración, una pantalla de cada uno de los esquemas mencionados.

### Transformador monofásico

Esquema que permite el ensayo de transformadores monofásicos (figura 43).

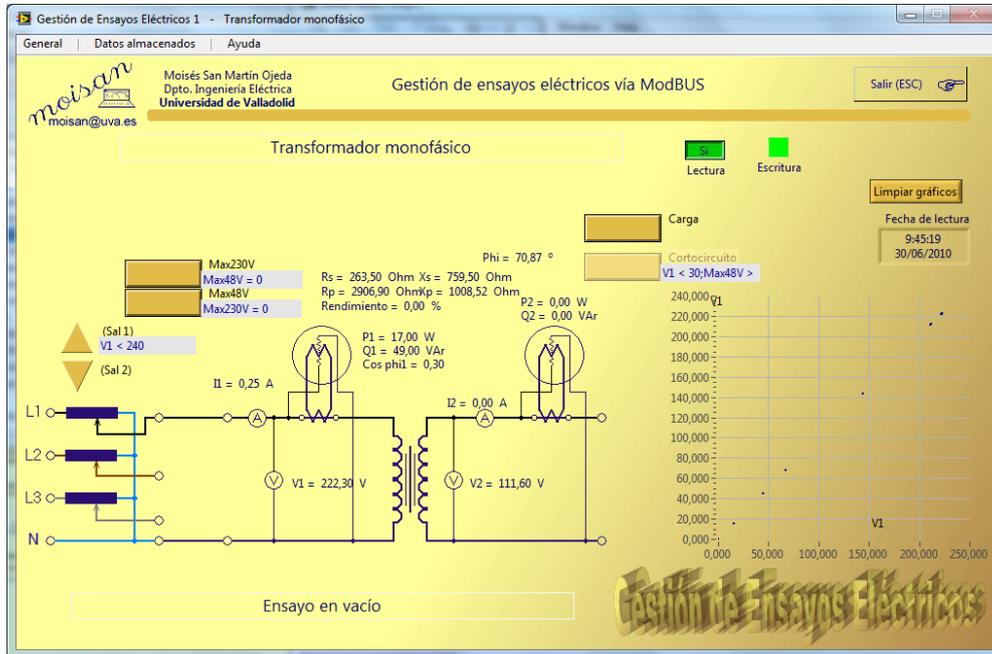


Figura 43.- Gestión de ensayos: Transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

### Transformador trifásico

Esquema que permite el ensayo de transformadores trifásicos (figura 44).

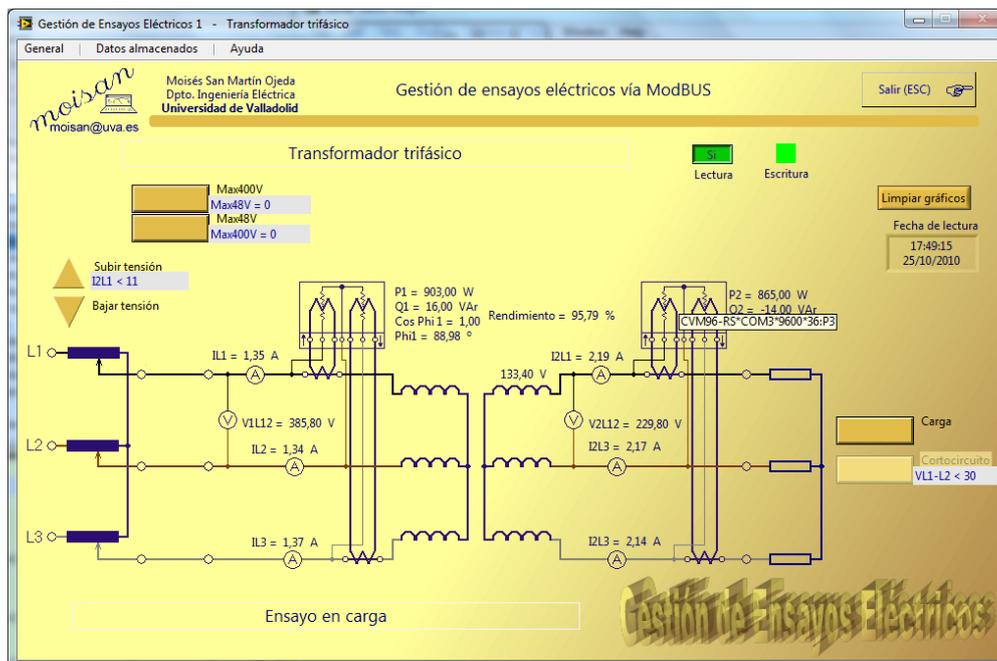


Figura 44.- Gestión de ensayos: Transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

## Circuitos magnéticos

Esquema que permite el ensayo de un circuito magnético de doble ventana (figura 45).

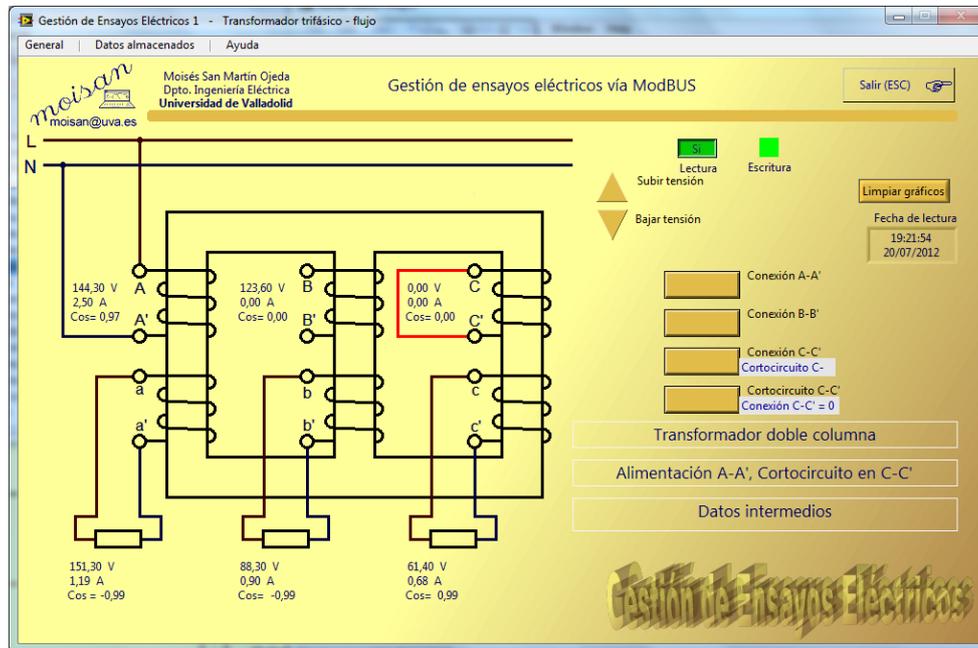


Figura 45.- Gestión de ensayos: Circuito magnético (Fuente: Elaboración propia)

## Máquina asíncrona

Esquema que permite el ensayo de máquina de inducción (figura 46).

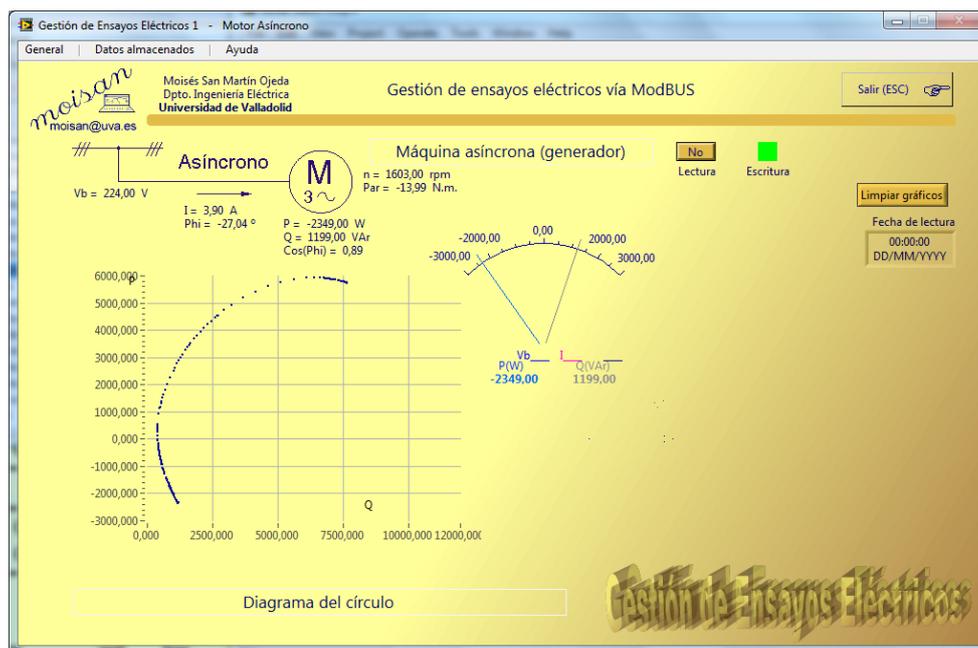


Figura 46.- Gestión de ensayos: Máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

## Máquina asíncrona con freno

Esquema que permite el ensayo de motores de inducción con freno (figura 47).

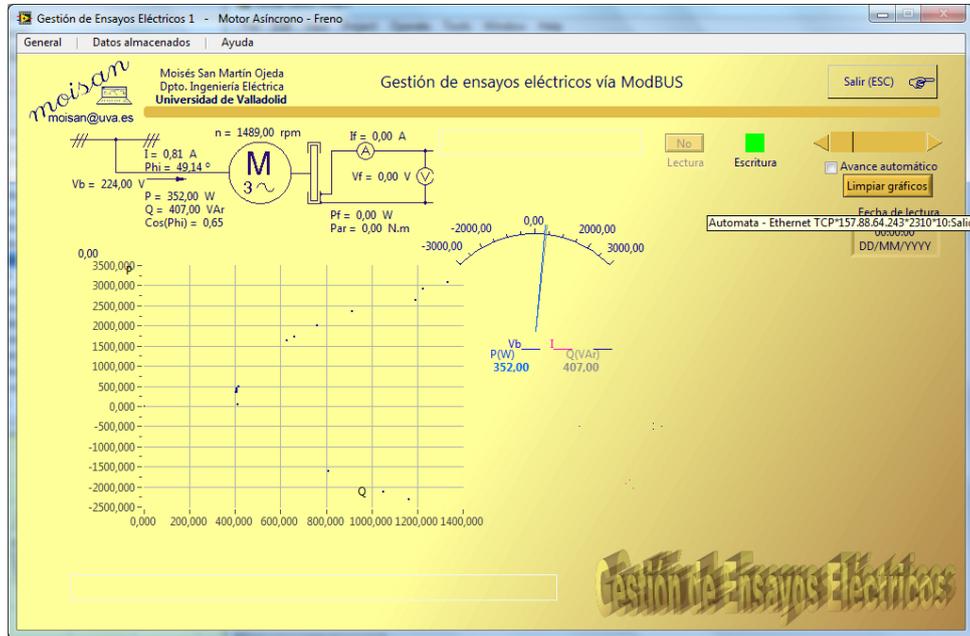


Figura 47.- Gestión de ensayos: Máquina asíncrona con freno (Fuente: Elaboración propia)

## Máquina de corriente continua excitación independiente

Esquema que permite el ensayo de máquinas de corriente continua con excitación independiente (figura 48).

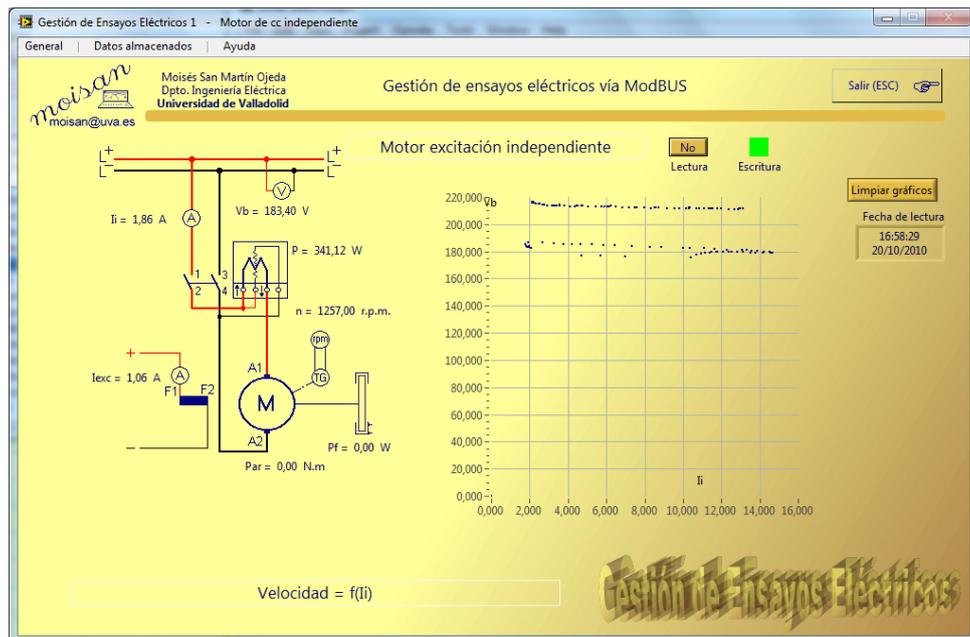


Figura 48.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación independiente (Fuente: Elaboración propia)

### Máquina de corriente continua excitación shunt

Esquema que permite el ensayo de máquinas de corriente continua con excitación derivación (figura 49).

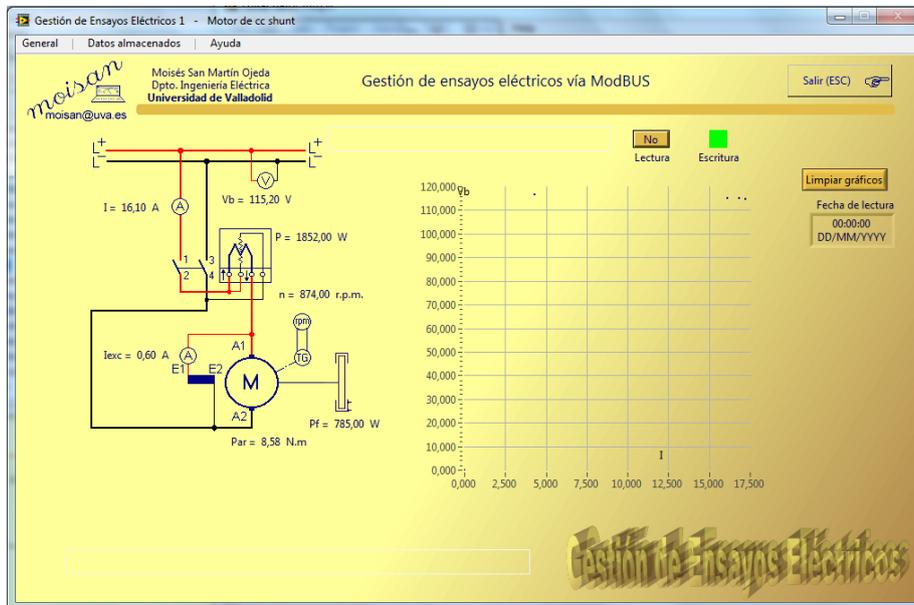


Figura 49.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación shunt (Fuente: Elaboración propia)

### Máquina de corriente continua excitación serie

Esquema que permite el ensayo de máquinas de corriente continua con excitación serie (figura 50).

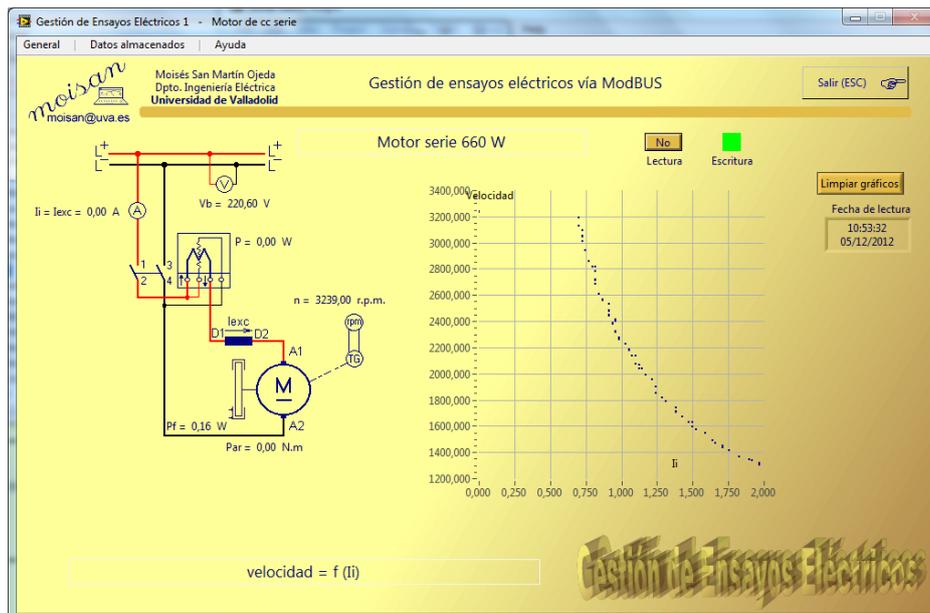


Figura 50.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación serie (Fuente: Elaboración propia)

### Máquina de corriente continua excitación compuesta

Esquema que permite el ensayo de máquinas de corriente continua con excitación compuesta. Se representan en las siguientes figuras las dos configuraciones de excitación compuesta (figura 51 y figura 52).

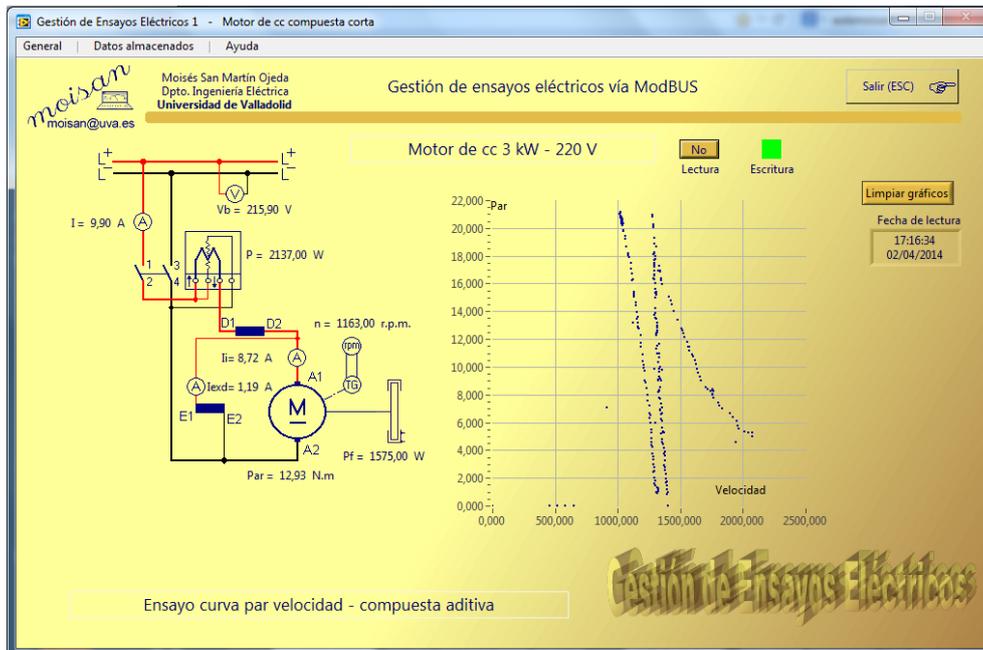


Figura 51.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación compuesta corta (Fuente: Elaboración propia)

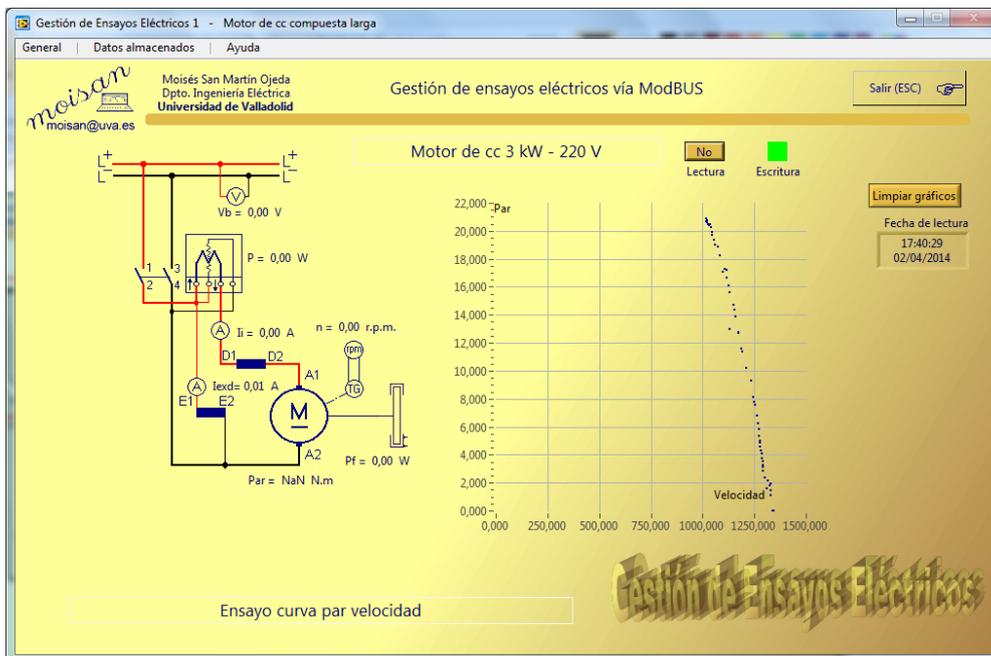


Figura 52.- Gestión de ensayos: Motor de cc excitación compuesta larga (Fuente: Elaboración propia)

## Máquina síncrona

Esquema que permite el ensayo de máquinas síncronas (figura 53).

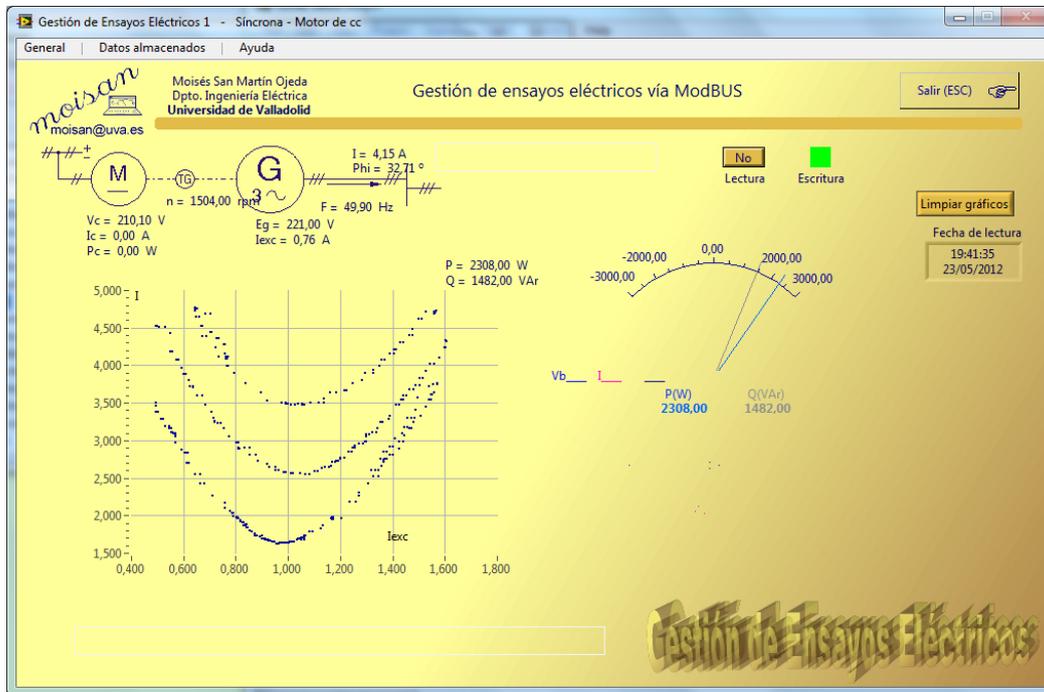


Figura 53.- Gestión de ensayos: Máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

## Software de adquisición de valores instantáneos

Como complemento al programa de *Gestión de ensayos eléctricos* que conecta principalmente con aparatos de medida que proporciona valores medios y eficaces se ha creado, además, un software específico para la adquisición de valores instantáneos.

Como en el caso del programa anterior, el nuevo software creado constituye una plataforma configurable para la adquisición de datos. Se puede utilizar con cualquiera de los dispositivos de adquisición ya mencionados (de laboratorio e industriales) y permite el análisis de fenómenos eléctricos independientes.

Con el propósito de que este software sea versátil, además de la adquisición el sistema almacena textos explicativos y gráficos ilustrativos.

Se expone, a modo de ejemplo, algunas de las adquisiciones realizadas también en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

### Tensiones y corrientes en un transformador eléctrico

En la figura 54 se representan los datos de tensiones y corrientes adquiridos en un transformador eléctrico.

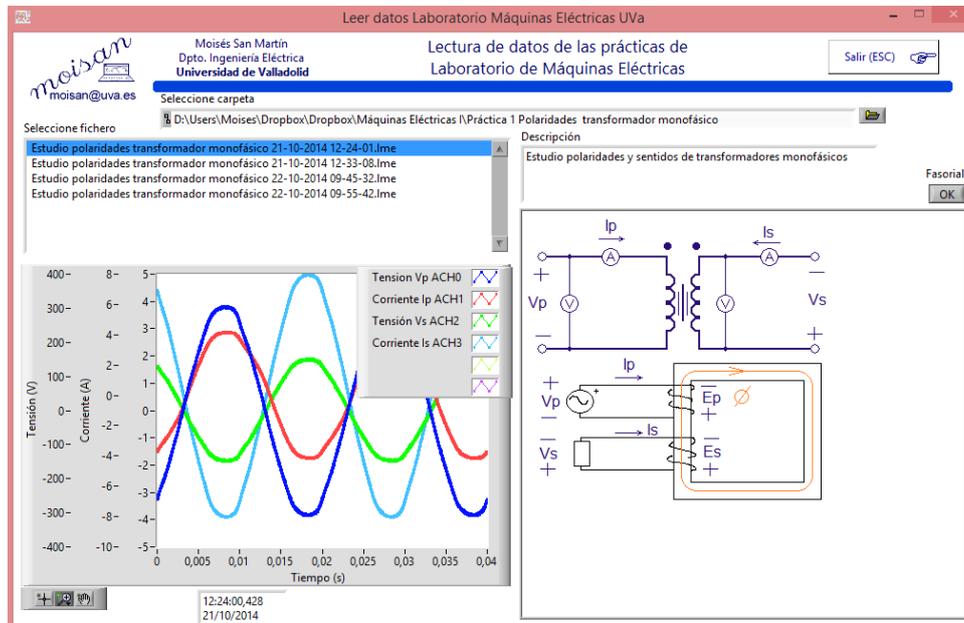


Figura 54.- Adquisición de tensiones y corrientes en transformador eléctrico 1 (Fuente: Elaboración propia)

La plataforma creada permite el tratamiento de los datos, determinando los valores medios y eficaces, así como la representación del diagrama fasorial (véase la figura 55).

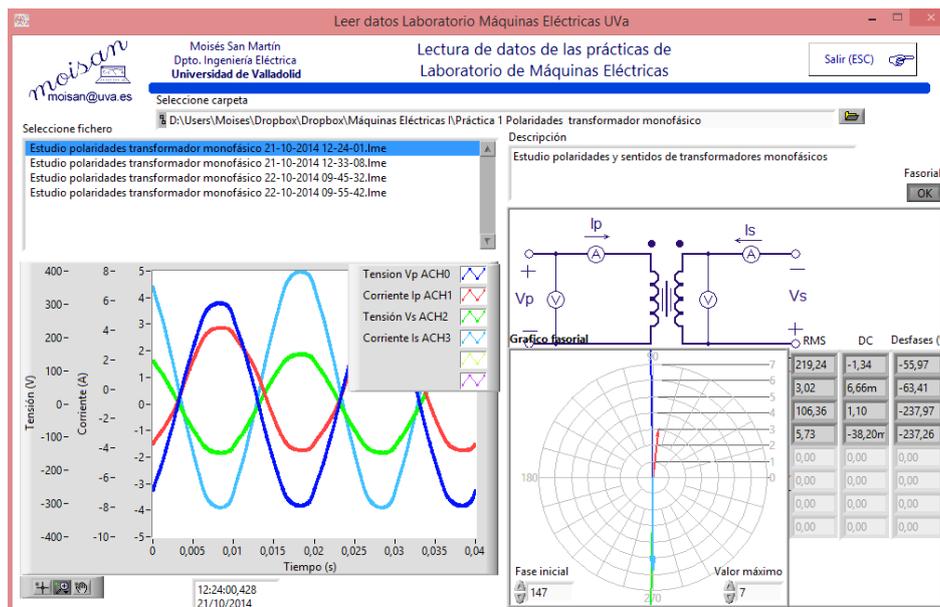


Figura 55.- Adquisición de tensiones y corrientes en transformador eléctrico 2 (Fuente: Elaboración propia)

### Corriente de vacío de un transformador eléctrico

En la figura 56 se representa la adquisición de datos correspondiente a la corriente de vacío de un transformador eléctrico.

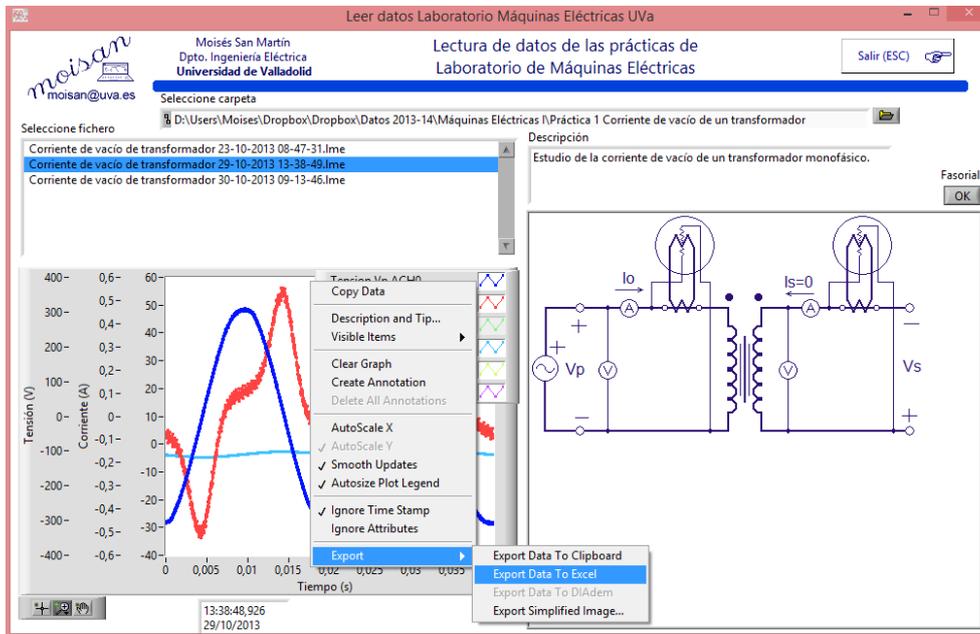


Figura 56.- Corriente de vacío de un transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)

Indicamos que los datos pueden ser exportados a diversos formatos, entre ellos a una hoja de cálculo Excel. En la figura 57 se representan estos datos en la hoja Excel y la determinación de una curva similar a la curva de histéresis del transformador ensayado.

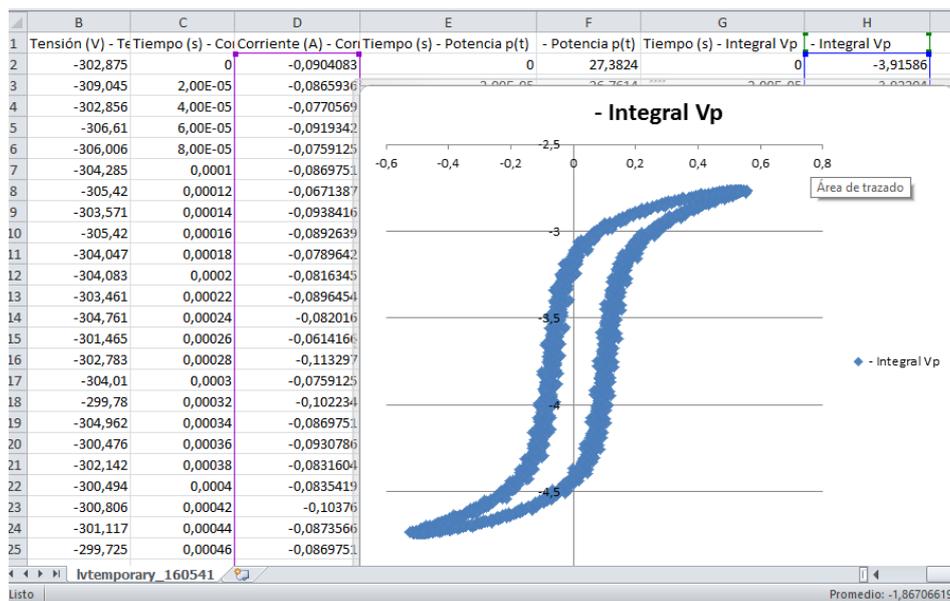


Figura 57.- Curva de vacío y obtención del ciclo de histéresis (Fuente: Elaboración propia)

### Determinación experimental del Índice Horario de un Transformador Trifásico

En la figura 58 se representa la adquisición de datos correspondiente a la determinación del Índice Horario (desfase entre tensiones del primario y del secundario) de un transformador trifásico.

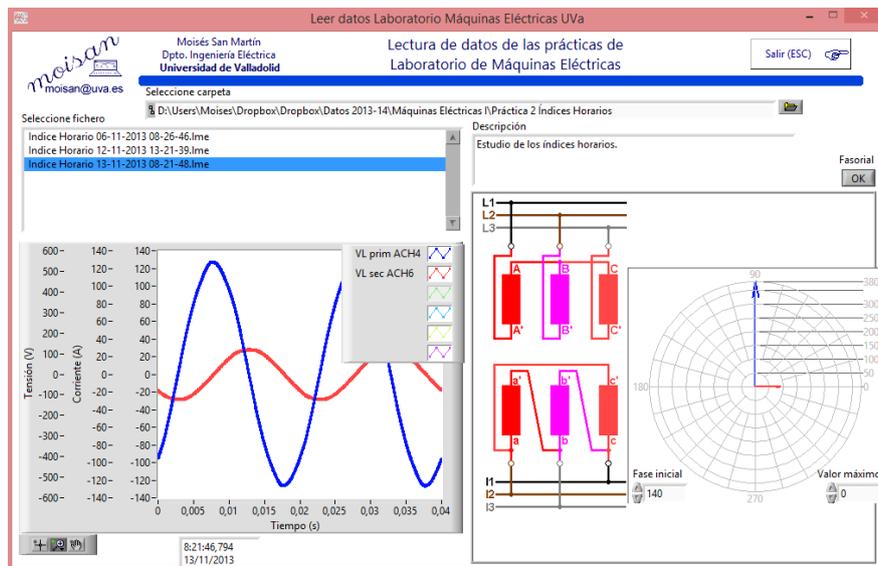


Figura 58.- Determinación experimental de Índice Horario (Fuente: Elaboración propia)

### Desplazamiento de la tensión del neutro en banco trifásico

En la figura 59 se representa la adquisición de datos correspondiente al desplazamiento de la tensión del neutro en un banco de tres transformadores monofásicos.

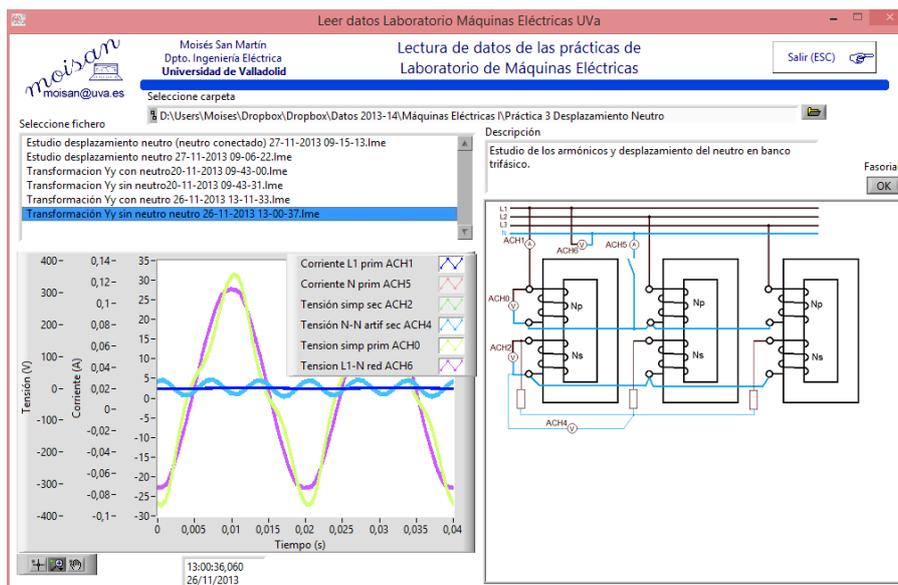


Figura 59.- Desplazamiento de neutro en banco trifásico (Fuente: Elaboración propia)

## Corrientes de estator y rotor en motor de inducción de rotor bobinado

En la figura 60 se representa la adquisición de datos correspondiente a las corrientes de estator y rotor de un motor de inducción de rotor bobinado en el momento de su conexión.

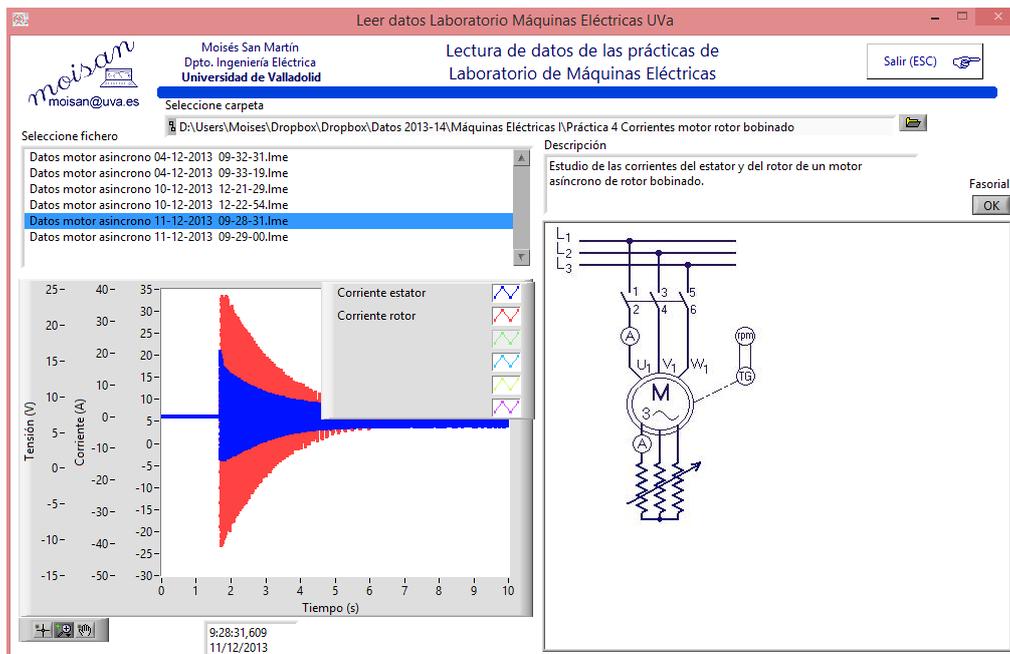


Figura 60.- Corrientes de motor de inducción (Fuente: Elaboración propia)

Se representa a continuación un detalle de la gráfica anterior (figura 61).

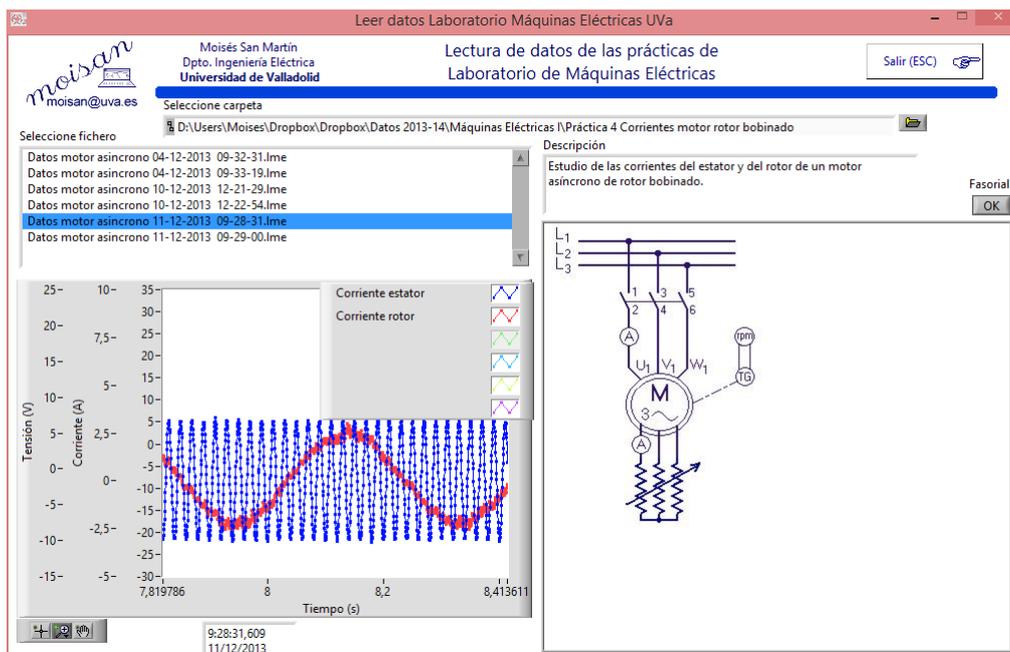


Figura 61.- Detalle corrientes de motor de rotor bobinado (Fuente: Elaboración propia)

## Ensayo de deslizamiento de máquina síncrona

En la figura 62 se representa la adquisición de datos correspondiente al ensayo de deslizamiento para la determinación de las reactancias longitudinal y transversal de una máquina síncrona.

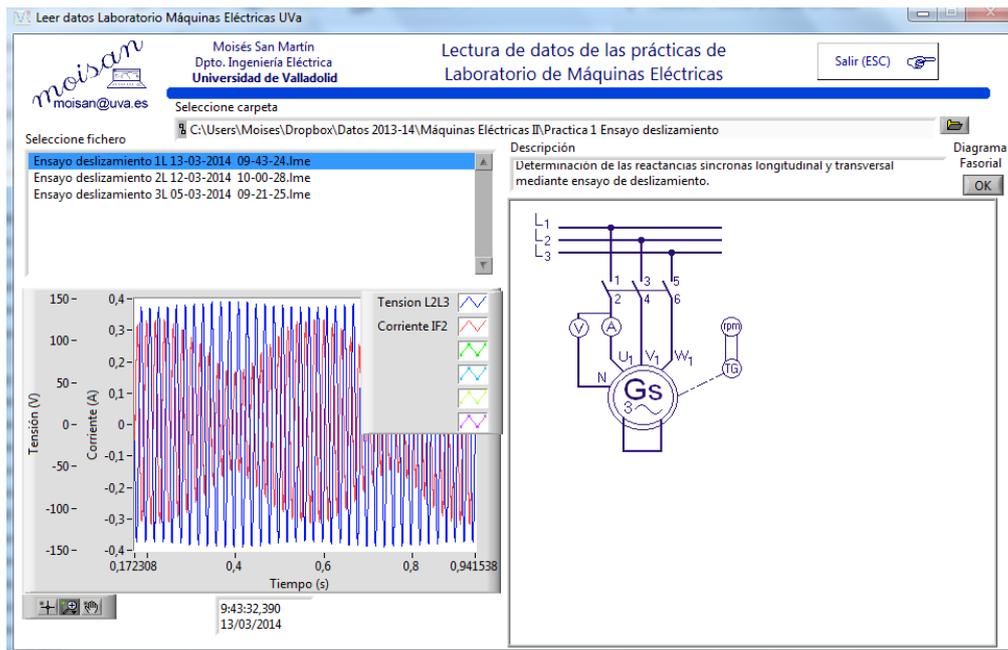


Figura 62.-Ensayo de deslizamiento de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

## Software de aplicaciones WEB e Internet

### Utilización de la nube para el almacenamiento de los datos adquiridos

La utilización de sistemas de almacenamiento remoto permite liberar a los dispositivos físicos de ocupar espacio de memoria y posibilita el acceso a los datos desde diferentes orígenes.

El sistema desarrollado en esta tesis permite el almacenamiento de los datos en la nube, con la única condición de que el servidor de almacenamiento remoto soporte el protocolo WebDAV, que incorpora características de seguridad mediante claves de identificación y acceso.

En la figura 63 se representan las diferentes carpetas donde se almacenan de forma automática los datos en el servidor BOX.

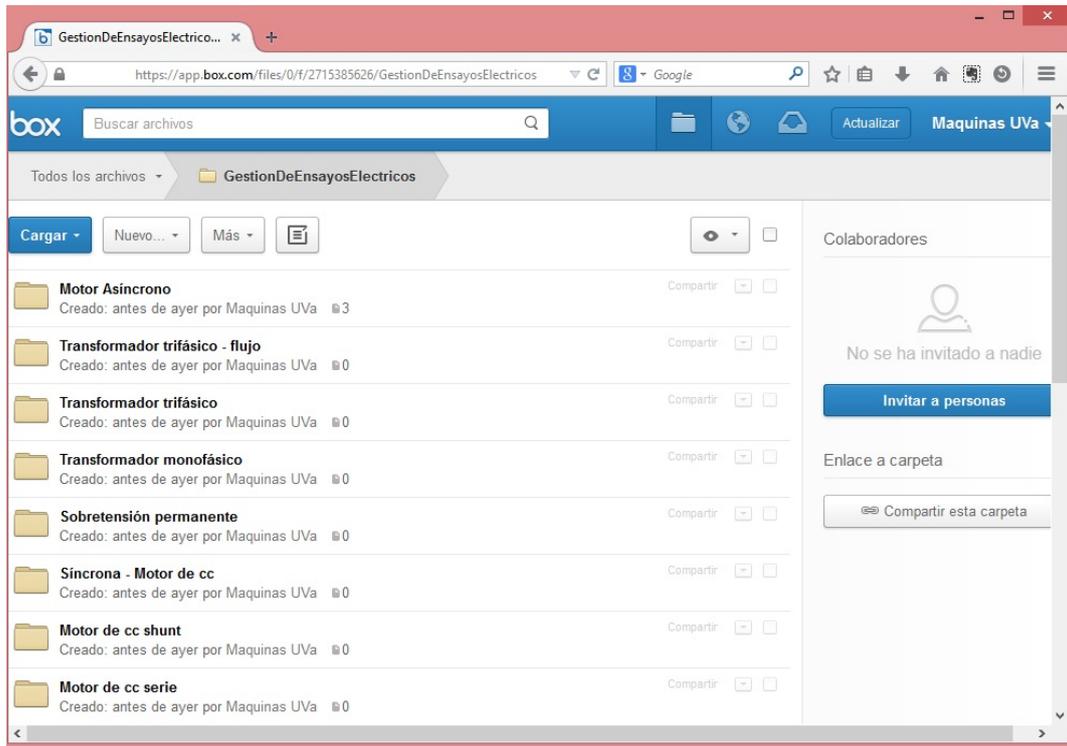


Figura 63.-Datos en servidor Box (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 64 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

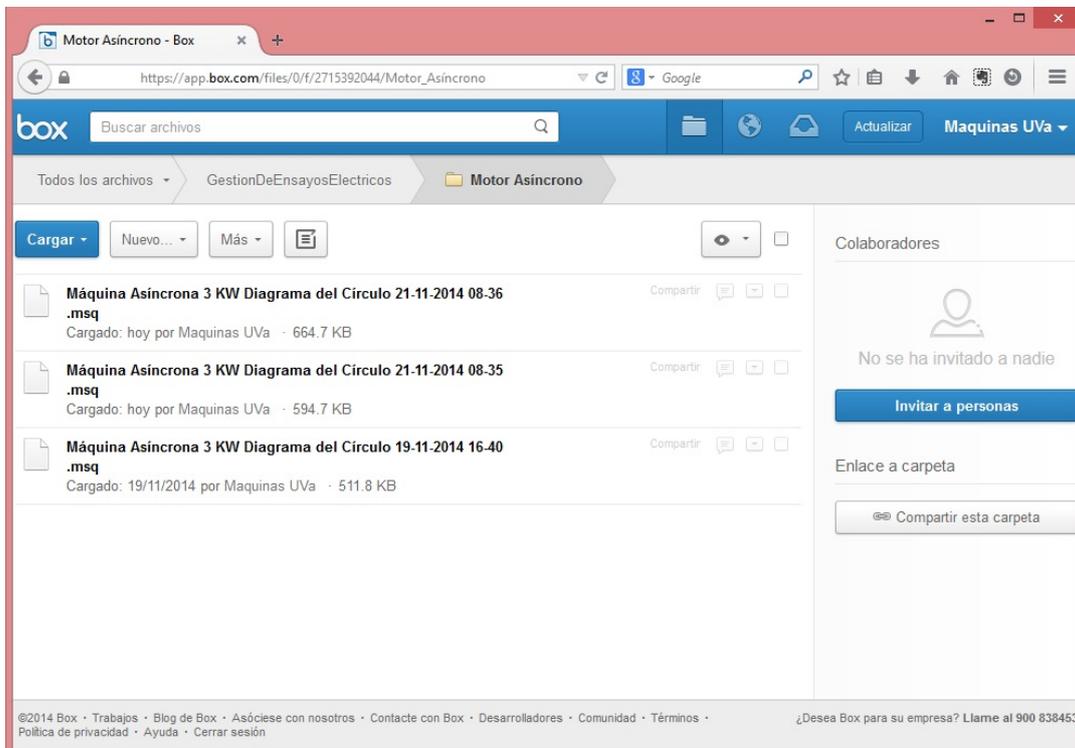


Figura 64.-Datos en servidor Box (2) (Fuente: Elaboración propia)

Otro de los servidores que se ha utilizado para el almacenamiento es el servidor OwnCloud (véase la figura 65).

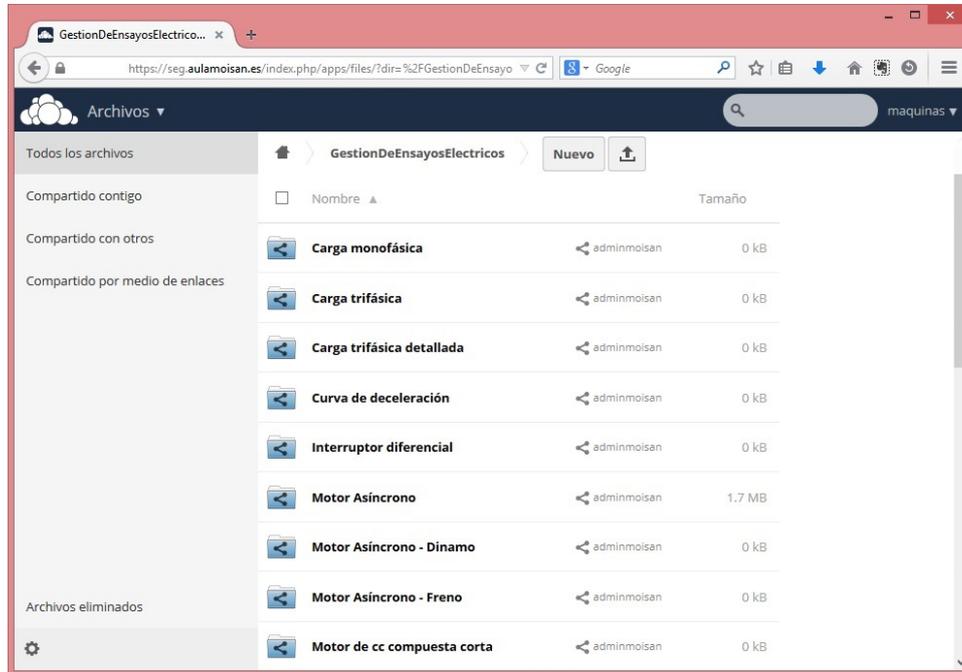


Figura 65.-Datos en servidor OwnCloud (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 66 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

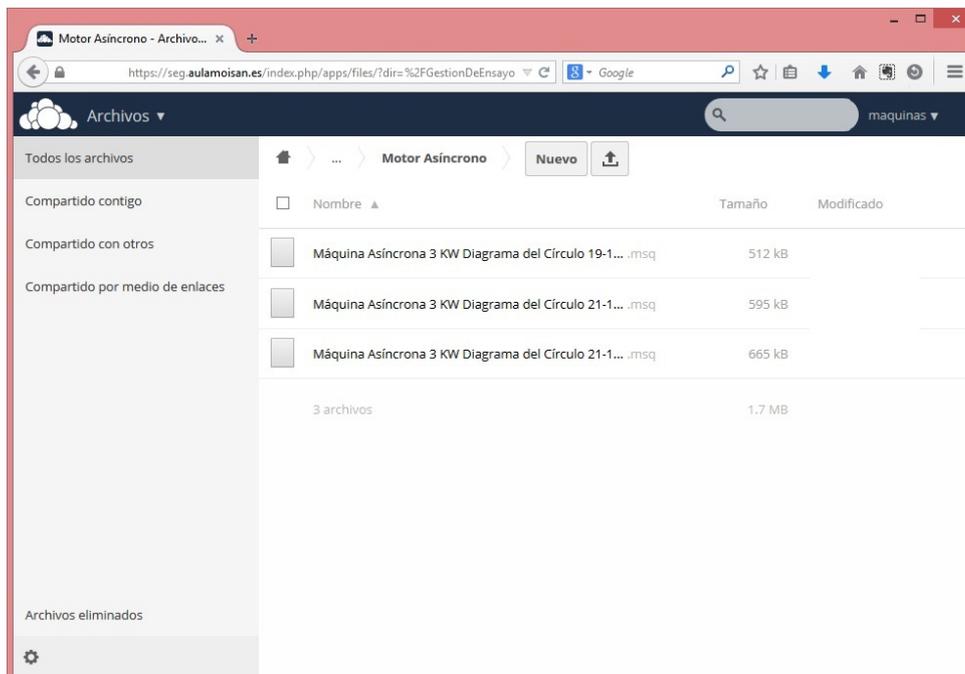


Figura 66.-Datos en servidor OwnCloud (2) (Fuente: Elaboración propia)

Otro de los servidores que se ha utilizado para el almacenamiento es el servidor Google Drive (véase la figura 67).

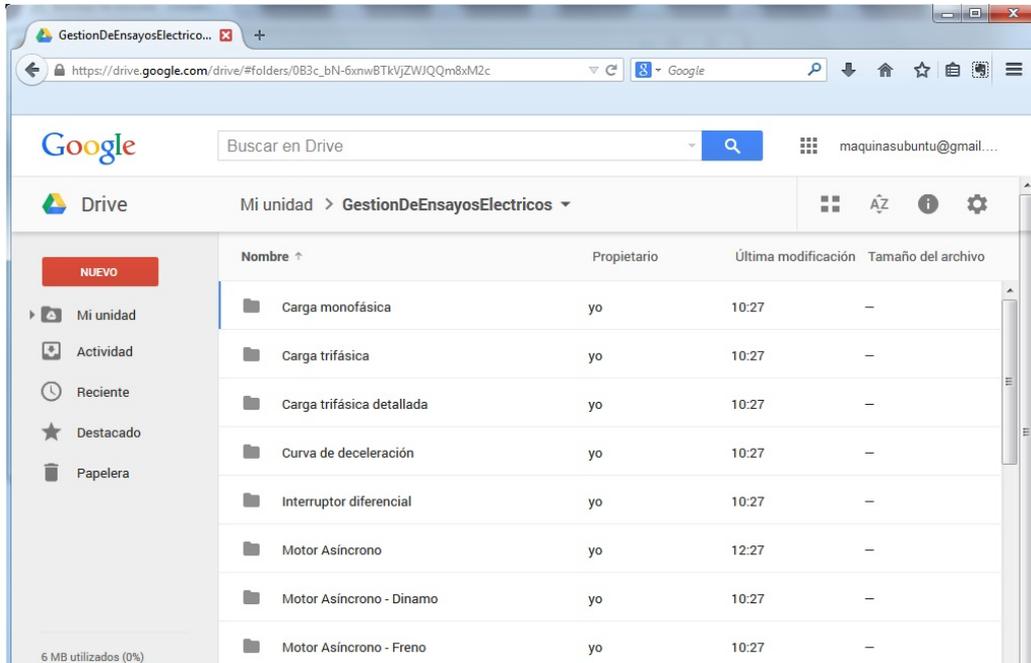


Figura 67.-Datos en servidor Google Drive (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 68 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

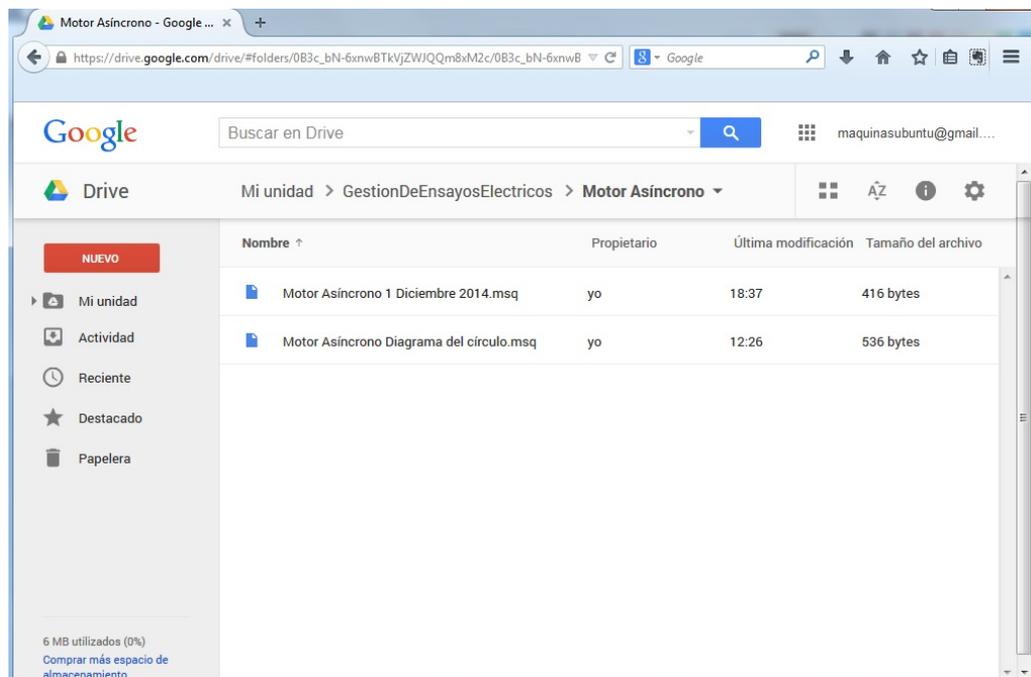


Figura 68.-Datos en servidor Google Drive (2) (Fuente: Elaboración propia)

Todos estos datos pueden ser gestionados desde el software de gestión y control, pudiendo tanto almacenar datos en estos servidores como leer de estos servidores sin ocupar espacio en el equipo físico donde está implementado dicho software (véase la figura 69).

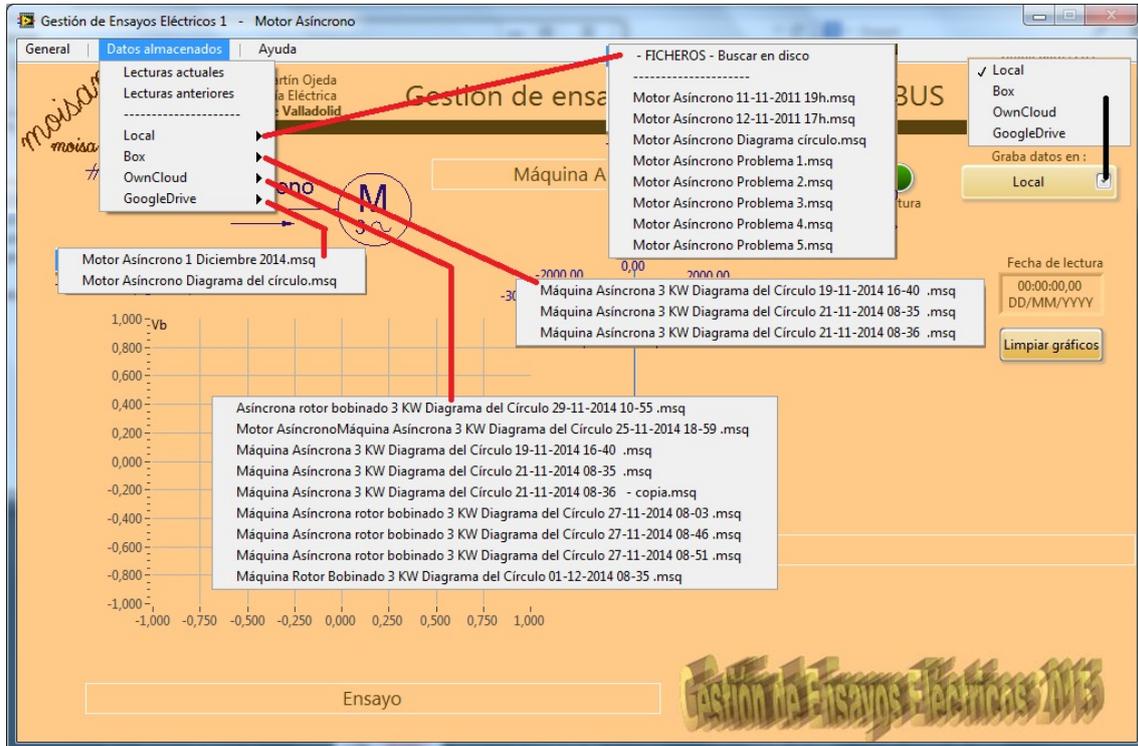


Figura 69.-Gestión de ficheros con el software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)

### Control vía WEB

Las aplicaciones WEB van a permitir la visualización y control del proceso industrial desde una página WEB, sin necesidad de tener instalado el sistema de gestión y control, y en dispositivos de lo más diversos (teléfonos móviles, tablets, etc.).

La plataforma desarrollada en la realización de esta Tesis permite la publicación del software desarrollado en página WEB.

Se muestra en la figura 70 el acceso (visualización y control) a un montaje desde dispositivo Tablet.

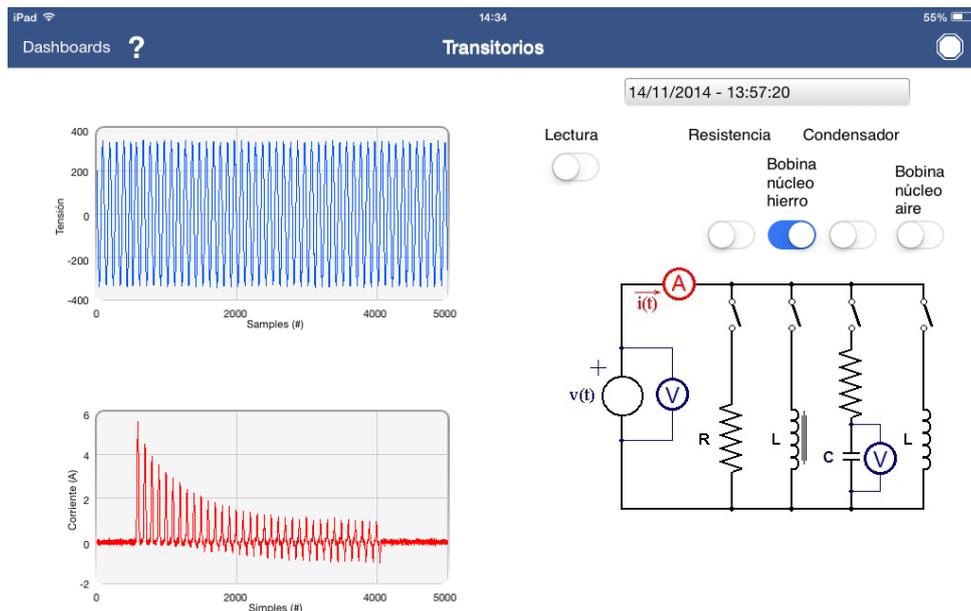


Figura 70.- Acceso desde dispositivo Tablet (Fuente: Elaboración propia)

Las misma aplicación se puede acceder vía WEB desde ordenador de despacho (véase la figura 71).

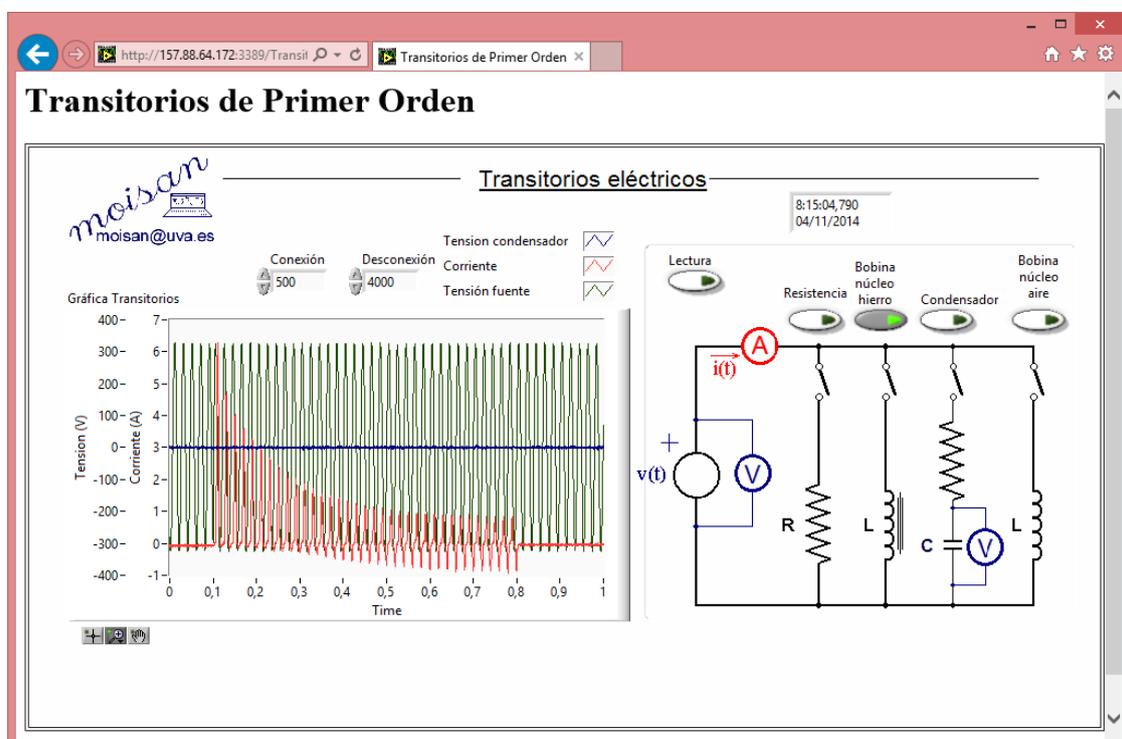


Figura 71.- Acceso WEB desde ordenador (Fuente: Elaboración propia)

Si bien el software *Gestión de ensayos eléctricos vía ModBUS* es susceptible de ser controlado remotamente vía WEB, no se ha activado este funcionamiento debido a la diversidad de esquemas que es capaz de implementar este software.

Se han desarrollado, a título de ejemplo, software de control vía WEB para la adquisición de tensiones y corrientes, que se muestran a continuación.

Estos montajes se han realizado físicamente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, si bien se puede remotamente vía WEB desde cualquier lugar.

### Control vía WEB en tiempo real de circuito monofásico

En la figura 72 se representa la adquisición de datos (y control WEB) correspondiente a diferentes cargas monofásicas.

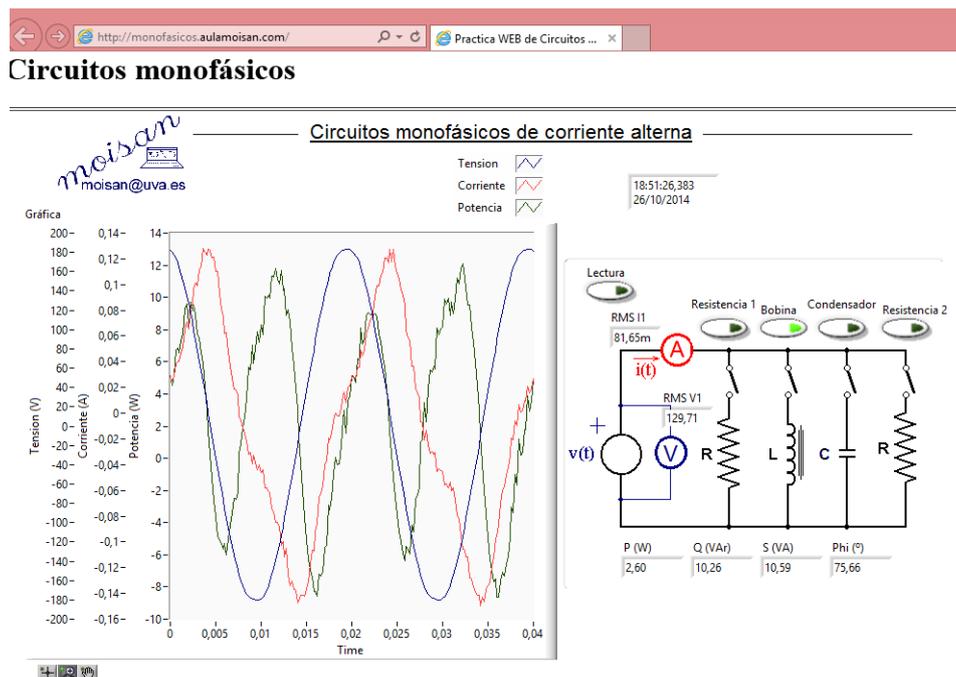


Figura 72.- Control WEB de cargas monofásicas (Fuente: Elaboración propia)

### Control vía WEB en tiempo real de circuito trifásico

En la figura 73 se representa la adquisición de datos (y control WEB) correspondiente a diferentes cargas trifásicas.

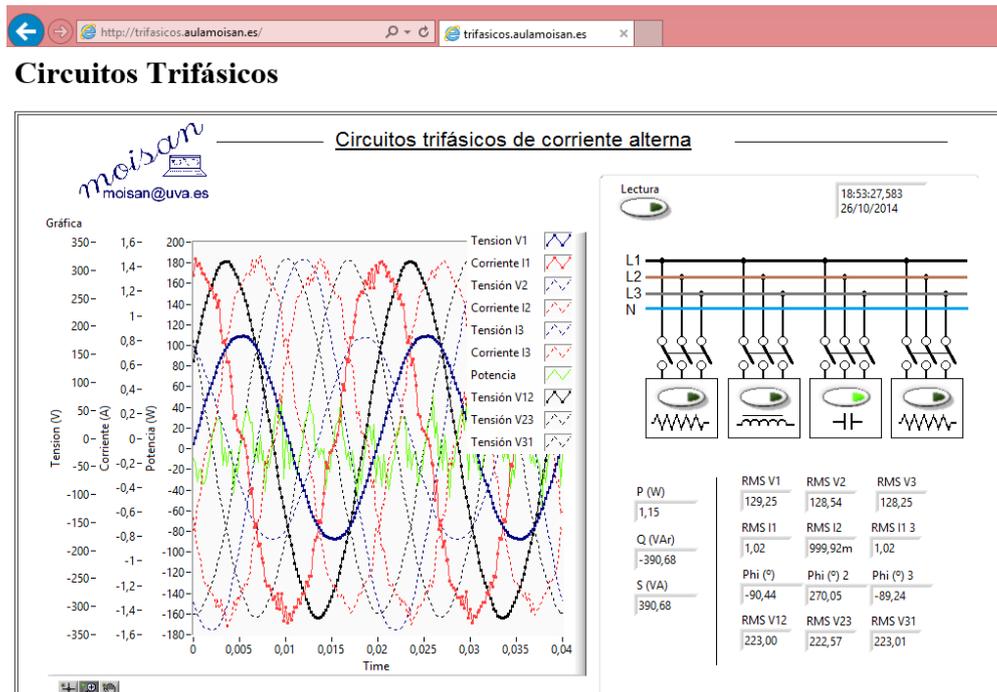


Figura 73.- Control WEB cargas trifásicas (Fuente: Elaboración propia)

### Control vía WEB en tiempo real de transitorio eléctrico

En la figura 74 se representa la adquisición de datos (y control WEB) correspondiente al transitorio de diferentes cargas. Obsérvese que el dispositivo realiza el control de la adquisición provocando el transitorio eléctrico.

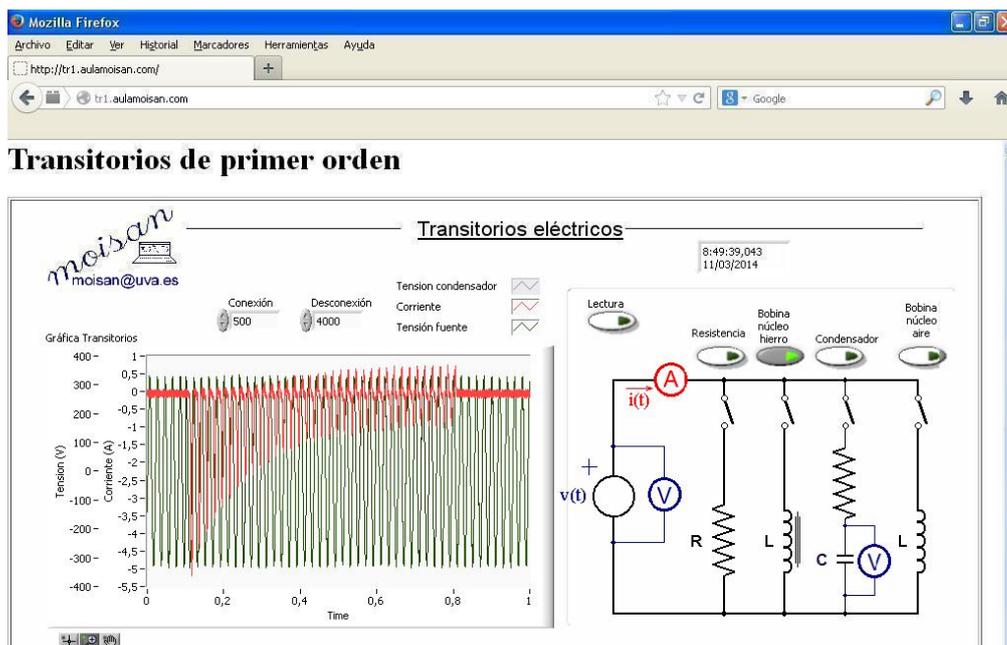


Figura 74.- Control WEB de transitorio eléctrico (Fuente: Elaboración propia)

### 3.3.2.- Creación de simuladores

En el ámbito de esta Tesis Doctoral se han creado una serie de *simuladores* que servirán para profundizar en el conocimiento de los diversos fenómenos en las Máquinas Eléctricas.

Estos simuladores serán validados con los datos adquiridos de manera sistemática por los programas de gestión y control.

Los simuladores desarrollados, que se detallarán posteriormente, son:

- Simulador de transformador monofásico
- Simulador para la determinación del índice horario en transformación trifásica
- Simulación para la visualización de campo magnético giratorio
- Simulación de máquina de inducción
- Simulación de máquina síncrona
- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden
- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden

#### Simulador de transformador eléctrico

Para el estudio del funcionamiento de transformadores monofásicos se ha diseñado un simulador software que analiza las principales magnitudes y características de estos equipos destinados a la transformación de energía eléctrica (figura 75).

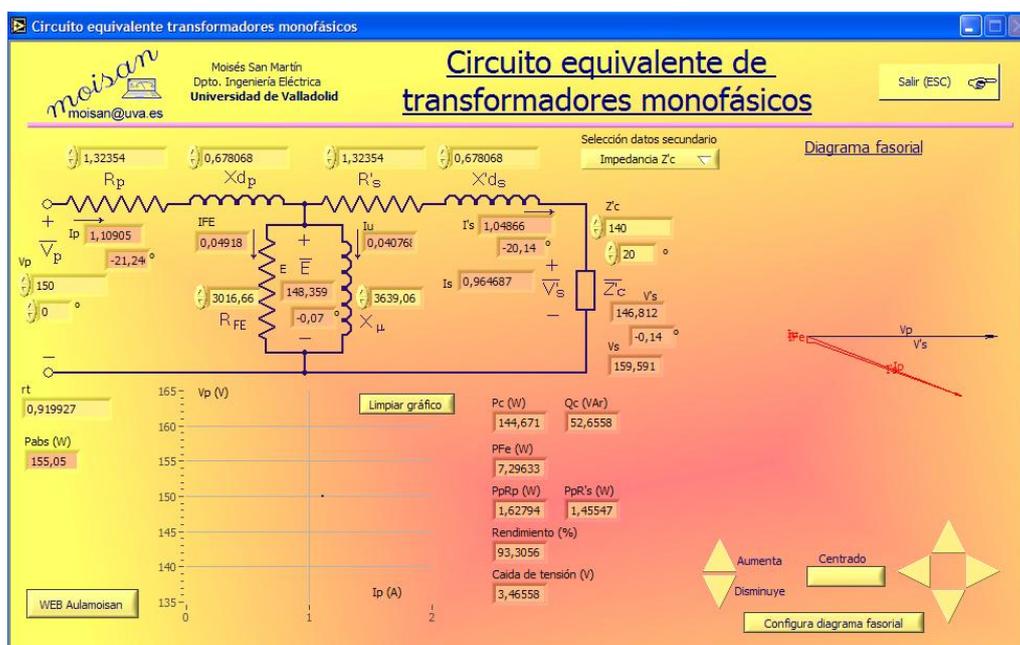


Figura 75.- Simulador de transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)

El simulador parte de los parámetros del circuito equivalente (parámetros que deberán obtenerse a partir de los ensayos correspondientes):

- $R_p$ : Resistencia del devanado primario.
- $X_{dp}$ : Reactancia característica de la dispersión de flujo en el primario.
- $R_{FE}$ : Resistencia correspondiente a las pérdidas en el material magnético.
- $X_\mu$ : Reactancia que caracteriza el flujo útil del transformador.
- $R'_s$ : Resistencia del devanado secundario reducida al primario.
- $X'_{ds}$ : Reactancia característica de la dispersión de flujo en el secundario reducida al primario.

Por otra parte, serán datos también la tensión de entrada  $V_p$  y la relación de transformación.

Respecto a la carga conectada al secundario se presentan dos opciones

- La impedancia de carga (reducida al primario).
- Las potencias activa y reactiva de carga.

Todos estos datos de entrada pueden ser modificados a voluntad por el usuario del programa.

A partir de esos datos de entrada el programa determina las tensiones y corriente en todos los elementos del circuito equivalente (figura 76):

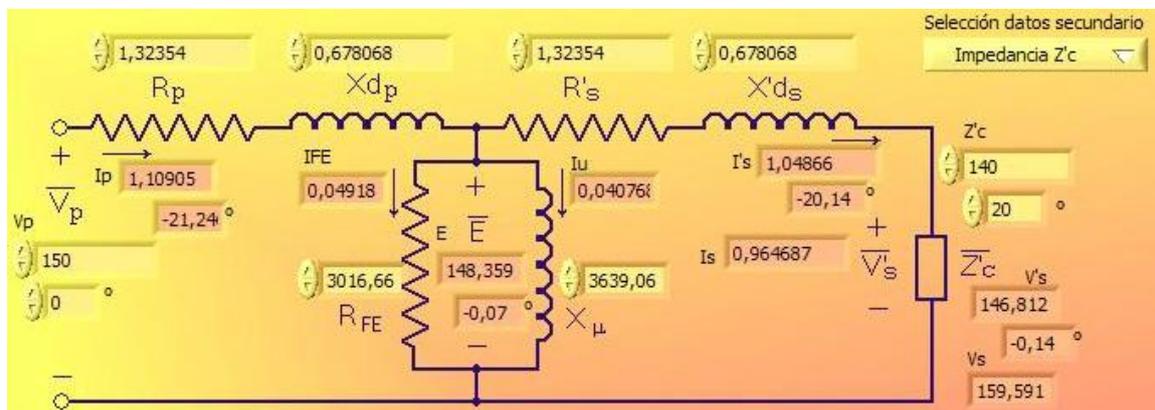


Figura 76.- Ejemplo cálculo circuito equivalente (Fuente: Elaboración propia)

Además, calcula las distintas potencias, el rendimiento, la caída de tensión. Con los fasores de tensiones y corrientes dibuja el diagrama fasorial y permite la representación en un gráfico de las distintas magnitudes calculadas (figura 77).

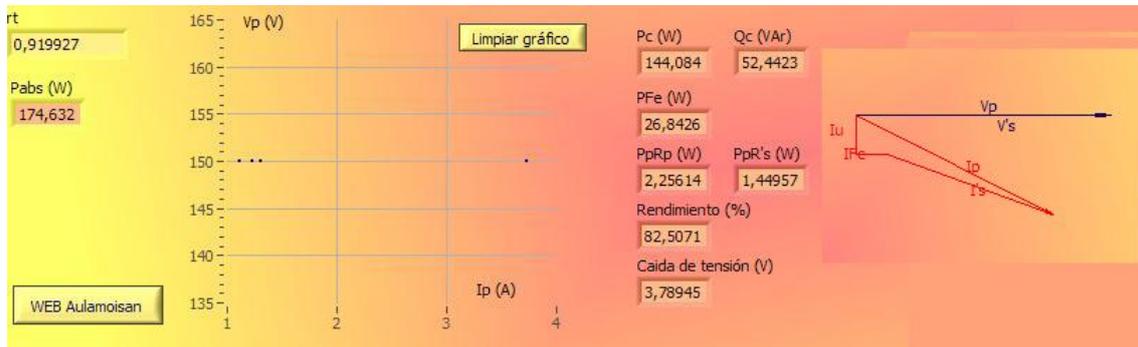


Figura 77.- Detalle diagrama fasorial (Fuente: Elaboración propia)

En el gráfico se pueden representar (tanto en eje de ordenadas como de abscisas) todas las magnitudes calculadas.

Con este gráfico podemos analizar la evaluación de alguna de las magnitudes calculadas variando los parámetros del circuito equivalente o de la carga (figura 78 y figura 79).

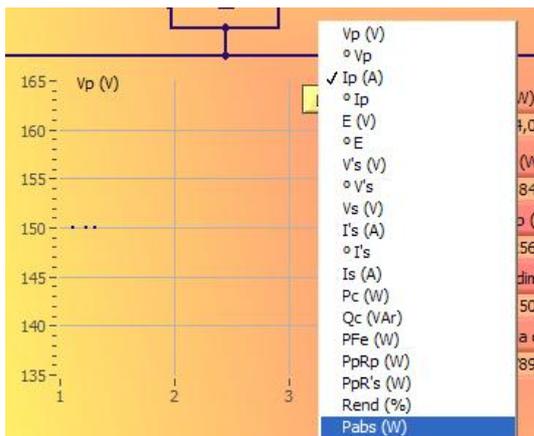


Figura 78.- Detalle magnitudes gráfico (Fuente: Elaboración propia)

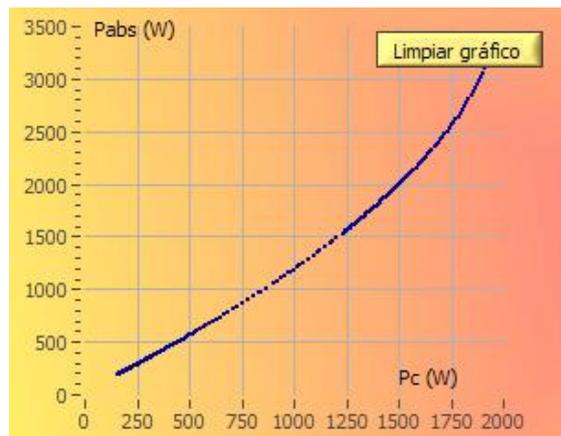


Figura 79.- Ejemplo representación evolución (Fuente: Elaboración propia)

### Simulador para la determinación de índice horario

Otro de los fenómenos objeto de estudio en el ámbito de esta Tesis ha sido el Índice Horario en transformaciones trifásicas, es decir el conocimiento del ángulo de desfase entre tensiones primarias y secundarias.

Se ha generado un software simulador que visualiza el procedimiento para la determinación del índice horario.

Se inicia el software con la pantalla inicial mostrada en la figura 80.

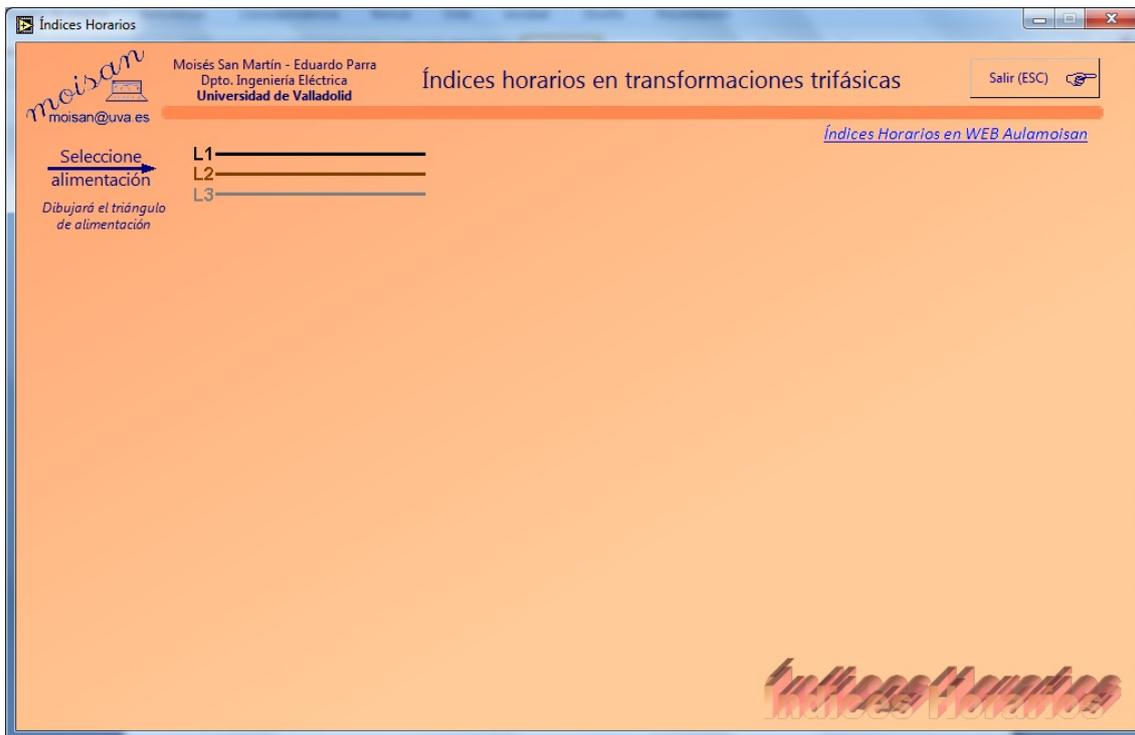


Figura 80.- Pantalla inicial. Índices Horarios (Fuente: Elaboración propia)

En primer lugar se deberá seleccionar la alimentación entre las posibles (véase la figura 81) pulsando con el botón izquierdo del ratón en las tres líneas de alimentación.

Una vez seleccionada la alimentación se representará el triángulo de tensiones. A continuación se deberá seleccionar la conexión del primario entre las que propone el programas (figura 82):

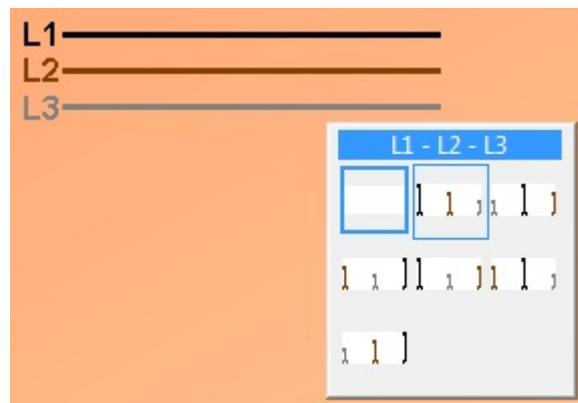


Figura 81.- Índices horarios. Selección alimentación (Fuente: Elaboración propia)

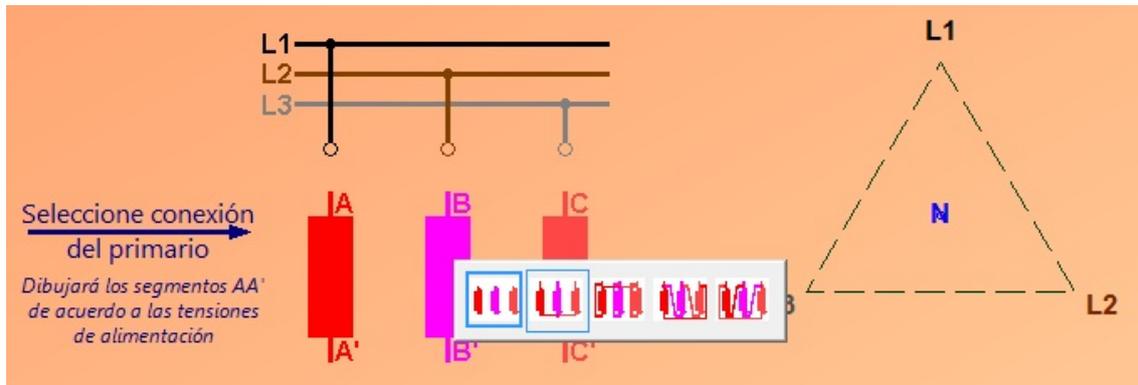


Figura 82.- Índices horarios. Selección de la conexión del primario (Fuente: Elaboración propia)

Una vez seleccionada la conexión del primario, en el triángulo se representarán las tensiones de cada una de las bobinas del primario del transformador, y también las del secundario, que serán paralelas a aquellas (figura 83).

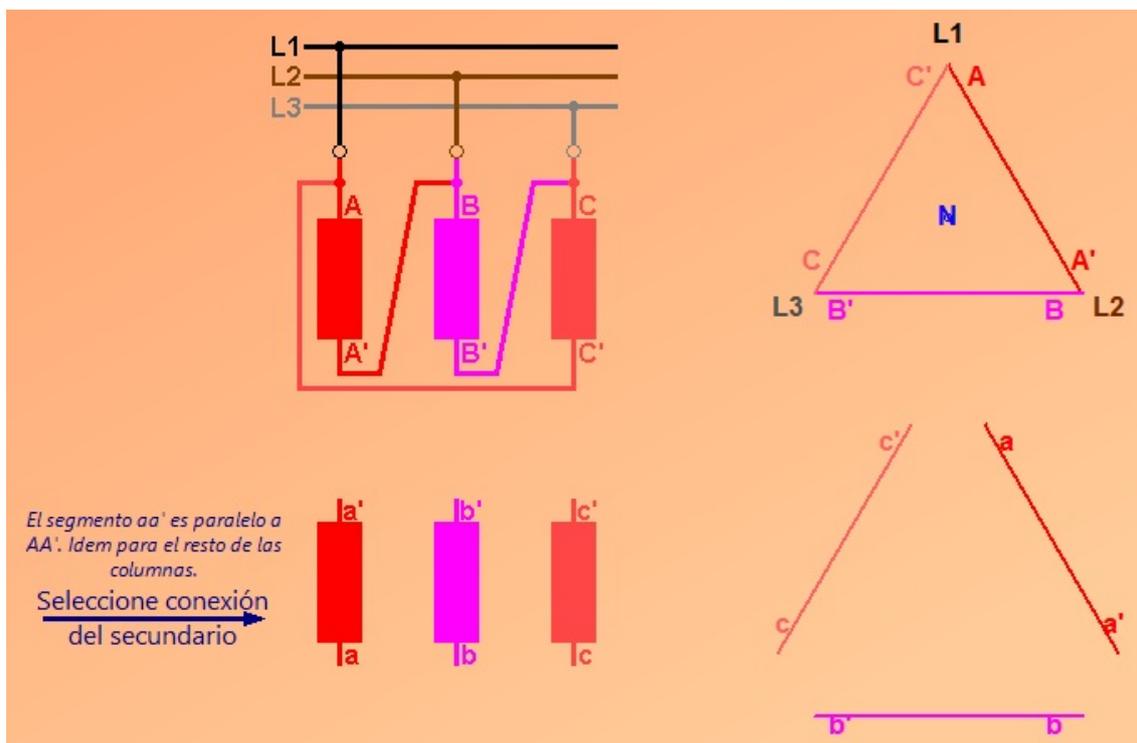


Figura 83.- Índices horarios. Representación tensiones primario y secundario (Fuente: Elaboración propia)

Posteriormente se seleccionará la conexión del secundario, que interconectará los segmentos correspondientes a las tensiones del secundario. En este caso podremos elegir entre conexiones en estrella, triángulo y zigzag (figura 84).

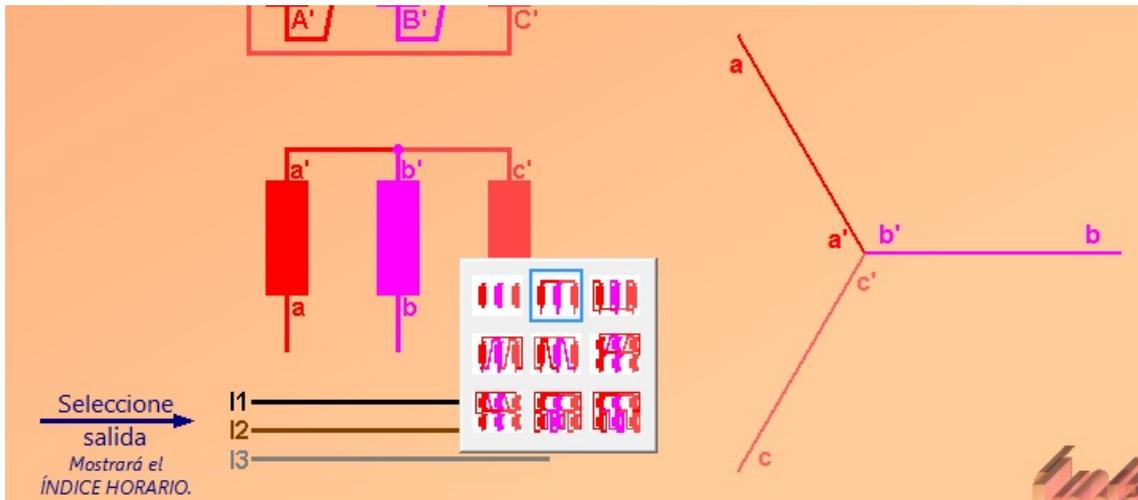


Figura 84.- Índices horarios. Selección conexión secundario (Fuente: Elaboración propia)

Solamente queda elegir la conexión de las líneas de salida del secundario que determinará el índice horario, es decir, el desfase entre las tensiones (simples y compuestas) entre las líneas de entrada del primario y las del secundario (figura 85).

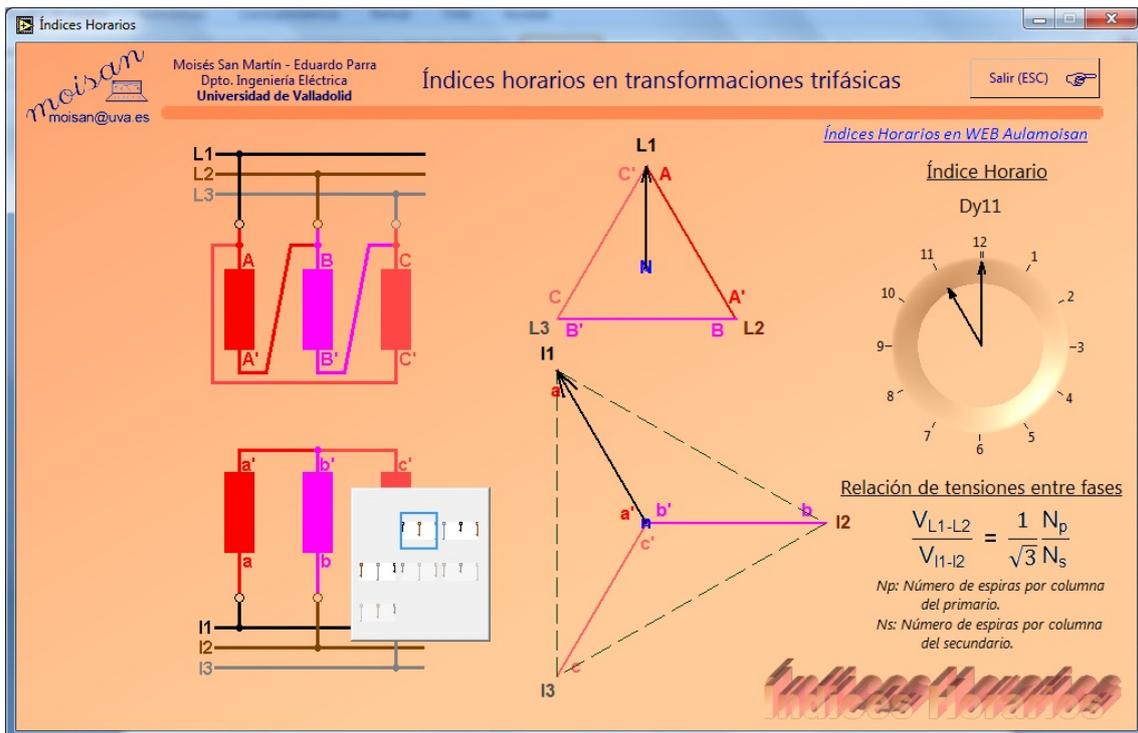


Figura 85.- Índices horarios. Resultado (Fuente: Elaboración propia)

Además del índice horario, el programa indica la relación entre tensiones de línea (entrada y salida).

### Simulador para la visualización de campo magnético giratorio

Se ha generado un simulador para visualizar la distribución de un campo giratorio, principio básico del funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna (síncronas y asíncronas). La siguiente pantalla (figura 86) muestra la visualización del Teorema de Ferraris en una máquina de cuatro polos:

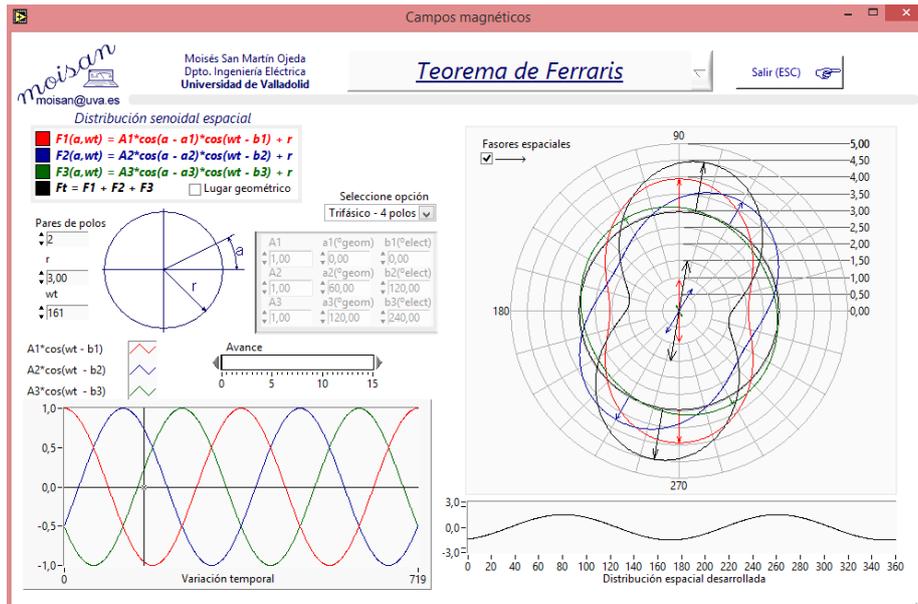


Figura 86.- Simulador teorema de Ferraris (Fuente: Elaboración propia)

En la siguiente pantalla (figura 87), y con el mismo simulador, se muestra el teorema de Leblanc:

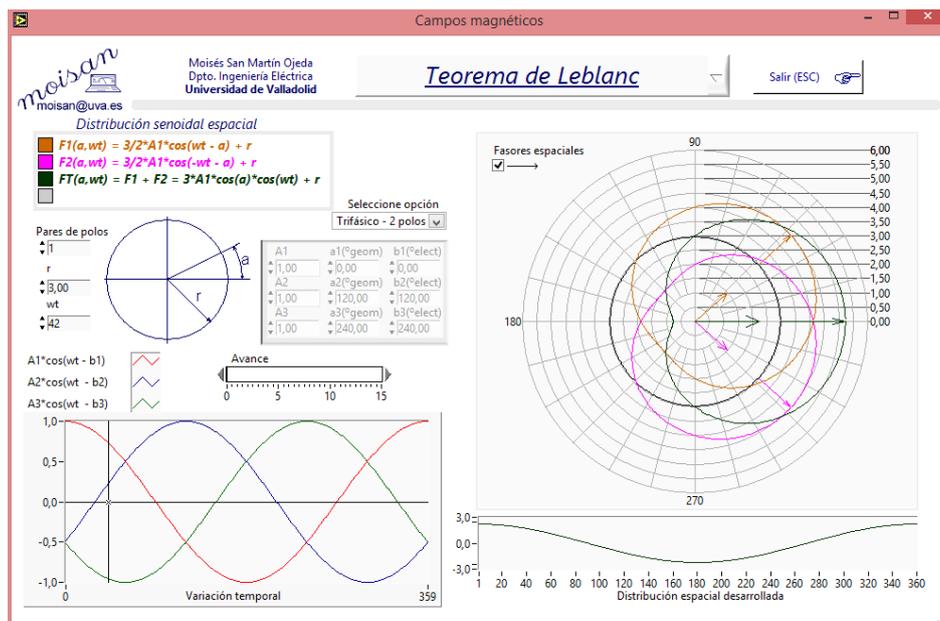


Figura 87.- Teorema de Leblanc (Fuente: Elaboración propia)

## Simulador de máquina de inducción

Se ha generado un simulador para determinar el comportamiento de una máquina asíncrona trifásica (o de inducción). El modelo elegido ha sido el de circuito equivalente. Los parámetros de este modelo deben ser determinados con los ensayos correspondientes.

La figura 88 representa uno de los resultados del simulador, la obtención de las curvas características (par, potencia y corriente) frente a la velocidad. Obsérvese que se ha determinado el funcionamiento de la máquina asíncrona como motor, generador y freno.

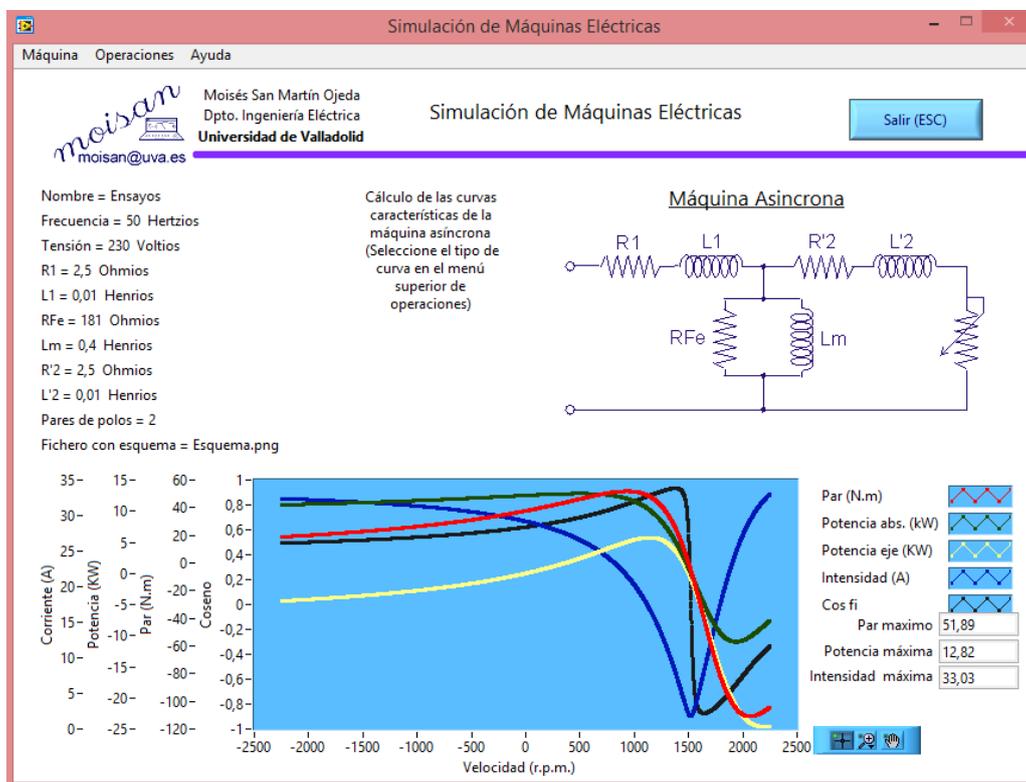


Figura 88.- Simulador de máquina asíncrona. Curvas características (Fuente: Elaboración propia)

Otros estudios pueden realizarse tal como el representado en la figura 89 en el que se analiza el comportamiento (curva de par frente a la velocidad) del motor ante variaciones de tensión y frecuencia (conectado a un variador de frecuencia de control escalar).

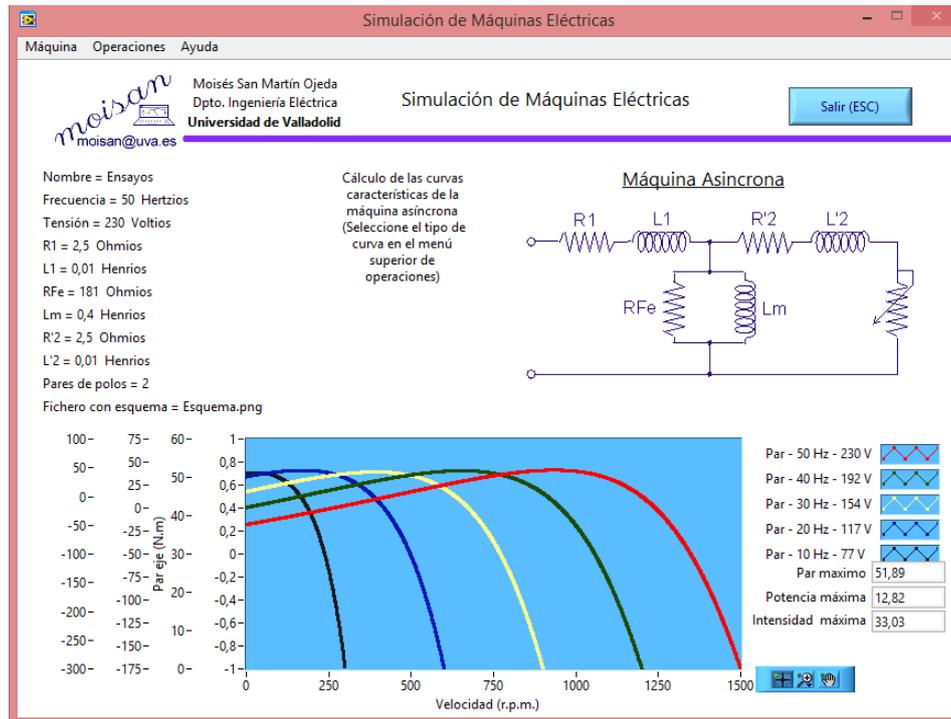


Figura 89.- Simulador de máquina asíncrona. Curvas control escalar (Fuente: Elaboración propia)

Con el mismo simulador se ha obtenido en la figura 90 y de forma simulada, el diagrama de círculo, presentando las dos variantes de circuito equivalente real y aproximado.

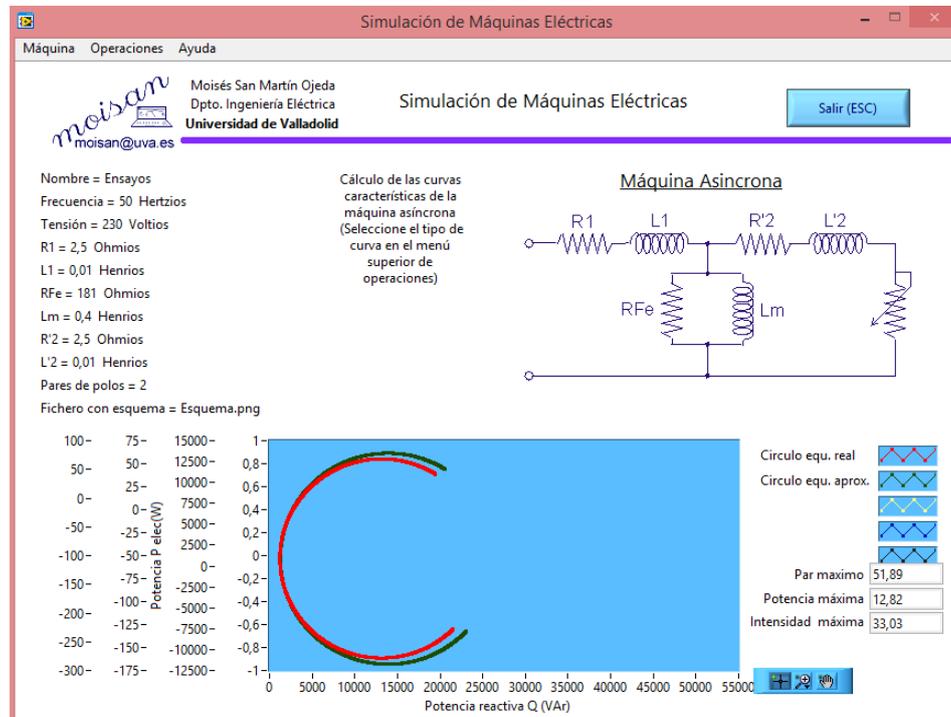


Figura 90.- Simulador de máquina asíncrona. Diagrama del círculo (Fuente: Elaboración propia)

## Simulador de máquina síncrona

Se ha generado un simulador para determinar el comportamiento de una máquina síncrona trifásica. El modelo elegido ha sido el de un circuito simple formado por un generador ideal en serie con una impedancia constante.

El simulador permite visualizar el comportamiento de la máquina síncrona funcionando en modo aislado o conectado a red eléctrica.

El software permite modificar las variables de entrada (principalmente potencias activa y reactiva) y determina la respuesta a la misma. Incluso permite analizar la evolución del funcionamiento de la máquina. Véase en la figura 91, por ejemplo, las curvas en V de la máquina síncrona que muestran la variación de la corriente absorbida frente a la fuerza electromotriz del alternador cuando se modifica la potencia reactiva.

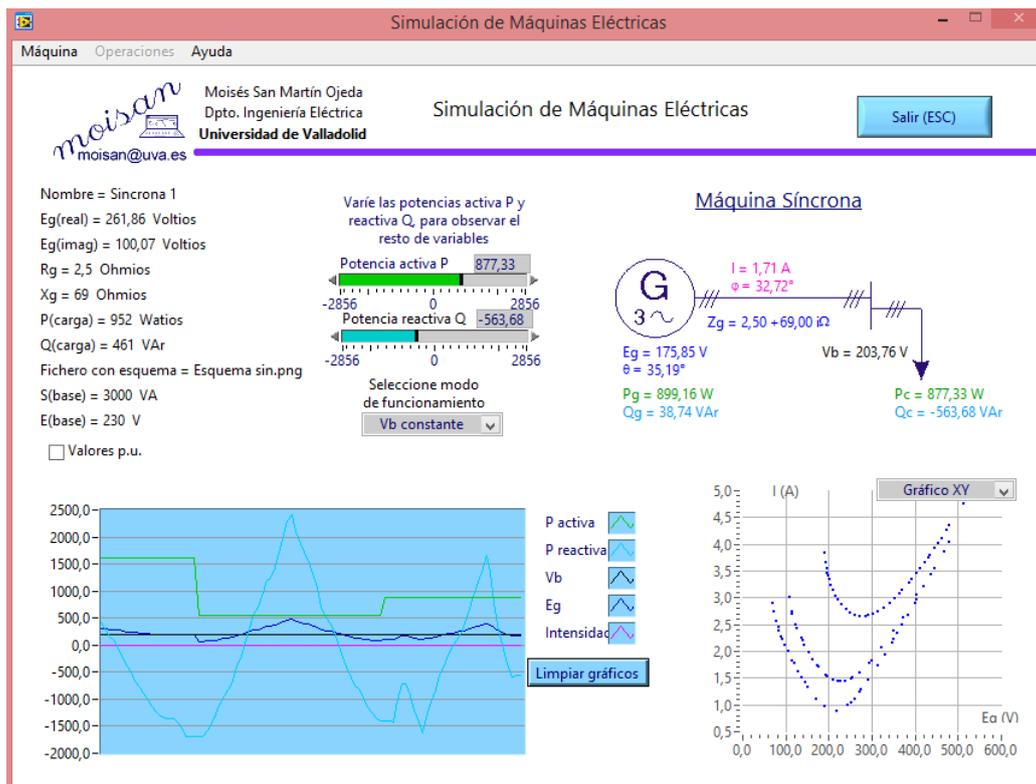


Figura 91.- Simulador de máquina síncrona. Curvas en V (Fuente: Elaboración propia)

Como indica la figura 92 el software permite representar el estado mediante un diagrama fasorial (en la parte izquierda presenta un gráfico de la evolución de las variables):

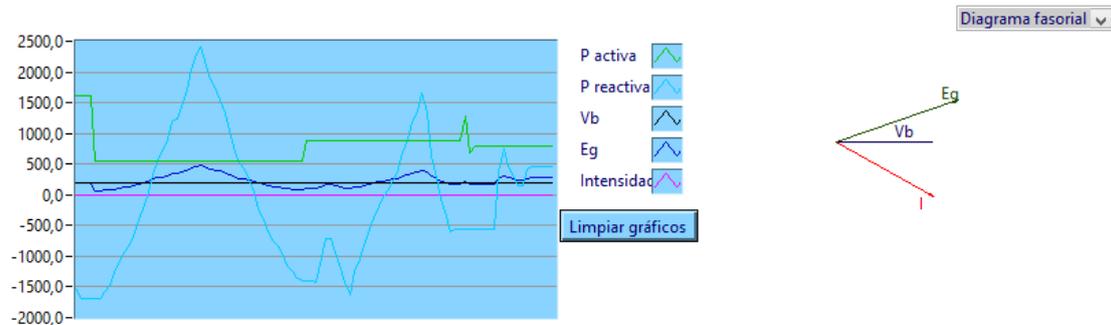


Figura 92.- Simulador máquina síncrona. Diagrama fasorial (Fuente: Elaboración propia)

### Simulador de transitorios eléctricos de primer orden

Para el estudio de los transitorios de primer orden en circuitos eléctricos se ha diseñado un simulador software que analiza los principales fenómenos asociados a los transitorios eléctricos cuando se utilizan elementos lineales (figura 230).

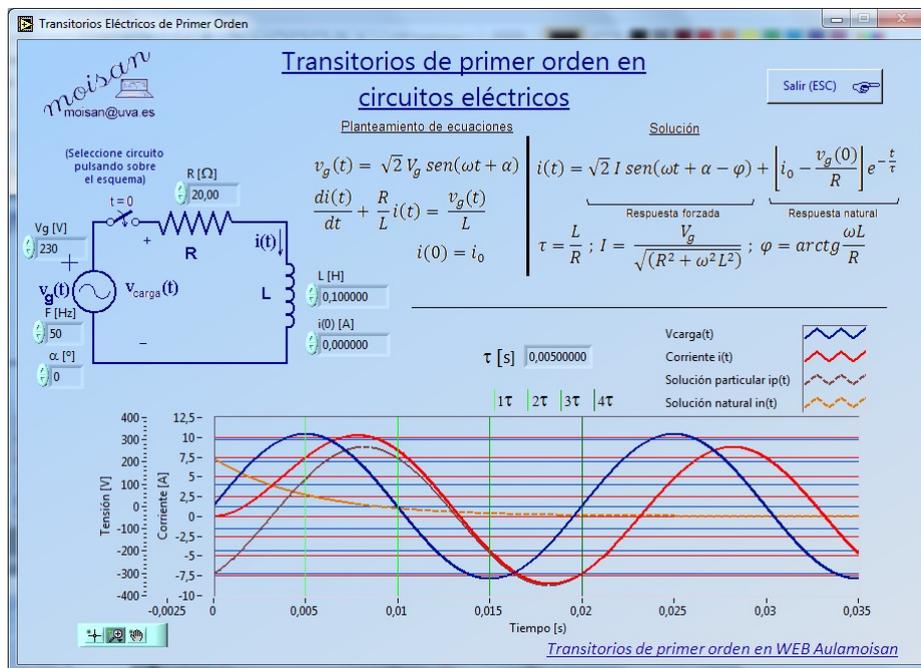


Figura 93.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden (Fuente: Elaboración propia)

El programa desarrollado resuelve la conexión de un generador (en el instante de tiempo  $t = 0$ ) a una carga formada por una resistencia en serie con una autoinducción, o a una resistencia en serie con un condensador.

El generador a conectar puede ser tanto de corriente continua como de corriente alterna.

Para su resolución se plantean las ecuaciones asociadas al fenómeno a analizar, ecuaciones que se representan a continuación para los distintos circuitos objeto de estudio y en las que en todos los casos se ha escogido como incógnita la asociada al elemento de almacenamiento de energía (autoinducción o condensador) (figura 94 a figura 97).

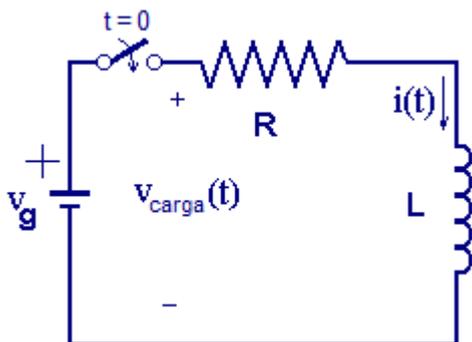


Figura 94.- Análisis del circuito RL en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

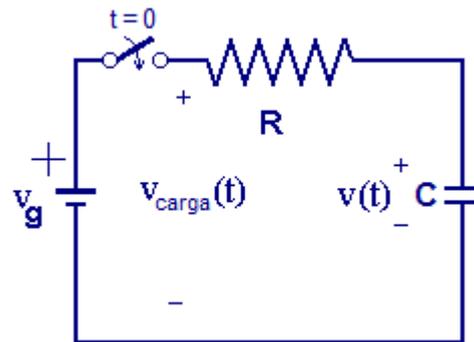


Figura 95.- Análisis del circuito RC en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

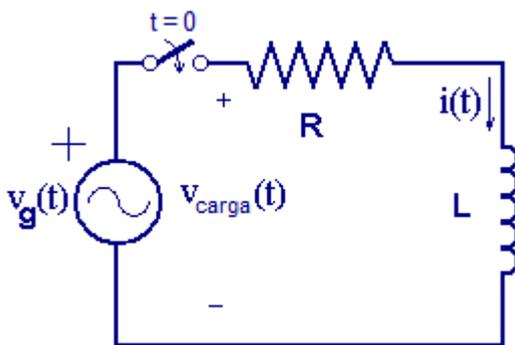


Figura 96.- Análisis del circuito RL en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

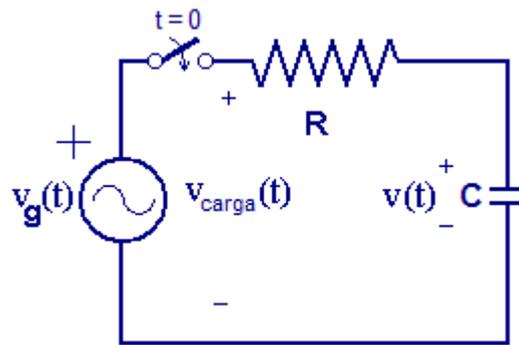


Figura 97.- Análisis del circuito RC en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Una vez planteadas las ecuaciones se resuelven recurriendo a métodos numéricos mediante la utilización del método de resolución de ecuaciones diferenciales de Runge Kutta de cuarto orden.

En la respuesta se caracterizará la constante de tiempo, la respuesta natural y la respuesta particular (véase la figura 98).

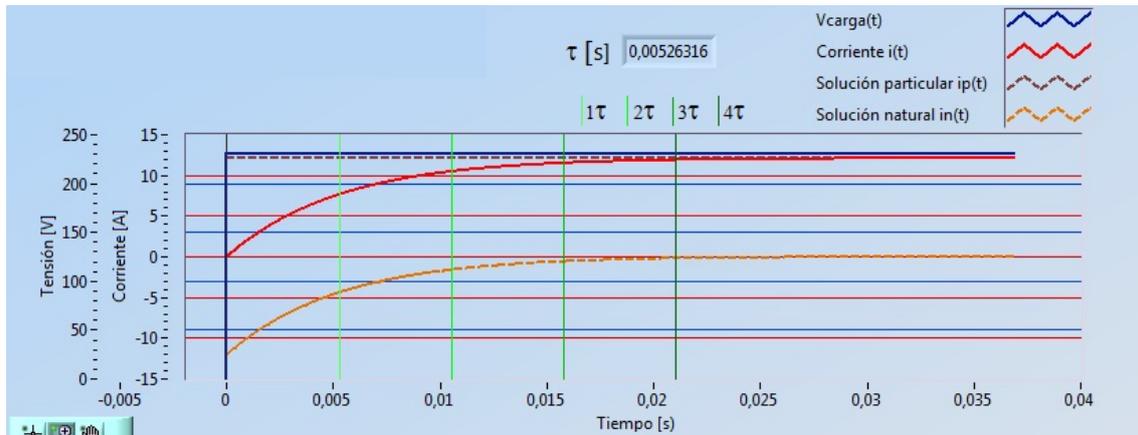


Figura 98.- Transitorios eléctricos de primer orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)

### Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden

Para el estudio de los transitorios de segundo orden en circuitos eléctricos se ha diseñado un simulador software que analiza los principales fenómenos asociados a los transitorios eléctricos (figura 99).

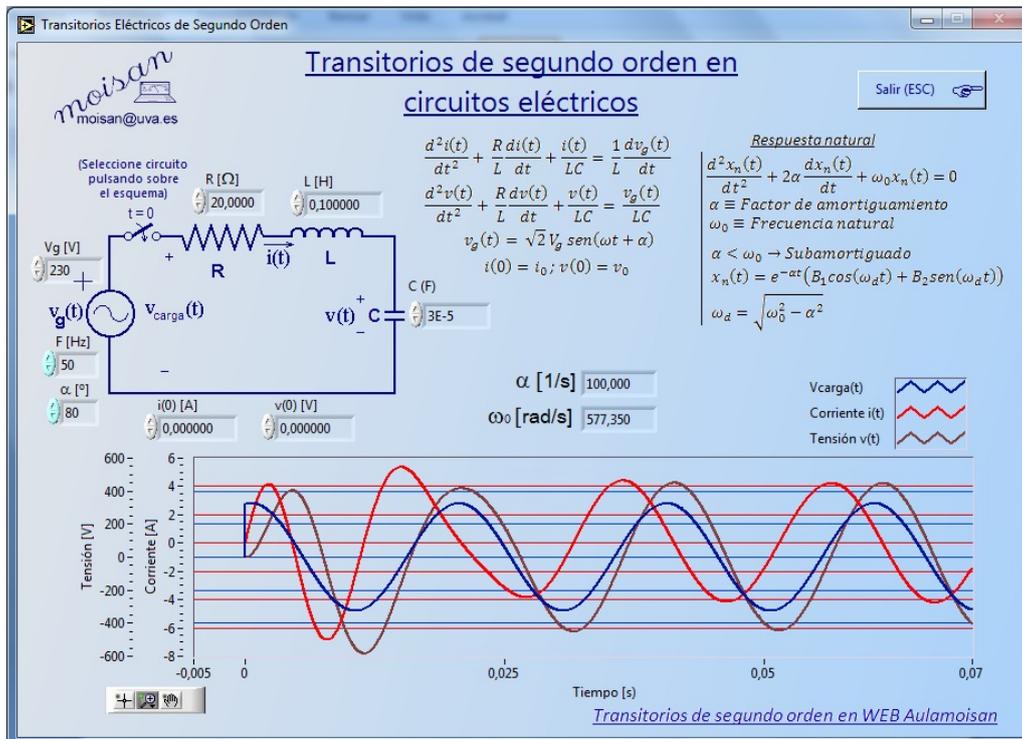


Figura 99.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden (Fuente: Elaboración propia)

El programa desarrollado resuelve la conexión de un generador (en el instante de tiempo  $t = 0$ ) a una carga eléctrica. La carga estará formada por una resistencia en

serie con una autoinducción y un condensador también conectados en serie; y también por una resistencia en serie con una autoinducción y un condensador, estos dos últimos conectados en paralelo.

El generador a conectar puede ser tanto de corriente continua como de corriente alterna.

Para su resolución se plantean las ecuaciones asociadas al fenómeno a analizar, ecuaciones que se representan a continuación para los distintos circuitos objeto de estudio y en las que en todos los casos se ha escogido como incógnita la asociada al elemento de almacenamiento de energía, la corriente en el caso de la autoinducción y la tensión en caso del condensador (figura 100 a figura 103).

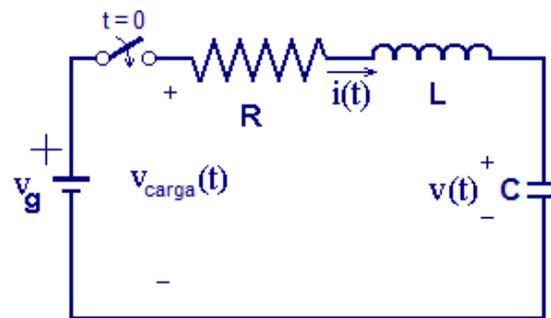


Figura 100.- Análisis del circuito RLC serie en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

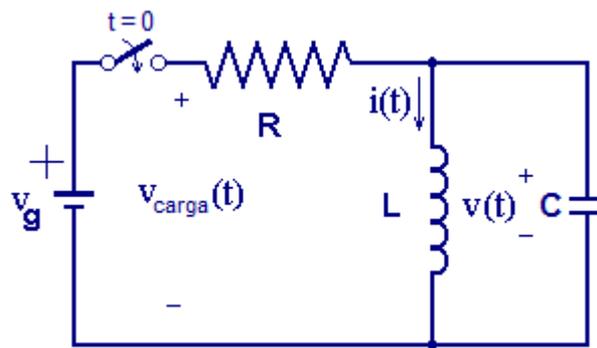


Figura 101.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

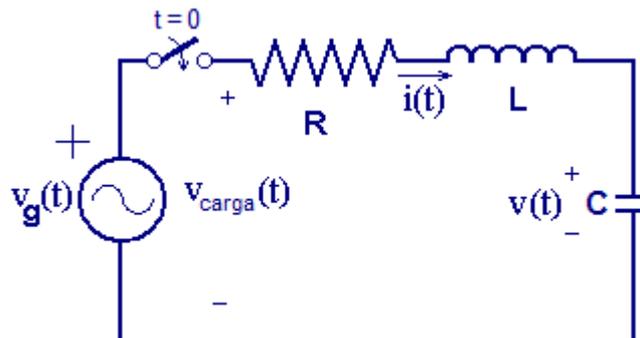


Figura 102.- Análisis del circuito RLC serie en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

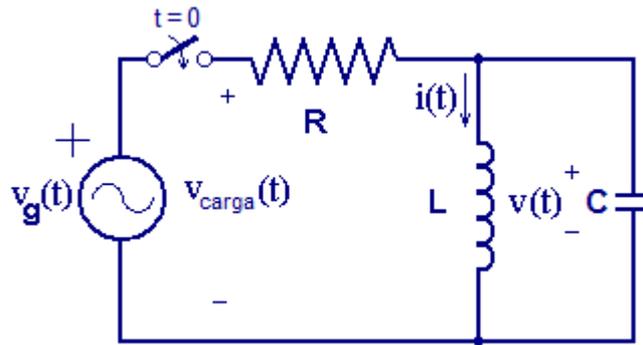


Figura 103.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Una vez planteadas las ecuaciones se resuelven recurriendo a métodos numéricos mediante la utilización del método de resolución de ecuaciones diferenciales de Runge Kutta de cuarto orden.

En la gráfica se representará la tensión de la carga, así como la corriente de la autoinducción y la tensión del condensador.

La respuesta completa estará compuesta por dos componentes: la respuesta natural y la respuesta forzada (del mismo tipo que la señal de la fuente de tensión).

Se caracteriza la respuesta natural como solución a la ecuación homogénea, en la que se define el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural (figura 104).

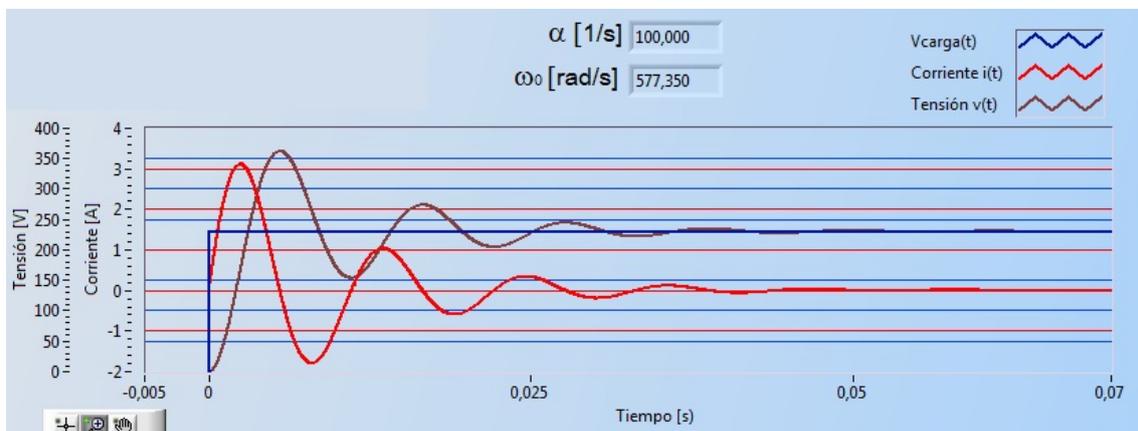


Figura 104.- Transitorios eléctricos de segundo orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)

La resolución de la ecuación da origen a tres casos diferentes respuesta natural: Sobreamortiguado, Subamortiguado y Críticamente amortiguado.

### 3.4- Herramienta completa desarrollada

Se presenta, a modo de resumen, la herramienta completa desarrollada, detallando los dispositivos equipos físicos y de software que se han utilizado en el desarrollo práctico de esta tesis (figura 105).

Se debe indicar que el apartado de Máquinas Eléctricas corresponde a las distintas Máquinas objeto de ensayo con la plataforma desarrollada.

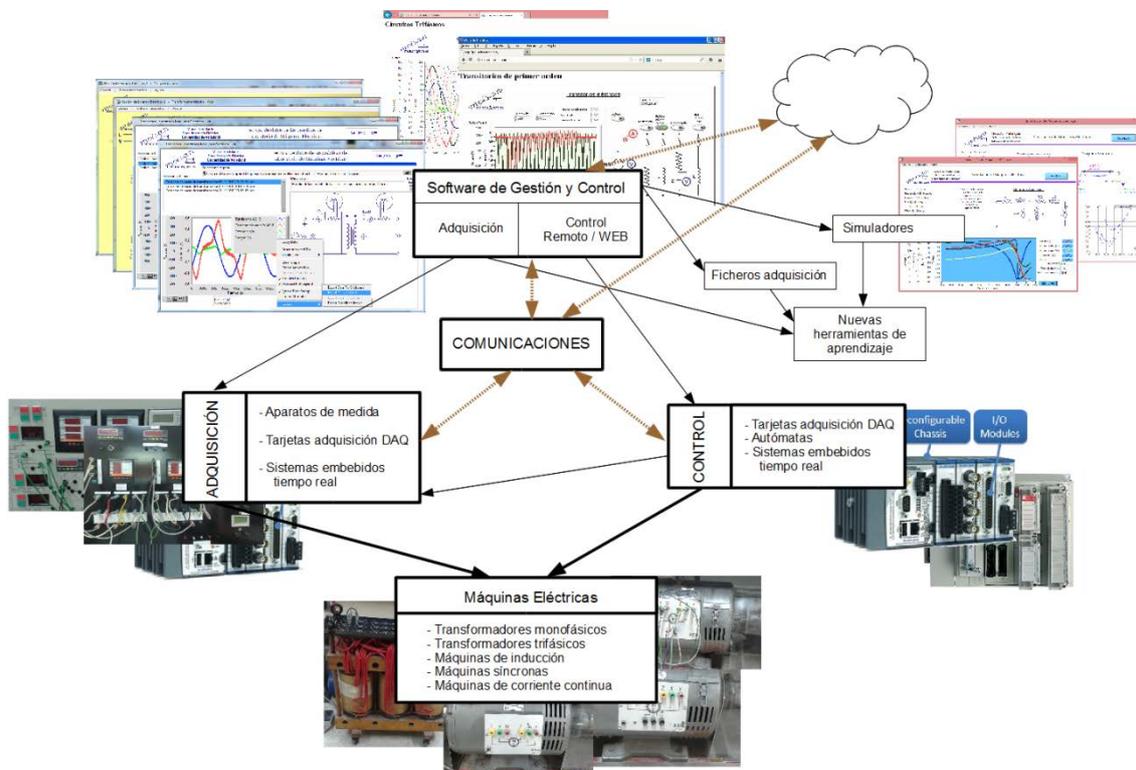


Figura 105.- Herramienta completa desarrollada (Fuente: Elaboración propia)



### 3.5- Discusión de resultados: Desarrollo de la Herramienta

En los apartados anteriores se ha realizado una presentación exhaustiva de los distintos elementos del sistema de gestión y control desarrollado en esta tesis, incluyendo tanto dispositivos físicos de adquisición y control utilizados como el software desarrollado.

Para el desarrollo de la herramienta, en un primer paso ha sido necesaria la elección de los dispositivos físicos de adquisición. En un primer momento se comenzaron a utilizar aparatos de medida habituales en un laboratorio de máquinas eléctricas (voltímetros, amperímetros, tarjetas de adquisición de datos, etc.), incluso algunos de ellos diseñados en el propio laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Valladolid.

Posteriormente se decidió para la herramienta la utilización de equipos de medidas industriales, que permitían por una parte su implementación en el entorno industrial y, por otra, facilitaban su explotación y mantenimiento, por ejemplo, en el caso de ser necesario ser sustituido por otro de similares características.

A estos equipos de medida industriales se les incorporó módulos de comunicaciones que permitieran la interconexión con otros equipos y con software de gestión. Entre los diferentes protocolos que incorporaban estos módulos de comunicaciones se eligió para la plataforma el protocolo ModBUS, por estar ampliamente extendido en el ámbito industrial, y ser, de hecho, un protocolo libre y abierto (no propietario).

En los inicios de los trabajos desarrollados en esta tesis existía el protocolo ModBUS original que se implementaba sobre enlace físico Serie. La distancia entre los equipos mediante el enlace físico Serie no puede superar los 100 metros. Posteriormente este protocolo ModBUS se implementó en el enlace físico Ethernet. En un primer momento era el mismo protocolo ModBUS Serie implementado sobre red Ethernet. De esta manera, ya no existía la limitación de la distancia máxima entre equipos, aparte de ir soportado por un enlace físico ampliamente utilizado en otro tipo de comunicaciones. En la herramienta desarrollada se han incorporado convertidores de protocolo ModBUS Serie/Ethernet con el fin de permitir la utilización tanto de equipos Serie como de equipos Ethernet.

En la actualidad se ha creado un protocolo específico ModBUS TCP que se implementa exclusivamente sobre enlace físico Ethernet y que incorpora también la sintaxis específica también de Ethernet, lo que permite aprovechar toda su potencialidad (por ejemplo, la conexión ilimitada de equipos al mismo bus de comunicaciones). La

herramienta desarrollada también implementa este tipo de comunicaciones ModBUS TCP.

Para la herramienta desarrollada se pueden utilizar aparatos de medida de diferentes fabricantes siempre que incorporen alguno de los protocolos ModBUS mencionados. En particular se han usado equipos de la empresa Circutor y de la empresa National Instruments.

En un segundo paso se eligieron dispositivos físicos de control que permitieran la gestión y el control de los ensayos de las máquinas eléctricas. Entendemos la gestión como la posibilidad de configurar diferentes esquemas de montaje. El control consiste en la posibilidad de conectar y desconectar tanto cargas como máquinas eléctricas.

Los dispositivos de control elegidos en un primer momento fueron principalmente autómatas programables, a los que se incorporaron tarjetas PCMCIA de comunicaciones ModBUS. En la herramienta desarrollada se eligieron autómatas Modicom Telemecánica, si bien cualquier otro podría haberse elegido siempre que permita la incorporación del mencionado protocolo ModBUS.

En los últimos años se han ido incorporando a la industria otros dispositivos de control, tales como Controladores en Tiempo Real, que disponen de muchas más funcionalidades que los autómatas. Por ejemplo, los tiempos de respuesta son mucho menores, permiten el rápido prototipado, incorporan múltiples protocolos de comunicaciones (Control WEB, almacenamiento WebDAV, etc.), permiten el procesado de la señal, etc.

Estos Controladores en Tiempo Real (del fabricante National Instruments) también se han incorporado a la herramienta desarrollada con el objeto de aumentar la funcionalidad del sistema.

Para conseguir la gestión de los ensayos, es decir, la capacidad de configurar diferentes esquemas de montaje, y el control de la conexión de cargas y máquinas eléctricas se hacía necesario un elemento software que realice la integración de los dispositivos físicos de adquisición y los dispositivos físicos de control.

Se han analizado varios software para realizar esta misión (entre ellos los antiguos lenguajes Basic y dBaseIII, y Matlab) optando por el lenguaje LabVIEW, del fabricante National Instruments, por la facilidad de integrar los diferentes dispositivos, así como la capacidad de generar sistemas SCADA con el mismo.

Otra de las características que se han considerado para la elección del software ha sido la de que tenga la capacidad de generar simuladores. Según esta funcionalidad el software Matlab (con sus elementos Toolbox) lo consideramos más idóneo para la



creación de simuladores, si bien se optó por el lenguaje LabVIEW para generar todo el software con un único lenguaje que simplificara el proceso de desarrollo. Además, LabVIEW permite el tratamiento directo (y su interpretación) de los ficheros de programa Matlab.

El lenguaje LabVIEW elegido ha permitido incorporar de manera natural, y sin incrementar la dificultad en la programación, diferentes niveles de comunicaciones entre los que destacamos el control vía WEB, el acceso a los datos y a la herramienta desde dispositivos móviles (teléfonos, tablets, etc.), y almacenamiento de datos en la nube.

La integración de todos los elementos que componen esta herramienta se ha hecho de una forma natural mediante la implantación de protocolos comunes de comunicaciones.

En el proceso de integración de elementos se han tenido que desechar algunos de ellos por no disponer de protocolos abiertos y libres como los utilizados en esta tesis. Esto es debido a que diversos fabricantes, a pesar de tener productos de alta calidad, sus protocolos son propietarios y específicos no permitiendo la integración con productos de otros fabricantes.

Como conclusiones de este capítulo señalamos que, la herramienta considerada incorpora las tendencias extraídas en el análisis del estado de la técnica expuestas en el capítulo anterior, en particular las siguientes:

- Incorpora características de simulación.
- Herramienta abierta para la introducción de nuevos modelos, y que permite la comunicación con otros software de simulación.
- Permite implementar la simulación en tiempo real.
- Incorpora diferentes niveles de comunicaciones.
- Permite la monitorización de variables eléctricas.
- Constituye una nueva herramienta de aprendizaje online.

Aparte de las tendencias marcadas por el estado del arte, la herramienta desarrollada incorpora las siguientes características:

- Multimáquina, que permite ser implementado en transformadores eléctricos, máquinas eléctricas de inducción, máquinas eléctricas síncronas y máquinas de corriente continua.
- Multidispositivo, que posibilita la utilización de diferentes dispositivos físicos de adquisición y control.
- Realiza un tratamiento sistemáticos de los datos con lo que se obtiene una base de información de la máquina objeto de análisis.



- Capaz de crear y validar simuladores, a partir de ficheros de los datos adquiridos.
- Abierto y configurable para adaptar el sistema al estudio de nuevos fenómenos eléctricos.

Una vez presentada de manera exhaustiva la herramienta de desarrollo se utilizará para la “*gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos*”. En el siguiente capítulo se muestra la utilización de la herramienta desarrollada en una serie de aplicaciones prácticas.



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



# Capítulo 4

## Aplicación de la herramienta desarrollada



## Capítulo 4.- Aplicación de la herramienta desarrollada

### 4.1- Introducción

En este capítulo se detallarán una serie de aplicaciones realizadas con la herramienta desarrollada expuesta en el capítulo anterior. Se comenzará con aplicaciones prácticas desarrolladas íntegramente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Valladolid, y al final del capítulo se mostrarán una serie de aplicaciones desarrolladas íntegramente en el ámbito industrial a partir de los elementos utilizados en la elaboración de esta tesis.

### 4.2- Aplicación herramienta a transformadores monofásicos

#### 4.2.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar

A continuación describiremos la constitución y el principio de funcionamiento de un transformador eléctrico monofásico. La figura 106 representa un transformador monofásico compuesto por dos devanados sobre un núcleo compuesto por chapas magnéticas.

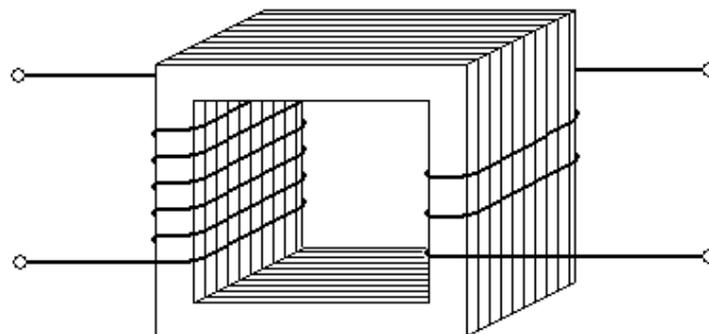


Figura 106.- Representación de transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

Vemos en primer lugar que el transformador es una máquina estática, dado que no lleva partes móviles, por lo que no va a tener pérdidas mecánicas debidas a rozamientos, etc., lo que va a permitir disponer de transformadores con rendimientos superiores al 90%.



A uno de los dos bobinados se le denomina devanado primario y al otro devanado secundario (análogo al devanado inductor e inducido respectivamente del resto de las máquinas eléctricas). El núcleo magnético está formado por chapas aisladas unas de otras con el fin de reducir las pérdidas por *corrientes de Foucault*.

El transformador eléctrico se basa en las *leyes de Ampere y Faraday*. La ley de Ampere nos dice que toda corriente eléctrica va a producir un campo magnético. Al aplicar una tensión al devanado primario, se va a establecer una corriente eléctrica, que va a ser el origen de un campo magnético (inductor). Ese flujo magnético estará canalizado fundamentalmente por el núcleo magnético, con lo que será abarcado por el otro devanado (devanado secundario). En el devanado secundario se inducirá una fuerza electromotriz dada por la ley de Faraday (1):

$$\text{F.e.m.} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

Dado que la tensión aplicada es alterna, también lo será el flujo producido y abarcado por el devanado secundario, por lo que tendremos una variación temporal del mismo, es decir una fuerza electromotriz. Las fuerzas electromotrices de cada uno de los devanados serán proporcionales al número de espiras de los devanados, de tal manera que se define la relación de transformación “ $r_t$ ” (2) como la relación de fuerzas electromotrices y se cumple que:

$$r_t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

Recapitulando, vemos que si se aplica una tensión al devanado primario se inducirá una fuerza electromotriz en el devanado secundario con lo que dispondremos de una tensión distinta en dicho devanado. Dado que la relación entre tensiones es la relación de transformación, se puede construir transformadores con cualquier relación de transformación, sin más que asignar un número adecuado de espiras en cada devanado.

La relación de transformación ( $r_t$ ) es el parámetro fundamental de los transformadores.

Para el transformador ideal (sin pérdidas), se cumple (3) que (figura 107):

$$\frac{V_1}{V_2} = r_t \quad (3)$$

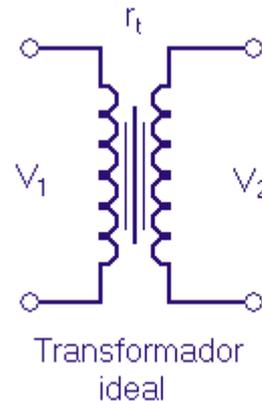


Figura 107.- Modelo de transformador ideal (Fuente: Elaboración propia)

Para el estudio y análisis del transformador eléctrico se recurre a modelos. Un modelo es una simplificación del componente eléctrico. Por ejemplo, el transformador ideal es un modelo simplificado del transformador real en el que no se han considerado ni las pérdidas de potencia, ni las pérdidas de flujo.

Otro modelo del transformador es el formado por dos bobinas acopladas. En este modelo tampoco se consideran las pérdidas de potencia, pero si se tiene en cuenta las pérdidas de flujo magnético. Los parámetros del modelo son las dos autoinducciones  $L$  y el coeficiente de inductancia mutua  $M$ .

En este modelo, las ecuaciones para las tensiones e intensidades (según las referencias de la figura 108) que definen el comportamiento del transformador son las siguientes (4 y 5):

$$V_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \quad (4)$$

$$V_2 = L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} \quad (5)$$

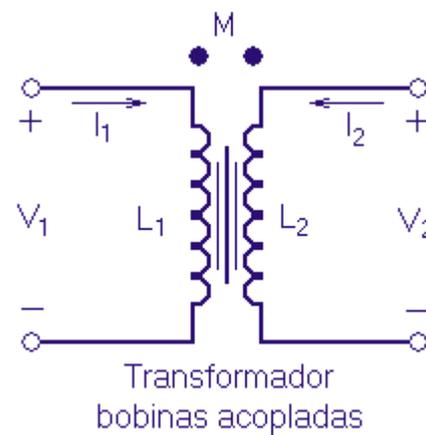


Figura 108.- Modelo bobinas acopladas (Fuente: Elaboración propia)

El modelo usado habitualmente en corriente alterna tiene en cuenta las pérdidas de potencia en los devanados y en el núcleo magnético (hierro), y las pérdidas de dispersión de flujo.

En este modelo, los parámetros del secundario son traspasados al primario (reducción al primario) que consiste en poner otros elementos en el primario que producen el mismo efecto que los elementos originales en el secundario.

Se debe tener presente en todo momento que este modelo es válido únicamente en corriente alterna.

La figura 109 representa el esquema del circuito equivalente donde tenemos desglosado las pérdidas de potencia (en forma de resistencia) en los devanados y en el hierro, y la dispersión de flujo (en forma de reactancia).

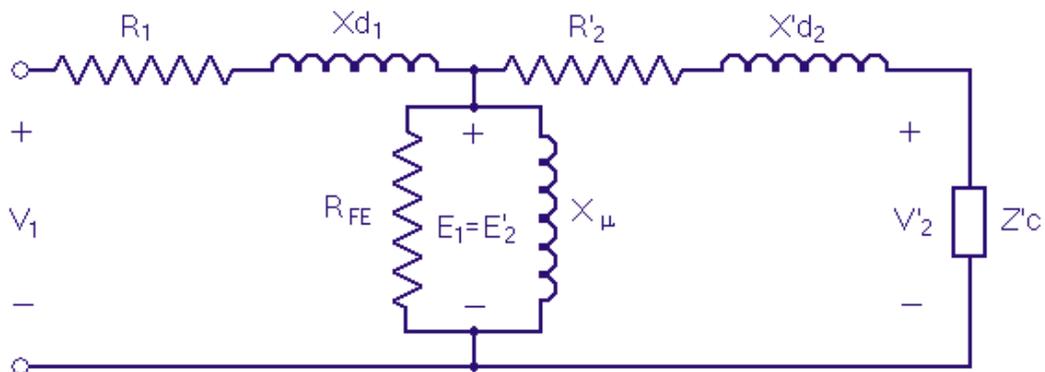


Figura 109.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Con el fin de simplificar los cálculos, se acostumbra a trasladar la resistencia del hierro  $R_{FE}$  (que representa las pérdidas del hierro) y la reactancia magnetizante  $X_{\mu}$  (que caracteriza al flujo útil) al principio del circuito, como se puede ver en la figura 110.

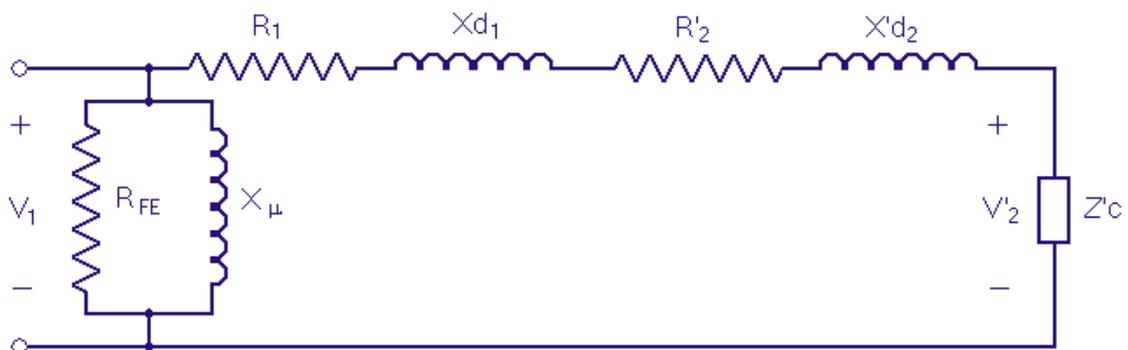


Figura 110.- Modelo aproximado de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.2.- Transformador monofásico ensayado

Se presenta, a continuación la figura 111 con el transformador ensayado, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3 KVA
- Tensión nominal primario: 220 V.
- Tensión nominal secundario: 132 V.



**Figura 111.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)**

Una vez conectado el transformador monofásico al sistema de gestión y control se procederá a la realización de una serie de ensayos que se detallan a continuación. La propia plataforma va a permitir la conexión y desconexión de los diferentes ensayos sin necesidad de intervención en los montajes de los esquemas, mediante los controles habilitados en la misma (véase señalados en la siguiente figura).

La representación de los distintos montajes se hará a partir de los datos almacenados por el sistema de gestión y control (figura 112).

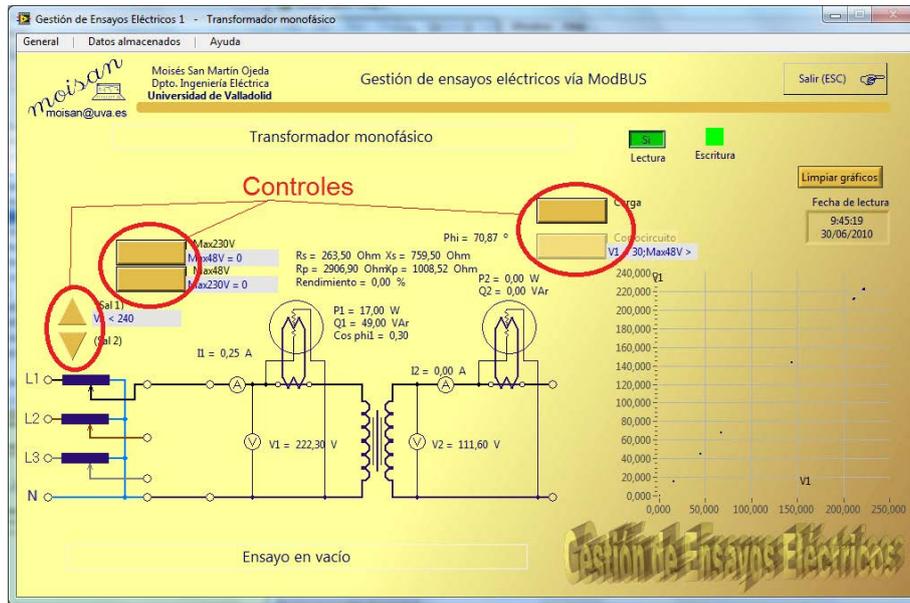


Figura 112.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.3.- Ensayos y determinación del modelo

##### Ensayo en vacío del transformador monofásico

Este ensayo consiste en dejar abierto el secundario del transformador (sin conectar carga alguna). Se determinará la relación de transformación así como los parámetros del circuito equivalente de la rama paralelo ( $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ ). El ensayo se ha realizado según su norma aplicable (UNE EN 60076-1 [213]). La figura 113 representa el ensayo de vacío (un solo punto de funcionamiento):

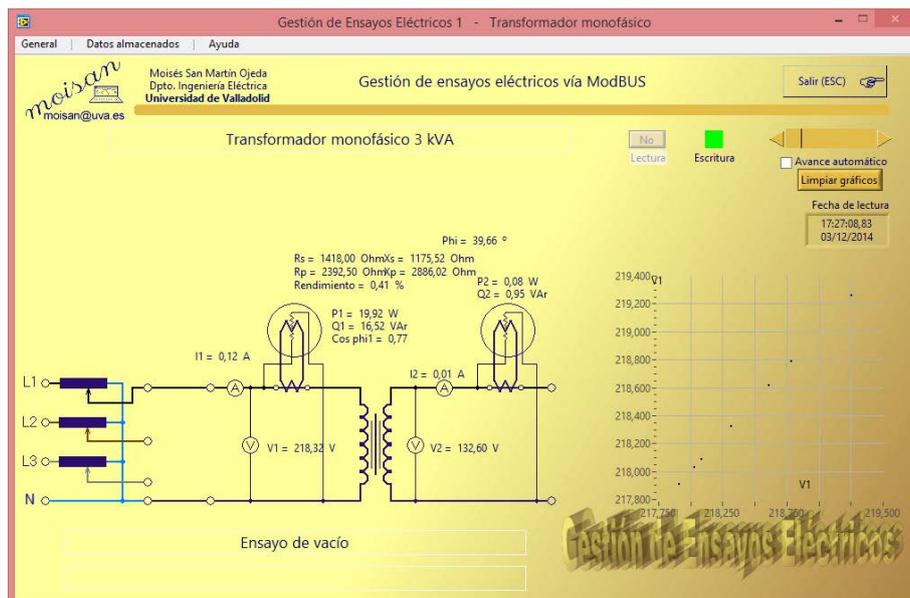


Figura 113.- Ensayo en vacío del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

El propio sistema de gestión y control permite la realización de diferentes cálculos permitiendo obtener diferentes variables que denominamos virtuales. Para este ensayo, el propio sistema determina los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama paralelo (véase la figura 114).

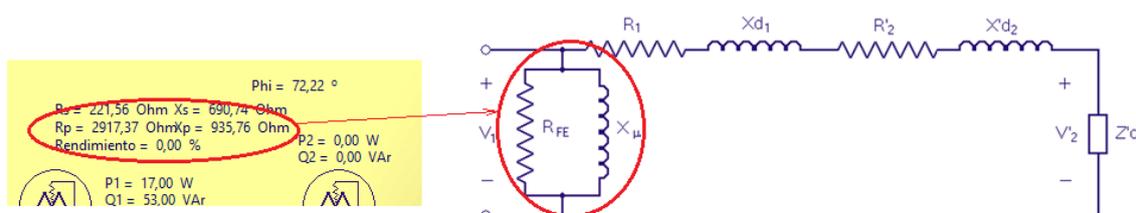


Figura 114.- Cálculo de los parámetros de la rama paralelo (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en vacío, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de tensión aplicada.

Se representa en la tabla 4 los valores obtenidos del ensayo en vacío. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ .

#	V1	I1	P1	Q1	cos phi1	V2	I2	P2	Q2	Fecha	Hora	Rfe	Xn
1	218,09	0,119	19,90	16,50	0,77	132,60	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:36	2403,30	2391,10
2	217,27	0,119	19,80	16,56	0,77	132,01	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:37	2400,50	2383,93
3	218,09	0,118	19,89	16,49	0,77	132,54	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:38	2403,30	2391,10
4	217,56	0,119	19,84	16,58	0,77	132,19	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:52	2403,71	2386,69
5	218,38	0,119	19,94	16,55	0,77	132,66	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:53	2406,49	2392,65
6	218,96	0,119	20,11	16,51	0,77	133,07	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:26:54	2403,62	2385,25
7	219,02	0,119	20,09	16,55	0,77	133,07	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:00	2407,40	2387,74
8	217,91	0,118	19,85	16,51	0,77	132,36	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:02	2404,55	2393,39
9	219,02	0,119	20,10	16,51	0,77	133,07	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:06	2404,28	2386,56
10	219,08	0,119	20,10	16,53	0,77	133,07	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:16	2404,94	2389,05
11	218,55	0,119	19,95	16,52	0,77	132,71	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:23	2405,35	2394,19
12	217,68	0,119	19,82	16,56	0,77	132,25	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:24	2405,03	2390,53
13	219,08	0,119	20,09	16,52	0,77	133,01	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:27:27	2404,94	2390,24
...													
...													
...													
94	219,61	0,119	20,17	16,57	0,77	133,24	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:29:54	2410,64	2392,07
95	218,85	0,119	19,98	16,57	0,77	132,83	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:29:55	2411,67	2398,14
96	218,03	0,119	19,88	16,62	0,77	132,30	0,00	0,00	0,00	03/12/2014	17:29:56	2408,90	2392,19

Tabla 4.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador

Con estos puntos es posible realizar un análisis estadístico para determinar los valores medios, varianzas y desviaciones típicas. Estos cálculos pueden ser realizados con la misma herramienta de desarrollo LabVIEW [200] y con Statgraphics [214].

A título de ejemplo se muestra en las siguientes figuras el estudio estadístico obtenido en Statgraphics de la resistencia  $R_{FE}$ .

### Ajuste de Datos No Censurados - Rfe

Datos/Variable: Rfe

96 valores con rango desde 2400,5 a 2413,66

Distribuciones Ajustadas

Normal
media = 2407,06
desviación estándar = 3,00899

Figura 115.- Media y desviación de Rfe (Fuente: Elaboración propia)

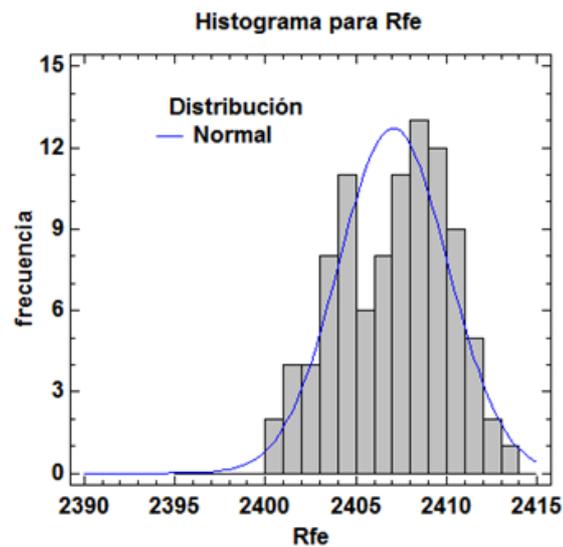


Figura 116.- Histograma de Rfe (Fuente: Elaboración propia)

Se ha realizado una prueba de normalidad Chi-Cuadrado [216] obteniéndose un p-valor de 0,140151 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $R_{FE}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Además se ha realizado una prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado [216] para determinar si  $R_{FE}$  puede modelarse adecuadamente con una distribución normal obteniéndose un p-valor de 0,287665 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $R_{FE}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

A continuación se muestra en las siguientes figuras el estudio estadístico obtenido en Statgraphics de la reactancia  $X_{\mu}$ .

### Ajuste de Datos No Censurados - $X_n$

Datos/Variable:  $X_n$

96 valores con rango desde 2379,58 a 2398,14

Distribuciones Ajustadas

Normal
media = 2391,43
desviación estándar = 4,28511

Figura 117.- Media y desviación de  $X_\mu$  (Fuente: Elaboración propia)

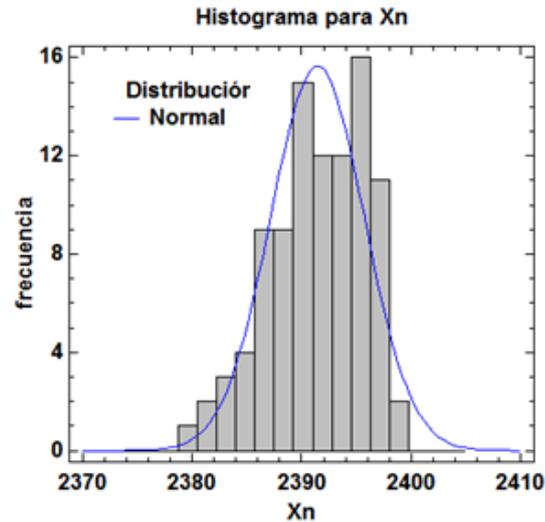


Figura 118.- Histograma de  $X_\mu$  (Fuente: Elaboración propia)

Se ha realizado una prueba de normalidad Chi-Cuadrado [216] obteniéndose un p-valor de 0,31791 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $X_\mu$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Además se ha realizado una prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado [216] para determinar si  $X_\mu$  puede modelarse adecuadamente con una distribución normal obteniéndose un p-valor de 0,129666 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $X_\mu$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Por lo tanto se obtiene (adoptando valores medios) un valor de resistencia de pérdidas en el hierro  $R_{FE} = 2.407,06 \Omega$  y un valor reactancia magnetizante característica del flujo útil  $X_\mu = 2.391,43 \Omega$ .

### Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico

Este ensayo consiste en cortocircuitar el secundario del transformador aplicando una tensión inferior en el primario de tal manera que circule por sus devanados la corriente nominal. Se determinará la tensión de cortocircuito, así como los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie. El ensayo se ha realizado según su norma aplicable (UNE EN 60076-1 [213]). La figura 119 representa el ensayo de cortocircuito (un solo punto de funcionamiento):

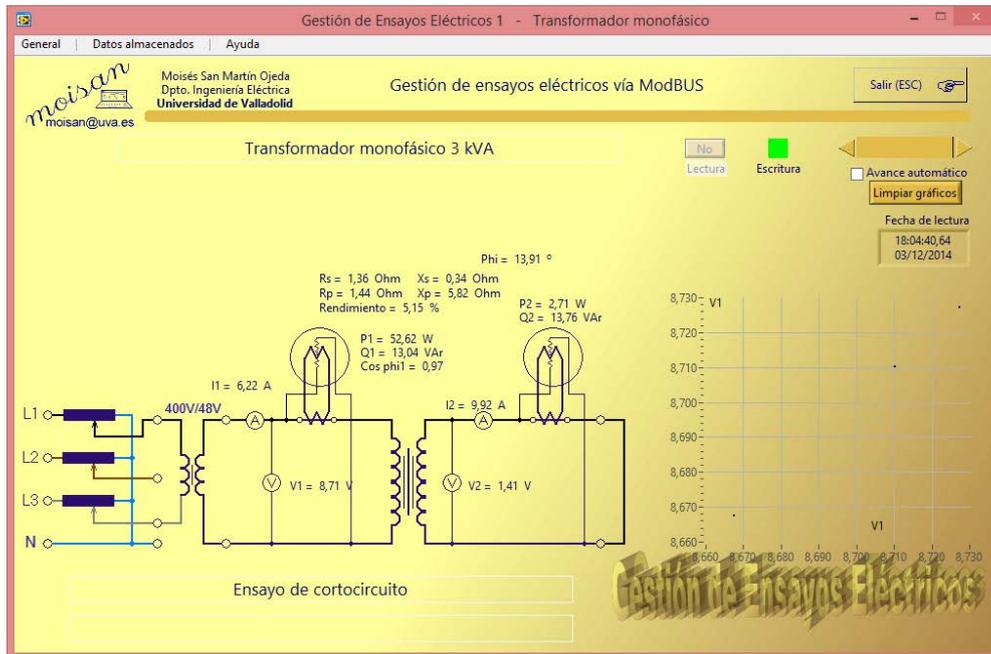


Figura 119.- Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

El propio sistema de gestión y control permite la realización de diferentes cálculos permitiendo obtener diferentes variables que denominamos virtuales. Para este ensayo, el propio sistema determina los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie (véase la figura 120).

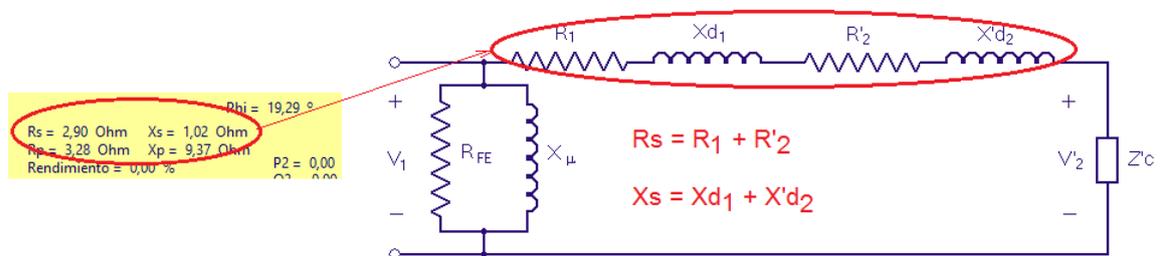


Figura 120.- Cálculo de los parámetros de la rama serie (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en cortocircuito, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de corriente establecida en los devanados.

Se representa en la tabla 5 los valores obtenidos en el ensayo de cortocircuito. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Para ello se deberá tener en cuenta que las potencias activa absorbida corresponde a tres veces las consumidas por las resistencias ( $R_{cc} = R_1 + R'_2$ ) y la potencia reactiva absorbida a las reactancias ( $X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}$ ).

#	V1	I1	P1	Q1	cos phi1	V2	I2	P2	Q2	Fecha	Hora	Rcc	Xcc
1	8,73	6,240	52,89	12,99	0,97	0,00	9,95	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:13	1,358	0,334
2	8,70	6,212	52,43	13,14	0,97	0,00	9,90	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:13	1,359	0,341
3	8,72	6,243	52,84	13,05	0,97	0,00	9,95	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:14	1,356	0,335
4	8,74	6,245	52,95	13,14	0,97	0,00	9,95	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:14	1,358	0,337
5	8,67	6,202	52,17	12,99	0,97	0,00	9,88	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:15	1,356	0,338
6	8,73	6,227	52,74	13,09	0,97	0,00	9,92	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:15	1,360	0,338
7	8,68	6,199	52,23	13,06	0,97	0,00	9,88	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:16	1,359	0,340
8	8,72	6,235	52,78	13,04	0,97	0,00	9,94	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:17	1,357	0,335
9	8,73	6,241	52,89	13,02	0,97	0,00	9,95	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:17	1,358	0,334
10	8,67	6,204	52,20	12,90	0,97	0,00	9,88	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:18	1,356	0,335
11	8,70	6,226	52,58	13,04	0,97	0,00	9,92	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:18	1,357	0,336
12	8,68	6,190	52,13	12,94	0,97	0,00	9,86	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:19	1,360	0,338
13	8,74	6,241	52,95	13,02	0,97	0,00	9,95	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:19	1,359	0,334
14	8,73	6,234	52,81	13,09	0,97	0,00	9,94	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:20	1,359	0,337
15	8,69	6,222	52,48	13,08	0,97	0,00	9,91	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:20	1,356	0,338
16	8,73	6,235	52,85	12,98	0,97	0,00	9,93	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:21	1,359	0,334
17	8,67	6,189	52,05	13,00	0,97	0,00	9,86	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:21	1,359	0,339
18	8,67	6,200	52,15	12,97	0,97	0,00	9,88	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:22	1,357	0,337
19	8,70	6,212	52,47	12,99	0,97	0,00	9,90	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:23	1,360	0,337
20	8,70	6,222	52,58	12,92	0,97	0,00	9,91	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:23	1,358	0,334
21	8,73	6,230	52,83	12,89	0,97	0,00	9,93	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:24	1,361	0,332
22	8,67	6,188	52,06	12,90	0,97	0,00	9,86	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:24	1,360	0,337
23	8,70	6,215	52,48	13,03	0,97	0,00	9,90	0,00	0,00	03/12/2014	18:03:25	1,359	0,337
...													
...													
...													
158	8,67	6,202	52,15	13,04	0,97	0,00	9,88	0,00	0,00	03/12/2014	18:04:39	1,356	0,339
159	8,67	6,210	52,20	13,10	0,97	0,00	9,89	0,00	0,00	03/12/2014	18:04:40	1,354	0,340
160	8,71	6,224	52,62	13,04	0,97	0,00	9,92	0,00	0,00	03/12/2014	18:04:40	1,358	0,336

Tabla 5.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito

Con estos puntos es posible realizar un análisis estadístico para determinar los valores medios, varianzas y desviaciones típicas. Estos cálculos pueden ser realizados con la misma herramienta de desarrollo LabVIEW [200] y con Statgraphics [214].

A título de ejemplo se muestra en las siguientes figuras el estudio estadístico de la resistencia  $R_{cc}$ .

**Ajuste de Datos No Censurados - Rcc**

Datos/Variable: Rcc

160 valores con rango desde 1,35296 a 1,36186

Distribuciones Ajustadas

Normal
media = 1,35704
desviación estándar = 0,00183096

Figura 121.- Media y desviación de Rcc (Fuente: Elaboración propia)

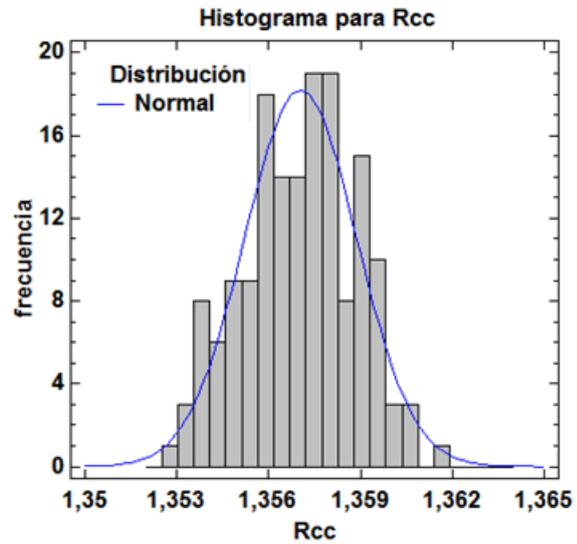


Figura 122.- Histograma de Rcc (Fuente: Elaboración propia)

Se ha realizado una prueba de normalidad Chi-Cuadrado [216] obteniéndose un p-valor de 0,334303 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $R_{cc}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Además se ha realizado una prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado [216] para determinar si  $R_{cc}$  puede modelarse adecuadamente con una distribución normal obteniéndose un p-valor de 0,287665 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $R_{cc}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

A continuación se muestra en las siguientes figuras el estudio estadístico obtenido en Statgraphics de la reactancia  $X_{cc}$ .

**Ajuste de Datos No Censurados - Xcc**

Datos/Variable: Xcc

160 valores con rango desde 0,331901 a 0,341767

Distribuciones Ajustadas

Normal
media = 0,33667
desviación estándar = 0,0021645

Figura 123.- Media y desviación de Xcc (Fuente: Elaboración propia)

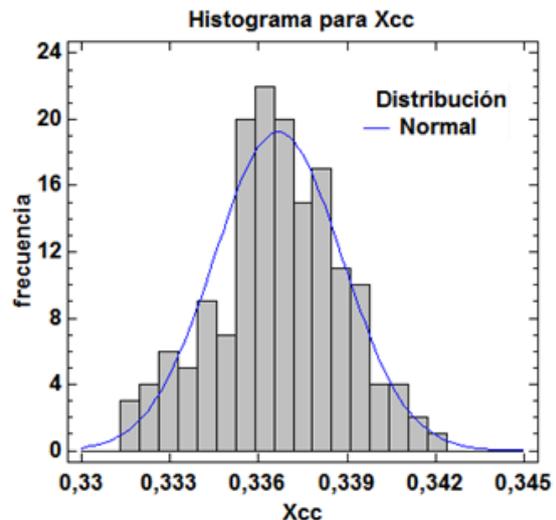


Figura 124.- Histograma de Xcc (Fuente: Elaboración propia)

Se ha realizado una prueba de normalidad Chi-Cuadrado [216] obteniéndose un p-valor de 0,900938 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $X_{cc}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Además se ha realizado una prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado [216] para determinar si  $X_{cc}$  puede modelarse adecuadamente con una distribución normal obteniéndose un p-valor de 0,805274 por lo que no se puede rechazar la idea de que  $X_{cc}$  proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Adoptando el valor medio, se determina una resistencia de cortocircuito de  $R_{cc} = 1,357 \Omega$ . Para el análisis se puede dividir la resistencia a la mitad obteniendo unos valores de  $R_1 = R'_2 = 0,6785 \Omega$ .

Se ha obtenido, adoptando el valor medio, una reactancia de cortocircuito de  $X_{cc} = 0,3367 \Omega$ . Las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'_{d2}$  correspondientes al modelo de dispersión de flujo en los devanados del estator y rotor respectivamente se divide a la mitad, dado que en el modelo de circuito equivalente con la reducción del rotor al estator se considera igual número de espiras en estator y rotor. Por lo tanto, se obtiene que  $X_{d1} = X'_{d2} = 0,16835 \Omega$ .

### Ensayo en carga del transformador monofásico

Este ensayo analiza en funcionamiento normal del transformador cuando se le conectan diversas cargas eléctricas en su secundario. La figura 125 representa el ensayo de carga (un solo punto de funcionamiento):

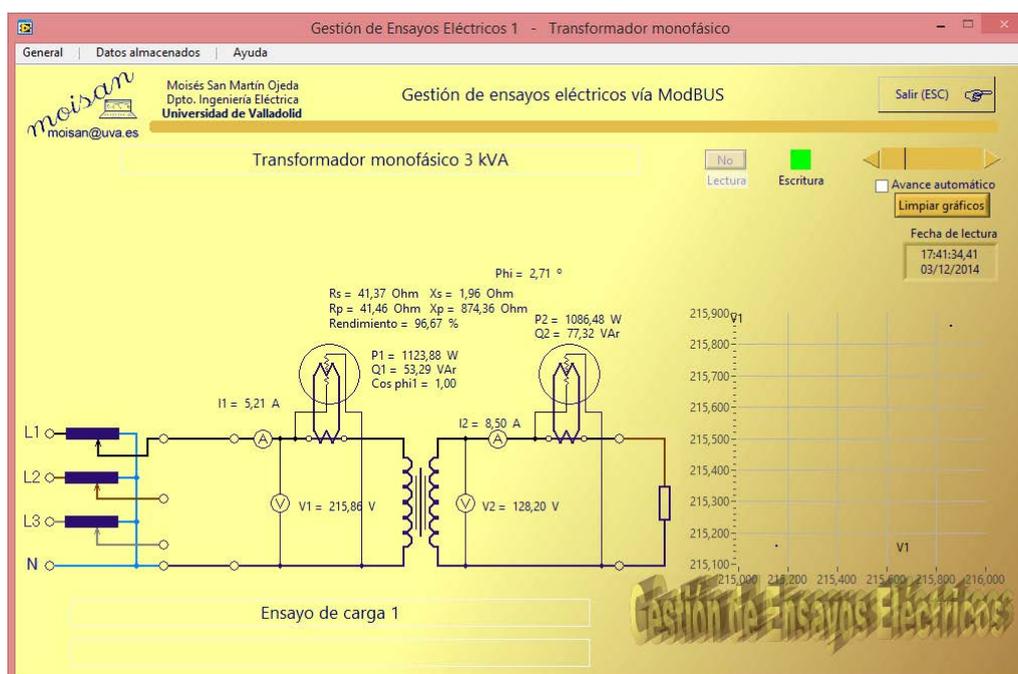


Figura 125.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)



Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en carga, el sistema nos permite la conexión de diversas cargas. La tabla 6 representa datos correspondientes a tres cargas diferentes.

#	V1	I1	P1	Q1	cos phi1	V2	I2	P2	Q2	Fecha	Hora
1	215,16	5,203	1118,12	53,09	1,00	127,85	8,48	1081,64	72,26	03/12/2014	17:41:05
2	216,15	5,223	1127,72	54,65	1,00	128,38	8,51	1089,78	76,17	03/12/2014	17:41:06
3	215,33	5,205	1119,48	54,74	1,00	128,09	8,49	1084,48	73,68	03/12/2014	17:41:06
4	214,92	5,199	1116,23	50,43	1,00	127,44	8,47	1077,34	72,86	03/12/2014	17:41:07
5	216,39	5,233	1131,07	54,54	1,00	128,38	8,53	1092,61	78,36	03/12/2014	17:41:08
6	215,92	5,219	1125,53	52,88	1,00	128,09	8,50	1085,59	75,77	03/12/2014	17:41:08
7	216,21	5,238	1131,14	55,90	1,00	128,55	8,54	1094,91	73,79	03/12/2014	17:41:09
8	215,21	5,198	1117,51	50,20	1,00	127,56	8,47	1078,39	69,61	03/12/2014	17:41:09
9	215,16	5,205	1118,88	47,81	1,00	127,85	8,48	1082,22	70,60	03/12/2014	17:41:10
...											
...											
...											
62	217,97	3,969	863,79	45,87	1,00	130,20	6,43	834,45	60,02	03/12/2014	17:42:06
63	216,50	3,943	852,40	46,11	1,00	129,26	6,38	823,08	57,05	03/12/2014	17:42:06
64	217,38	3,958	859,17	44,02	1,00	129,67	6,41	829,14	55,56	03/12/2014	17:42:07
65	216,45	3,942	852,12	42,00	1,00	129,26	6,38	822,84	58,32	03/12/2014	17:42:07
66	216,27	3,938	850,48	45,04	1,00	129,08	6,37	820,92	56,13	03/12/2014	17:42:08
67	217,62	3,962	861,09	45,49	1,00	129,90	6,42	831,97	57,15	03/12/2014	17:42:09
68	216,97	3,950	855,92	44,61	1,00	129,43	6,40	825,70	58,37	03/12/2014	17:42:09
69	217,73	3,965	862,15	44,31	1,00	130,08	6,42	832,84	56,32	03/12/2014	17:42:10
...											
...											
...											
219	218,67	2,699	588,89	39,08	1,00	131,25	4,31	564,76	38,11	03/12/2014	17:43:49
220	218,91	2,701	590,04	39,50	1,00	131,31	4,32	565,81	38,33	03/12/2014	17:43:50
221	217,56	2,686	582,65	43,35	1,00	130,55	4,29	558,82	40,75	03/12/2014	17:43:50
222	218,14	2,692	585,70	41,56	1,00	130,96	4,30	561,89	40,52	03/12/2014	17:43:51
223	217,38	2,682	581,55	40,96	1,00	130,43	4,29	557,74	42,08	03/12/2014	17:43:51
224	218,96	2,703	590,16	43,81	1,00	131,31	4,32	565,91	39,19	03/12/2014	17:43:52
225	218,55	2,697	587,83	42,19	1,00	131,13	4,31	563,82	39,82	03/12/2014	17:43:53
226	218,09	2,692	585,64	40,10	1,00	130,90	4,30	561,46	40,64	03/12/2014	17:43:53
227	218,79	2,700	589,37	40,76	1,00	131,25	4,32	565,31	39,49	03/12/2014	17:43:54
228	217,27	2,682	581,06	43,49	1,00	130,37	4,28	557,25	38,80	03/12/2014	17:43:54
229	218,79	2,699	589,12	40,50	1,00	131,31	4,32	565,11	41,36	03/12/2014	17:43:55

**Tabla 6.- Datos del ensayo en carga del transformador monofásico**

#### 4.2.4.- Validación del modelo

Los datos procedentes de los ensayos de vacío y cortocircuito permitieron calcular todos los parámetros del circuito equivalente, con lo que es posible analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga conectada (figura 126).

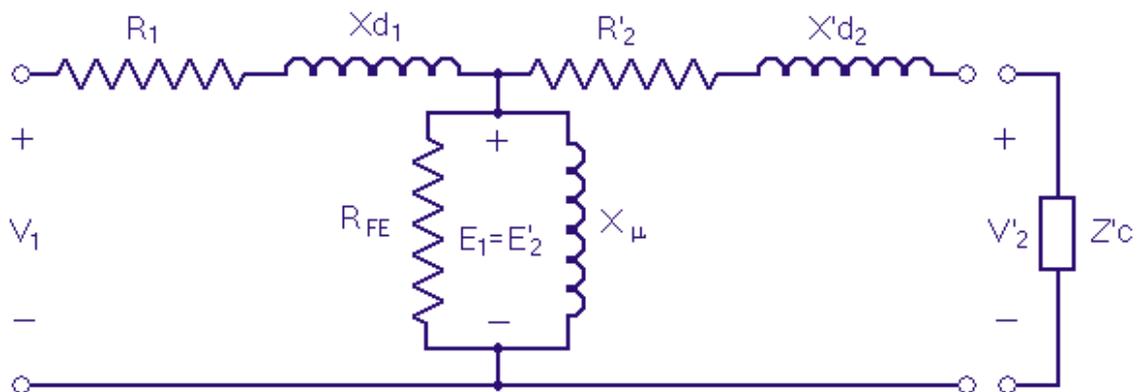


Figura 126.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Se realiza la validación del modelo comparando los datos medidos en el ensayo en carga con los datos mediante la resolución analítica del circuito. La resolución analítica del circuito se hará con la ayuda del simulador desarrollado al efecto, en el que se introducirán los datos del modelo (circuito equivalente) y, en cada caso, los datos de la carga correspondiente.

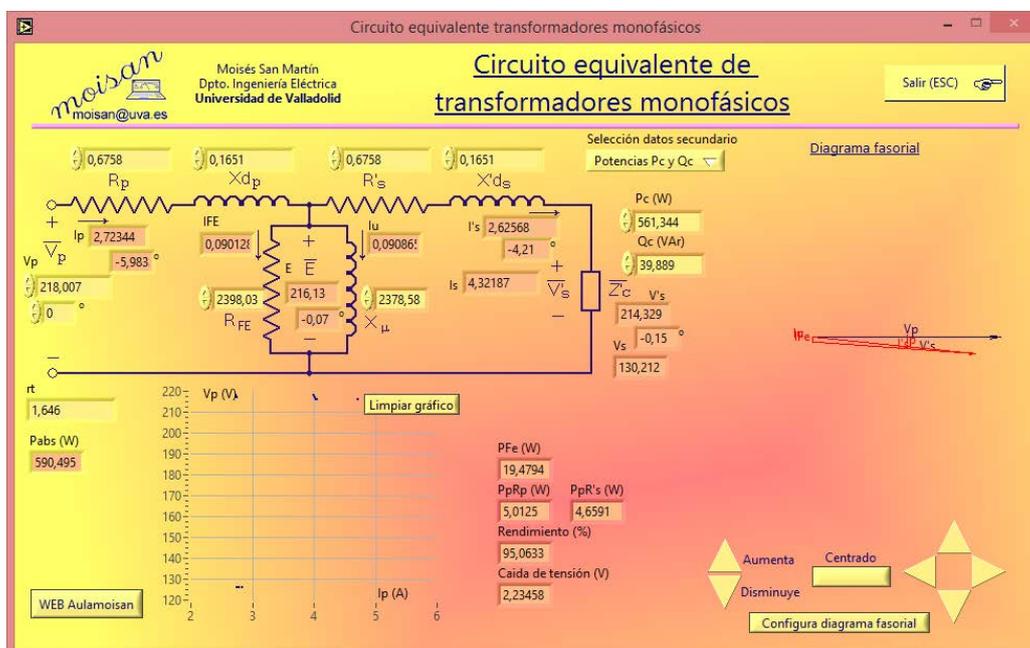


Figura 127.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)

A continuación se comparan los resultados correspondientes al ensayo en carga de 1.088,2 W en el secundario para la que se detallan los valores medidos en el ensayo



(se realiza una media de entre todos los valores medidos - tabla 6), los valores calculados con el simulador, y la variación relativa entre unos y otros.

En la tabla 7 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente.

Circuito equivalente utilizando los valores medios ( $\mu$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	216,014	5,217	1125,8	128,26	8,504	1088,2	74,29
Simulados		5,32	1144,6	126,82	8,6005		
Variación relativa (%)		1,974	1,67	-1,12	1,135		

**Tabla 7.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores medios ( $\mu$ )**

Obsérvese que, en cualquier caso, la diferencia relativa entre los valores reales medidos y los obtenidos mediante simulación con el modelo de circuito equivalente no supera el 2%.

Dado que del análisis estadístico que se ha realizado anteriormente se concluyó que los parámetros del circuito equivalente pueden ser ajustados a una distribución normal, se va a exponer a continuación el resultado de la simulación considerando la desviación típica de las medidas realizadas para la obtención de los parámetros del modelo.

En la tabla 8 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios más tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por encima de la media más tres veces la desviación típica es de 0,135%).

Circuito equivalente utilizando los valores medios más tres veces la desviación típica ( $\mu + 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	216,014	5,217	1125,8	128,26	8,504	1088,2	74,29
Simulados		5,321	1144,7	126,80	8,602		
Variación relativa (%)		1,984	1,68	-0,114	1,151		

**Tabla 8.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ )**

En la tabla 9 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios menos tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por debajo de la media menos tres veces la desviación típica es de 0,135%).

Circuito equivalente utilizando los valores medios menos tres veces la desviación típica ( $\mu - 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	216,014	5,217	1125,8	128,26	8,504	1088,2	74,29
Simulados		5,31961	1144,5	126,84	8,59919		
Variación relativa		0,01967	0,0166	-0,00111	0,01119		

Tabla 9.- Resultados sobre el ensayo en carga de 1.088,2 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ )

Comparando las tres tablas anteriores se puede observar que los resultados apenas varían cuando se consideran los valores más probables de los parámetros del modelo.

De igual manera se procede para el ensayo en carga de 827,21 W en el secundario para la que se detallan los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos - tabla 6), los valores calculados con el simulador, y la variación relativa entre unos y otros.

En la tabla 10 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente.

Circuito equivalente utilizando los valores medios ( $\mu$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	217,186	3,953	857,42	129,63	6,401	827,81	56,91
Simulados		4,0156	826,27	128,62	6,4512		
Variación relativa (%)		1,578	1,26	0,78	0,784		

Tabla 10.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores medios ( $\mu$ )

Obsérvese que, en cualquier caso, la diferencia relativa entre los valores reales medidos y los obtenidos mediante simulación con el modelo de circuito equivalente no supera el 2%.

Dado que del análisis estadístico que se ha realizado anteriormente se concluyó que los parámetros del circuito equivalente pueden ser ajustados a una distribución normal, se va a exponer a continuación el resultado de la simulación considerando la desviación típica de las medidas realizadas para la obtención de los parámetros del modelo.

En la tabla 11 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios más tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por encima de la media más tres veces la desviación típica es de 0,135%).



Circuito equivalente utilizando los valores medios más tres veces la desviación típica ( $\mu + 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	217,186	3,953	857,42	129,63	6,401	827,81	56,91
Simulados		4,019	868,29	128,5	6,4575		
Variación relativa (%)		1,664	1,27	-0,87	0,88		

Tabla 11.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ )

En la tabla 12 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios menos tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por debajo de la media menos tres veces la desviación típica es de 0,135%).

Circuito equivalente utilizando los valores medios menos tres veces la desviación típica ( $\mu - 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	217,186	3,953	857,42	129,63	6,401	827,81	56,91
Simulados		4,0153	868,26	128,64	6,4504		
Variación relativa (%)		1,576	1,26	-0,76	0,77		

Tabla 12.- Resultados sobre el ensayo en carga de 827,81 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ )

Comparando las tres tablas anteriores se puede observar que los resultados apenas varían cuando se consideran los valores más probables de los parámetros del modelo.

A continuación se considera la carga de 561,34 W en el secundario para la que se detallan los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos - tabla 6), los valores calculados con el simulador, y la variación relativa entre unos y otros.

En la tabla 13 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente.

Circuito equivalente utilizando los valores medios ( $\mu$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	218,007	2,691	585,3	130,82	4,301	561,34	39,89
Simulados		2,7353	590,37	129,59	4,3428		
Variación relativa (%)		1,646	0,87	0,94	0,972		

Tabla 13.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores medios ( $\mu$ )

Obsérvese que, en cualquier caso, la diferencia relativa entre los valores reales medidos y los obtenidos mediante simulación con el modelo de circuito equivalente no supera el 2%.

Dado que del análisis estadístico que se ha realizado anteriormente se concluyó que los parámetros del circuito equivalente pueden ser ajustados a una distribución normal, se va a exponer a continuación el resultado de la simulación considerando la desviación típica de las medidas realizadas para la obtención de los parámetros del modelo.

En la tabla 14 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios más tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por encima de la media más tres veces la desviación típica es de 0,135%).

Circuito equivalente utilizando los valores medios más tres veces la desviación típica ( $\mu + 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	218,007	2,691	585,3	130,82	4,301	561,34	39,89
Simulados		2,735	590,34	129,57	4,343		
Variación relativa (%)		1,64	0,86	-0,95	0,98		

Tabla 14.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores ( $\mu + 3\sigma$ )

En la tabla 15 se utilizan como parámetros del circuito equivalente los valores medios menos tres veces la desviación típica de entre los obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente (la probabilidad de obtener un valor por debajo de la media menos tres veces la desviación típica es de 0,135%).

Circuito equivalente utilizando los valores medios menos tres veces la desviación típica ( $\mu - 3\sigma$ )							
	V1	I1	P1	V2	I2	P2	Q2
Medidos	218,007	2,691	585,3	130,82	4,301	561,34	39,89
Simulados		2,7234	590,5	130,21	4,32187		
Variación relativa (%)		1,21	0,89	-0,46	0,49		

Tabla 15.- Resultados sobre el ensayo en carga de 561,34 W considerando valores ( $\mu - 3\sigma$ )

Comparando las tres tablas anteriores se puede observar que los resultados apenas varían cuando se consideran los valores más probables de los parámetros del modelo.

De los resultados de variación entre los datos con el modelo y los datos reales medidos podemos validar el modelo y, por tanto, conocer el funcionamiento del transformador monofásico elegido para cualquier régimen de carga.

#### 4.2.5.- Equivalencia entre modelos de transformador monofásico

En esta tesis se ha obtenido el resultado original de establecer una equivalencia entre dos de los modelos más usados de transformador monofásico.

Recordemos de nuevo el modelo de corriente alterna de un transformador monofásico utilizado principalmente en aplicaciones industriales, y válido únicamente para corriente alterna (figura 128).

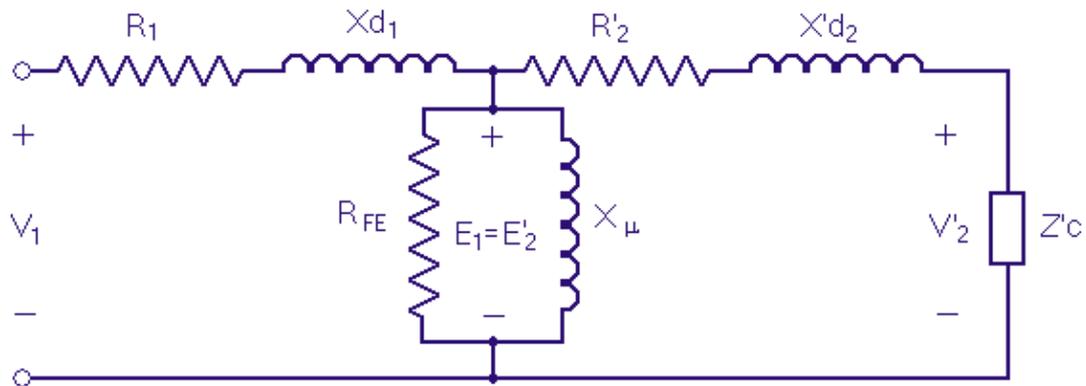
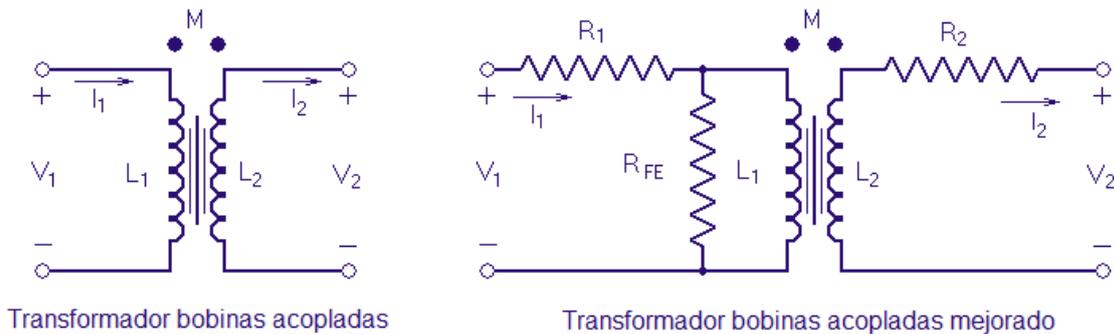


Figura 128.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Tratamos de buscar una equivalencia con el modelo de dos bobinas acopladas (véase siguiente figura en la parte izquierda), modelo que hemos mejorado con la inserción de resistencias para considerar las pérdidas de potencia (véase figura 129 en la parte derecha). Obsérvese que este modelo es válido para cualquier tipo de tensión (alterna, continua, etc.). Este modelo se utiliza en aplicaciones de control automático.



Transformador bobinas acopladas

Transformador bobinas acopladas mejorado

Figura 129.- Modelo bobinas acopladas y modelo mejorado (Fuente: Elaboración propia)

A partir del significado físico de los parámetros de los diferentes modelos de transformador podemos establecer la siguiente equivalencia (las resistencias de primario  $R_1$ , secundario  $R_2$  y de pérdidas en el hierro  $R_{FE}$  se mantienen en los dos modelos) de los coeficientes de autoinducción  $L_1$  (6) y  $L_2$  (7), y del coeficiente de inductancia mutua  $M$  (8):

$$L_1 = \frac{X_{d1} + X_{\mu}}{\omega} = \frac{X_{d1} + X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot F} \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{L_1}{r_t^2} \quad (7)$$

$$M = \frac{X_{\mu}}{\omega \cdot r_t} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r_t} \quad (8)$$

Para comprobar la validez y equivalencia de los dos modelos se ha utilizado el simulador de transformadores monofásicos ligeramente modificado (obsérvese en la figura 130 la equivalencia completa y biunívoca de los dos modelos).

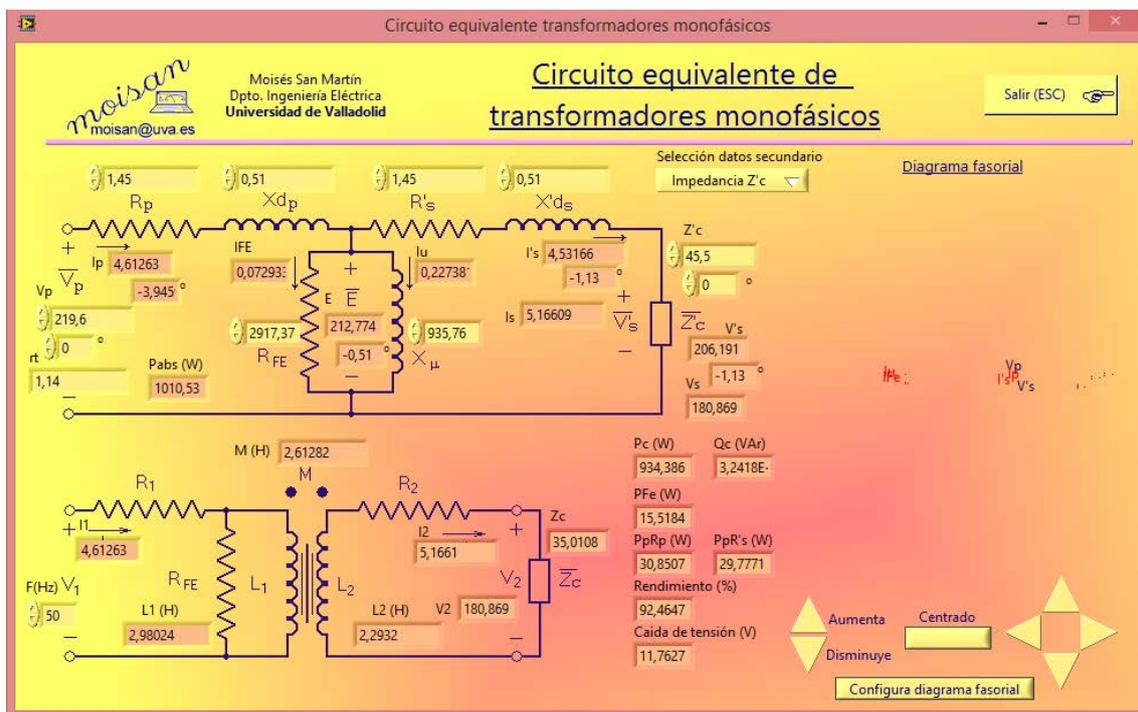


Figura 130.- Equivalencia entre dos modelos de transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.6.- Adquisición de la corriente de vacío

El sistema de gestión permite, además, la adquisición de datos instantáneos de las distintas variables del sistema (principalmente tensiones y corrientes). En el caso del transformador monofásico se ha realizado la adquisición de la corriente de vacío (figura 131).

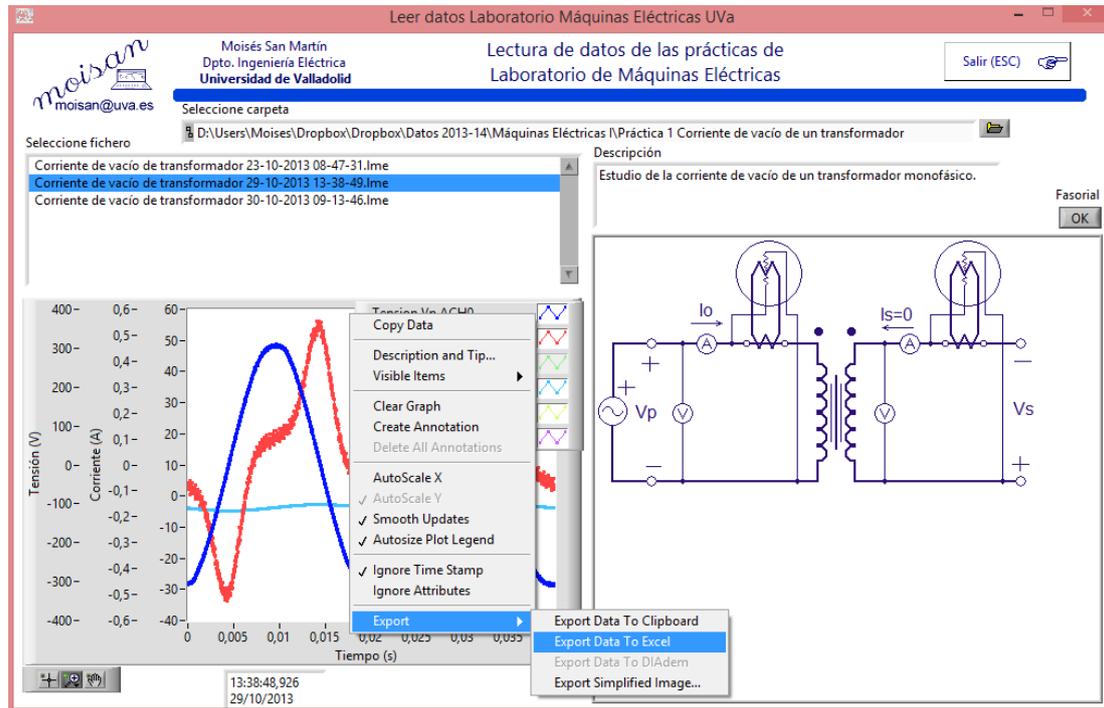


Figura 131.- Corriente de vacío de un transformador eléctrico (Fuente: Elaboración propia)

Estos datos adquiridos permiten ser tratados por otras aplicaciones. Mediante su exportación a una hoja de cálculo Excel se ha obtenido una curva similar a la curva de histéresis del transformador ensayado (figura 132).

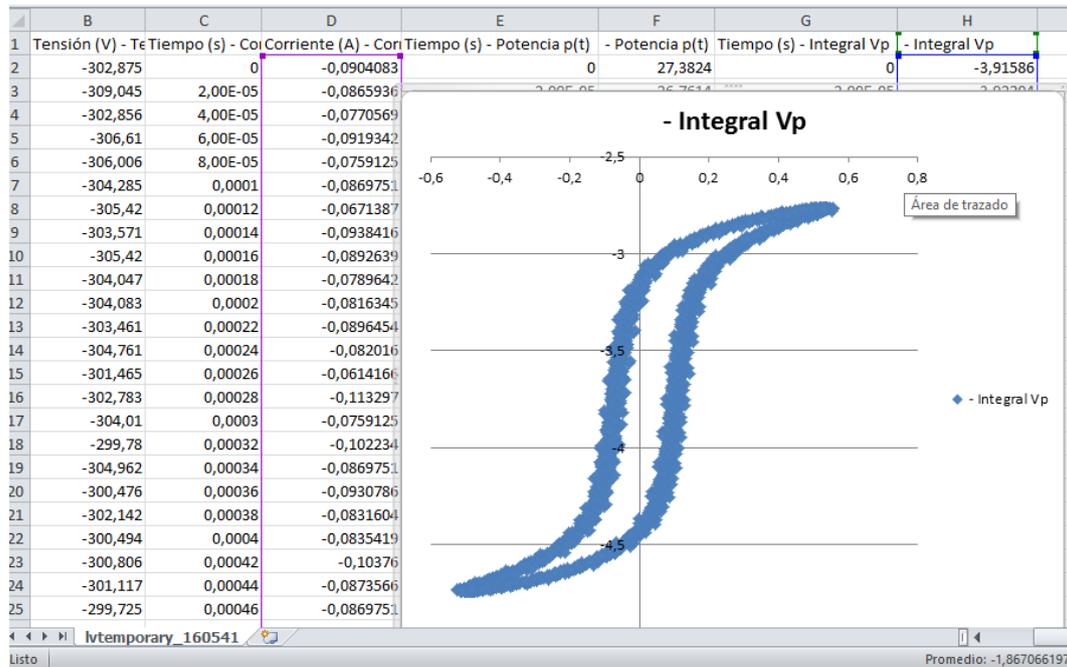


Figura 132.- Curva de vacío y obtención del ciclo de histéresis (Fuente: Elaboración propia)

## 4.3- Aplicación herramienta a transformadores trifásicos

### 4.3.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar

El transformador trifásico (mucho más habitual en la industria que el monofásico) dispone de los mismos elementos que el transformador monofásico: un circuito magnético y varios devanados. En la figura 133 representamos un transformador trifásico elemental.

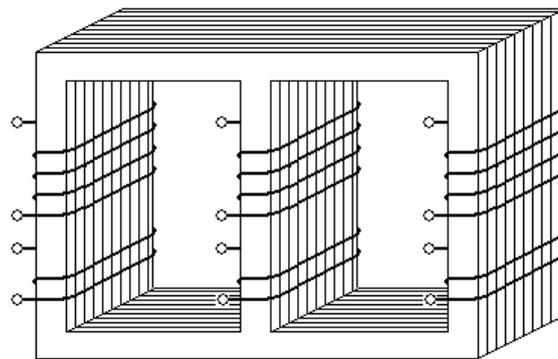


Figura 133.- Transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Los transformadores trifásicos disponen de **tres** devanados primarios y **tres** devanados secundarios, que pueden ser conectados en estrella, triángulo, zigzag, etc. y como en todo sistema trifásico deberemos tener en cuenta que tenemos dos tensiones distintas (de línea y de fase) (figura 134).

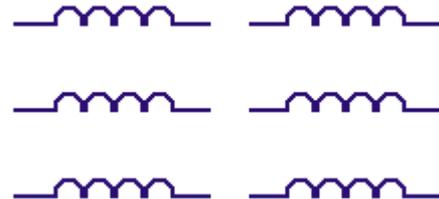


Figura 134.- Devanados transformador trifásico

El principio de funcionamiento del transformador trifásico es el mismo que el del transformador monofásico: **Ley de Ampere** y **Ley de Faraday**.

Si trabajamos con tensiones e intensidades equilibradas, y a efectos de análisis, podemos simplificar el circuito trifásico mediante un modelo de circuito monofásico, en el que se deberá tener en cuenta que los valores de potencias consumidas en los diferentes componentes del circuito monofásico corresponden a la tercera parte de la real en el transformador trifásico.

En la figura 135 se representa el modelo de circuito equivalente de un transformador trifásico.

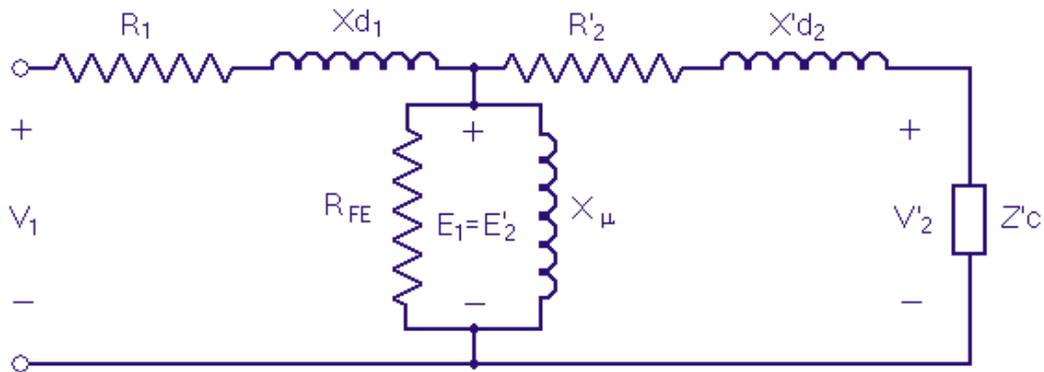


Figura 135.- Modelo de transformador trifásico equilibrado (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.3.2.- Transformador trifásico ensayado

Se presenta, a continuación la figura 136 con el transformador ensayado, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 5 KVA
- Tensión nominal de línea en primario: 380 V.
- Tensión nominal de línea en secundario: 132 V.
- Conexión Estrella/Triángulo



Figura 136.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)

Una vez conectado el transformador trifásico al sistema de gestión y control se procederá a la realización de una serie de ensayos que se detallan a continuación. La propia plataforma va a permitir la conexión y desconexión de los diferentes ensayos sin necesidad de intervención en los montajes de los esquemas, mediante los controles habilitados en la misma (véase señalados en la figura 137).

La representación de los distintos montajes se hará a partir de los datos almacenados por el sistema de gestión y control.

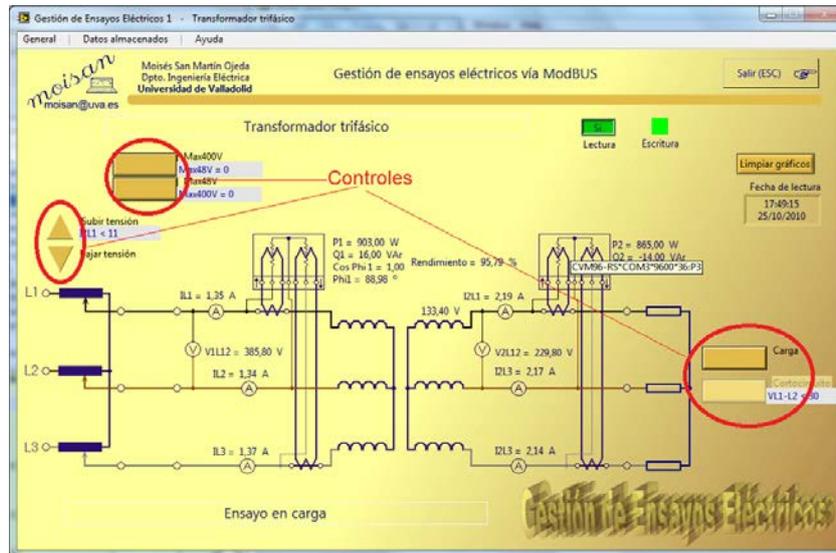


Figura 137.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.3.3.- Ensayos y determinación del modelo

##### Ensayo en vacío del transformador trifásico

Este ensayo consiste en dejar abierto el secundario del transformador (sin conectar carga alguna). Se determinará la relación de transformación así como los parámetros del circuito equivalente de la rama paralelo. La figura 138 representa el ensayo de vacío (un solo punto de funcionamiento):

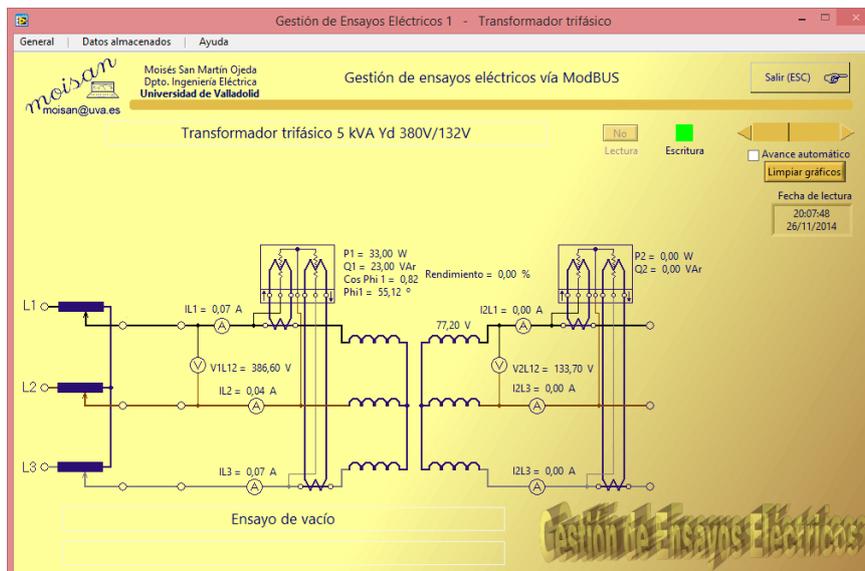


Figura 138.- Ensayo en vacío del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en vacío, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de



tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de tensión aplicada.

Se representa en la tabla 16 los valores obtenidos del ensayo en vacío para la tensión nominal de 380 V. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ .

#	VL1-L2	IL1	IL2	IL3	P1	Q1	Cos Phi1	V2L1-L2	I2L1	P2	Q2	V2L1	Fecha	Hora	Rfe	Xn
1	386,8	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:16	4533,76	6504,97
2	386,7	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,5	26/11/2014	20:07:17	4531,42	6501,60
3	386,7	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:18	4531,42	6501,60
4	386,6	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,6	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:19	4529,08	6498,24
5	386,4	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,6	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:20	4524,39	6491,52
6	386,5	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,6	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:21	4526,73	6494,88
7	386,8	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:22	4533,76	6504,97
8	386,8	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:23	4533,76	6504,97
9	386,6	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:24	4529,08	6498,24
10	386,6	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,6	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:25	4529,08	6498,24
11	386,5	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:26	4526,73	6494,88
12	386,8	0,072	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:27	4533,76	6504,97
13	386,7	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:28	4531,42	6501,60
14	386,8	0,073	0,041	0,069	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:07:29	4533,76	6504,97
15	386,8	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:30	4533,76	6504,97
16	386,8	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:31	4533,76	6504,97
17	386,8	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:32	4533,76	6504,97
18	386,8	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:33	4533,76	6504,97
19	386,7	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:34	4531,42	6501,60
20	386,8	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:35	4533,76	6504,97
21	386,6	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:36	4529,08	6498,24
22	386,5	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,7	0	0	0	77,4	26/11/2014	20:07:37	4526,73	6494,88
...																
...																
...																
197	387	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:10:36	4538,45	6511,70
198	387,1	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:10:37	4540,80	6515,06
199	387,1	0,073	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:10:38	4540,80	6515,06
200	387	0,072	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:10:39	4538,45	6511,70
201	387	0,072	0,041	0,07	33	23	0,82	133,8	0	0	0	77,3	26/11/2014	20:10:40	4538,45	6511,70

**Tabla 16.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador**

Con todos estos puntos de funcionamiento es posible determinar los valores medios, varianzas y desviaciones típicas. A título de ejemplo se muestra en las

siguientes figuras (figura 139 y figura 140) estos cálculos realizados con la herramienta de desarrollo LabVIEW [200].

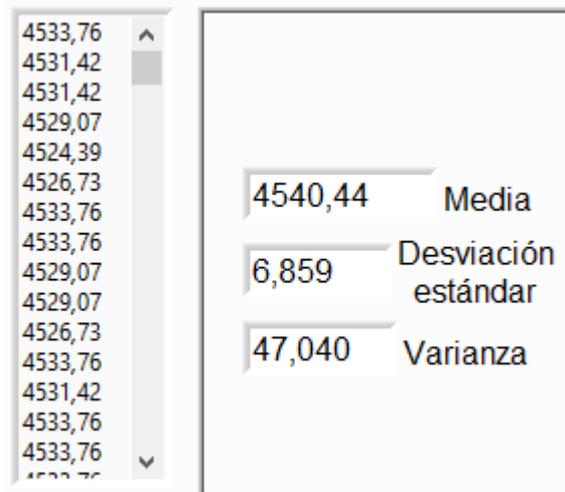


Figura 139.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de  $R_{FE}$  (Fuente: Elaboración propia)

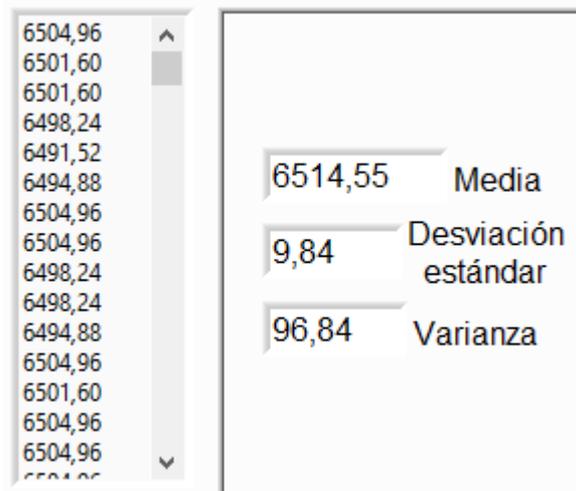


Figura 140.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de  $X_{\mu}$  (Fuente: Elaboración propia)

Por lo tanto se obtiene un valor de pérdidas en el hierro  $R_{FE} = 4540,44 \Omega$  y un valor reactancia magnetizante característica del flujo útil  $X_{\mu} = 6514,55 \Omega$ .

Se ha realizado también un ensayo para la determinación de la curva de vacío que representa la tensión en el primario frente a la corriente en el primario, estando el secundario en vacío (véase la figura 141).

Obsérvese que esta curva tiene una zona lineal y se aprecia el codo de saturación. De aquí se puede observar que los valores para la rama paralelo del circuito equivalente (resistencia  $R_{FE}$  y de la reactancia  $X_{\mu}$ ) varían según el punto de funcionamiento. Es por esto que, en nuestro caso, se han determinado estos valores para



su funcionamiento en la tensión nominal de 220 V, que será la zona normal de trabajo de esta máquina.

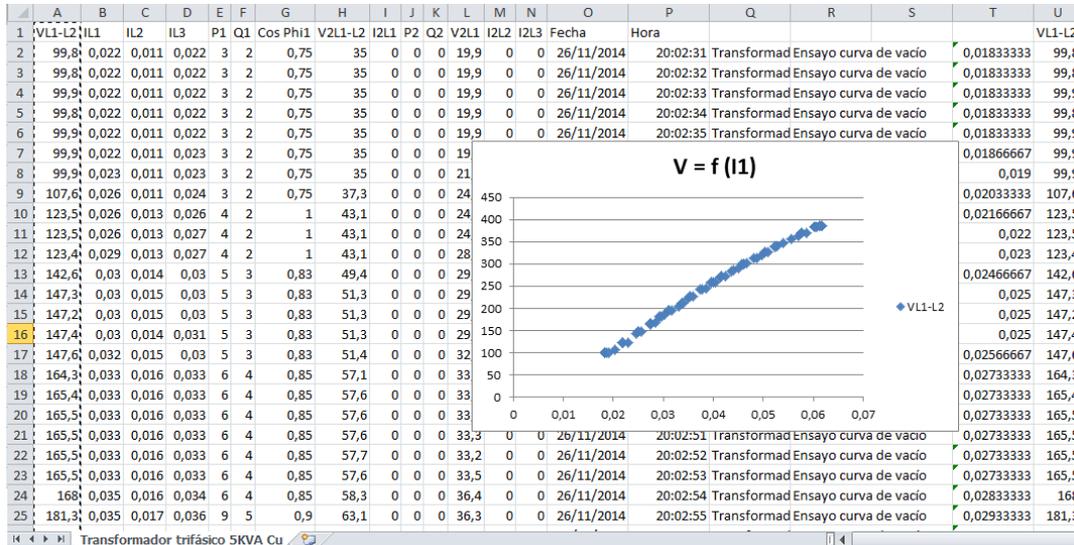


Figura 141.- Curva de vacío del transformador (Fuente: Elaboración propia)

**Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico**

Este ensayo consiste en cortocircuitar el secundario del transformador aplicando una tensión inferior en el primario de tal manera que circule por sus devanados la corriente nominal. Se determinará la tensión de cortocircuito, así como los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie. La figura 142 representa el ensayo de cortocircuito (un solo punto de funcionamiento).

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en cortocircuito, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de corriente establecida en los devanados.

Con los datos medidos de las variables se pueden calcular los parámetros de la rama serie del circuito equivalente sabiendo que la potencia activa medida en el primario corresponde a tres veces la consumida por las resistencias  $R_1$  y  $R'_2$  en el circuito equivalente y la potencia reactiva medida en el primario corresponde a tres veces la consumida por las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'_d2$  en el circuito equivalente.

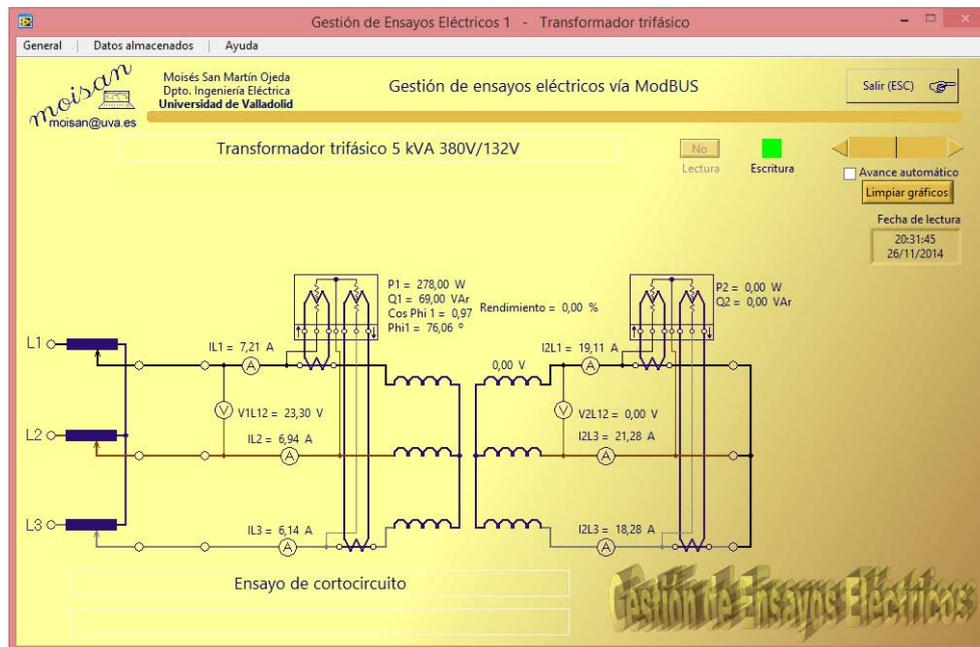


Figura 142.- Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Se representa en la tabla 17 los valores obtenidos en el ensayo de cortocircuito. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Para ello se deberá tener en cuenta que las potencias activa absorbida corresponde a tres veces las consumidas por las resistencias ( $R_{cc} = R_1 + R_2$ ) y la potencia reactiva absorbida a las reactancias ( $X_{cc} = X_{d1} + X_{d2}$ ).

#	VL1-L2	IL1	IL2	IL3	P1	Q1	Cos Phi1	V2	I2L1	P2	Q2	I2L2	I2L3	Fecha	Hora	Rcc	Xcc
1	23,30	7,265	6,957	6,135	280	68	0,97	0	19,189	0	0	21,399	18,264	26/11/2014	20:33:34	2,03	0,49
2	23,10	7,208	6,968	6,164	277	69	0,97	0	19,115	0	0	21,313	18,391	26/11/2014	20:30:06	2,01	0,50
3	23,10	7,197	6,967	6,16	277	69	0,97	0	19,089	0	0	21,289	18,392	26/11/2014	20:30:07	2,01	0,50
4	23,10	7,221	6,972	6,17	277	69	0,97	0	19,151	0	0	21,267	18,39	26/11/2014	20:30:08	2,00	0,50
5	23,10	7,202	6,967	6,161	277	69	0,97	0	19,106	0	0	21,267	18,387	26/11/2014	20:30:10	2,01	0,50
6	23,10	7,189	6,961	6,159	276	68	0,97	0	19,072	0	0	21,275	18,385	26/11/2014	20:30:11	2,01	0,49
7	23,10	7,2	6,962	6,166	277	69	0,97	0	19,11	0	0	21,246	18,378	26/11/2014	20:30:12	2,01	0,50
8	23,10	7,194	6,96	6,164	277	68	0,97	0	19,097	0	0	21,269	18,386	26/11/2014	20:30:13	2,01	0,49
9	23,20	7,191	6,959	6,169	277	68	0,97	0	19,104	0	0	21,247	18,387	26/11/2014	20:30:14	2,01	0,49
...																	
...																	
...																	
193	23,30	7,258	6,954	6,137	280	68	0,97	0	19,183	0	0	21,393	18,254	26/11/2014	20:33:31	2,03	0,49
194	23,30	7,261	6,955	6,138	280	68	0,97	0	19,187	0	0	21,381	18,255	26/11/2014	20:33:32	2,03	0,49
195	23,30	7,265	6,957	6,144	281	68	0,97	0	19,197	0	0	21,384	18,253	26/11/2014	20:33:33	2,03	0,49
196	23,30	7,265	6,957	6,135	280	68	0,97	0	19,189	0	0	21,399	18,264	26/11/2014	20:33:34	2,03	0,49

Tabla 17.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito

Con todos estos puntos de funcionamiento es posible determinar los valores medios, varianzas y desviaciones típicas. A título de ejemplo se muestra en las siguientes figuras (figura 143 y figura 144) estos cálculos realizados con la herramienta de desarrollo LabVIEW [200].

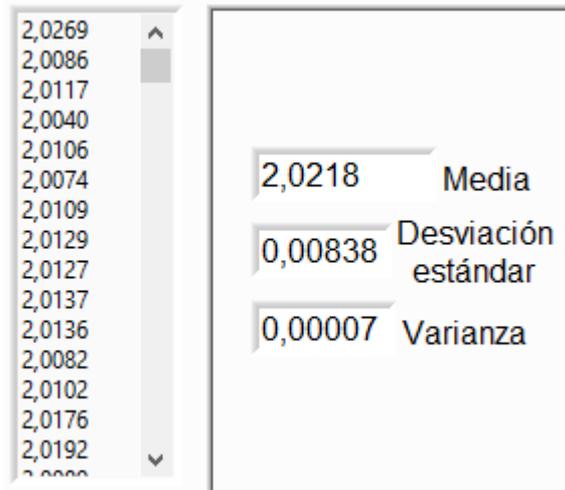


Figura 143.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de  $R_{cc}$  (Fuente: Elaboración propia)

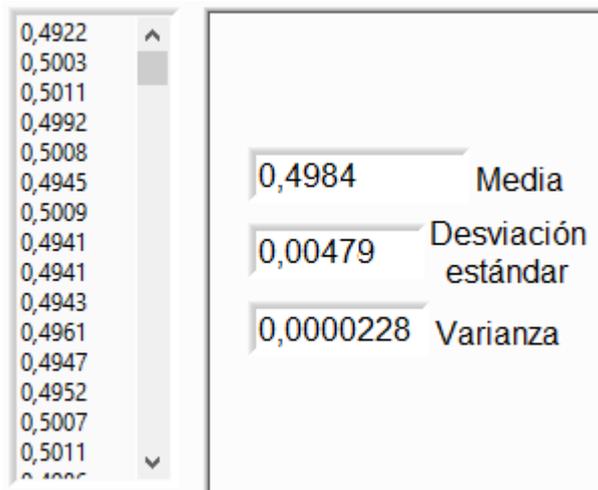


Figura 144.- Cálculo de valor medio, varianza y desviación de  $X_{cc}$  (Fuente: Elaboración propia)

Se ha obtenido una resistencia de cortocircuito de  $R_{cc} = 2,0218 \Omega$ . Para el análisis se puede dividir la resistencia a la mitad obteniendo unos valores de  $R_1 = R_2 = 1,014 \Omega$ .

Se ha obtenido una reactancia de cortocircuito de  $X_{cc} = 0,4984 \Omega$ . Las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'_{d2}$  correspondientes al modelo de dispersión de flujo en los devanados del estator y rotor respectivamente se divide a la mitad, dado que en el modelo de circuito equivalente con la reducción del rotor al estator se considera igual número de espiras en estator y rotor. Por lo tanto, se obtiene que  $X_{d1} = X'_{d2} = 0,2492 \Omega$ .

## Ensayo en carga del transformador trifásico

Este ensayo analiza en funcionamiento normal del transformador cuando se le conectan diversas cargas eléctricas en su secundario. La figura 145 representa el ensayo de carga (un solo punto de funcionamiento):

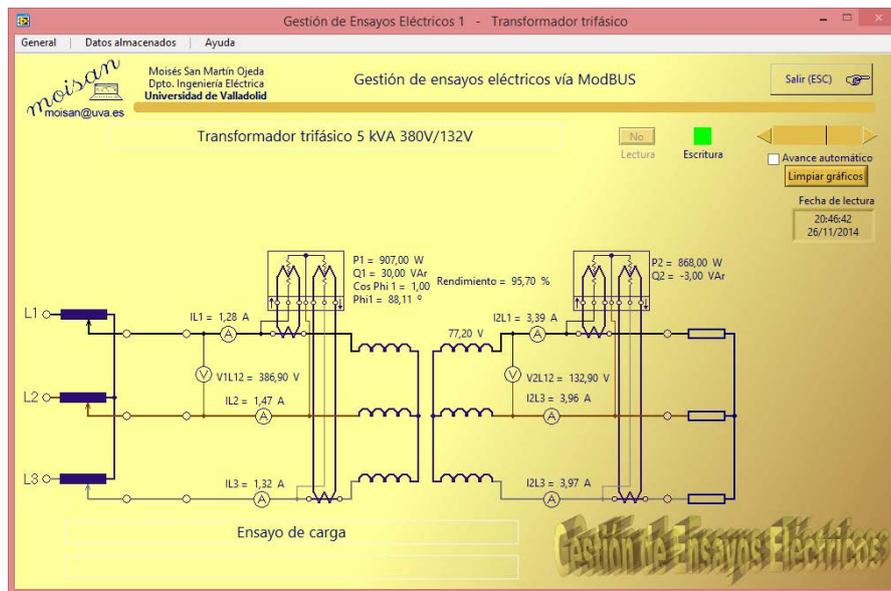


Figura 145.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en carga, el sistema nos permite la conexión de diversas cargas. La tabla 18 representa datos correspondientes a dos cargas diferentes.

### 4.3.4.- Validación del modelo

Los datos procedentes de los ensayos de vacío y cortocircuito permitieron calcular todos los parámetros del circuito equivalente, con lo que es posible analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga conectada (figura 146).

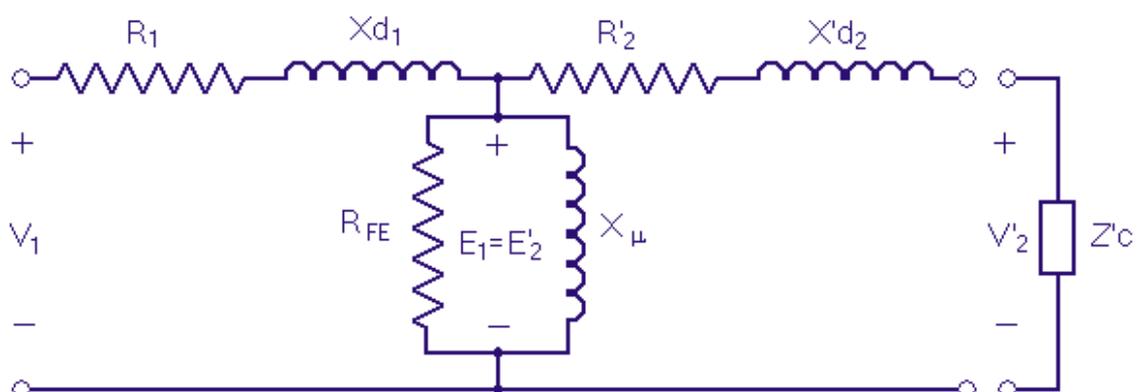


Figura 146.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)



#	VL1-L2	IL1	IL2	IL3	P1	Q1	Cos Phi1	V2L1-L2	I2L1	P2	Q2	V2L1	I2L2	I2L3
1	386,7	1,284	1,472	1,316	909	30	1	132,7	3,389	868	-2	77,2	3,967	3,968
2	386,7	1,284	1,473	1,316	908	30	1	132,8	3,393	868	-2	77,2	3,969	3,97
3	386,8	1,288	1,474	1,316	908	30	1	132,8	3,395	868	-2	77,2	3,966	3,967
4	387	1,288	1,47	1,318	910	30	1	132,9	3,394	868	-3	77,3	3,965	3,966
5	386,8	1,285	1,474	1,316	909	30	1	132,8	3,393	868	-3	77,2	3,965	3,967
6	386,7	1,284	1,474	1,316	909	30	1	132,8	3,388	868	-2	77,2	3,966	3,968
7	386,7	1,286	1,472	1,317	908	31	0,99	132,8	3,389	868	-3	77,2	3,966	3,969
8	386,9	1,285	1,472	1,317	910	31	0,99	132,8	3,394	868	-3	77,2	3,964	3,969
9	386,9	1,284	1,474	1,32	911	31	0,99	132,8	3,393	869	-3	77,2	3,967	3,972
10	386,9	1,284	1,473	1,316	909	30	1	132,9	3,388	869	-3	77,2	3,968	3,971
11	386,8	1,286	1,474	1,315	909	30	1	132,8	3,393	868	-3	77,2	3,962	3,97
12	386,7	1,284	1,472	1,315	909	30	1	132,8	3,39	868	-2	77,2	3,963	3,967
...														
...														
...														
157	386,9	0,886	0,881	0,911	598	31	0,99	133,3	2,414	559	-3	77,2	2,428	2,428
158	387	0,885	0,882	0,909	598	31	0,99	133,4	2,414	560	-3	77,2	2,438	2,424
159	387	0,884	0,881	0,909	598	31	0,99	133,3	2,412	559	-2	77,1	2,43	2,423
160	386,8	0,89	0,881	0,912	597	29	0,99	133,2	2,412	559	-3	77,1	2,428	2,423
161	386,7	0,889	0,879	0,912	599	32	0,99	133,3	2,412	559	-3	77,1	2,431	2,422

**Tabla 18.- Datos del ensayo en carga del transformador trifásico**

Se realiza la validación del modelo comparando los datos medidos en el ensayo en carga con los datos mediante la resolución analítica del circuito. La resolución analítica del circuito se hará con la ayuda del simulador desarrollado al efecto, en el que se introducirán los datos del modelo (circuito equivalente) y, en cada caso, los datos de la carga correspondiente (se han transferido los valores por fase).

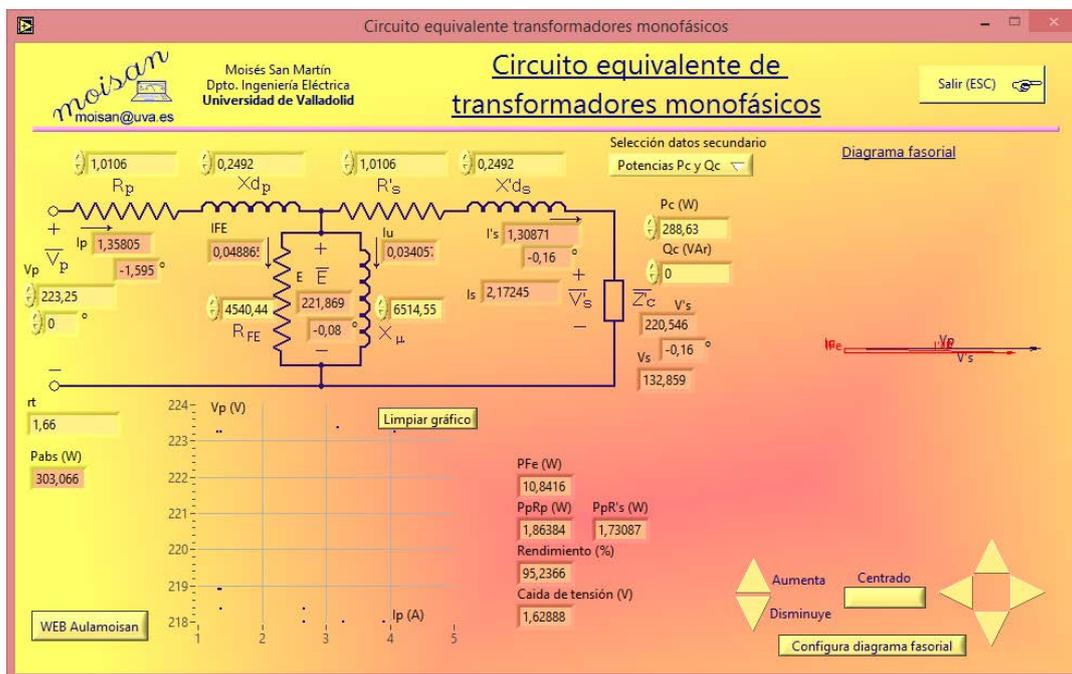


Figura 147.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)

Se acompaña la tabla 19 correspondiente al ensayo en carga de 868 W (288,63 W por cada fase) en el secundario para la que se detallan los valores calculados con el simulador, los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos - tabla 18) y la variación entre unos y otros.

	<b>Ip (A)</b>	<b>Pp (W)</b>	<b>Vs (V)</b>	<b>Is (A)</b>
<b>Simulador (p/fase)</b>	1,358	303,07	132,86	2,173
<b>Ensayo (total)</b>	1,355	906,51	132,79	3,769
<b>Ensayo (p/fase)</b>	1,355	302,17	132,79	2,176
<b>Variación (%)</b>	0,22%	0,29%	-0,53%	-0,13%

Tabla 19.- Resultados para el ensayo en carga de 868 W

Se acompaña la tabla 20 correspondiente al ensayo en carga de 560 W (186,63 W por fase) en el secundario para la que se detallan los valores calculados con el simulador, los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos - tabla 18) y la variación entre unos y otros.

De los resultados de variación entre los datos con el modelo y los datos reales medidos podemos validar el modelo y, por tanto, conocer el funcionamiento del transformador monofásico elegido para cualquier régimen de carga.

	<b>Ip (A)</b>	<b>Pp (W)</b>	<b>Vs (V)</b>	<b>Is (A)</b>
<b>Simulador (p/fase)</b>	0,892	199,06	133,54	1,400
<b>Ensayo (total)</b>	0,891	597,84	133,37	2,424
<b>Ensayo (p/fase)</b>	0,891	199,28	133,37	1,399
<b>Variación (%)</b>	0,11%	-0,11%	0,13%	0,07%

Tabla 20.- Resultados para el ensayo en carga de 560 W

#### 4.3.5.- Desplazamiento de la tensión del neutro en banco trifásico

El sistema de gestión permite, además, la adquisición de datos instantáneos de las distintas variables del sistema (principalmente tensiones y corrientes). En el caso del transformador trifásico se ha realizado la adquisición de datos en un banco trifásico. Se ha realizado un esquema estrella/estrella sin conectar el neutro, y en el secundario se ha conectado una carga monofásica.

En la figura 148 se representa la adquisición de datos de este ensayo. Obsérvese en la tensión entre el neutro de la red y el centro de la estrella de la transformación que aparece una tensión de tercer armónico (frecuencia de 150 HZ).

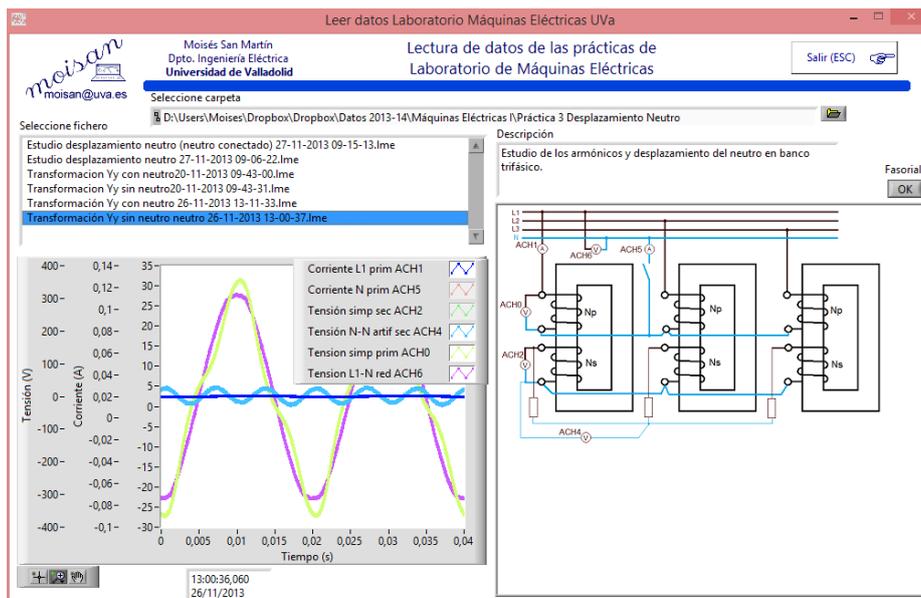


Figura 148.- Desplazamiento de la tensión de neutro en banco trifásico (Fuente: Elaboración propia)

### 4.3.6.- Determinación experimental del índice horario

El sistema de gestión permite, además, la adquisición de datos instantáneos de las distintas variables del sistema (principalmente tensiones y corrientes). En el caso del transformador trifásico se ha realizado también la adquisición de datos correspondiente a la determinación del Índice Horario (desfase entre tensiones del primario y del secundario) de un transformador trifásico (figura 149).

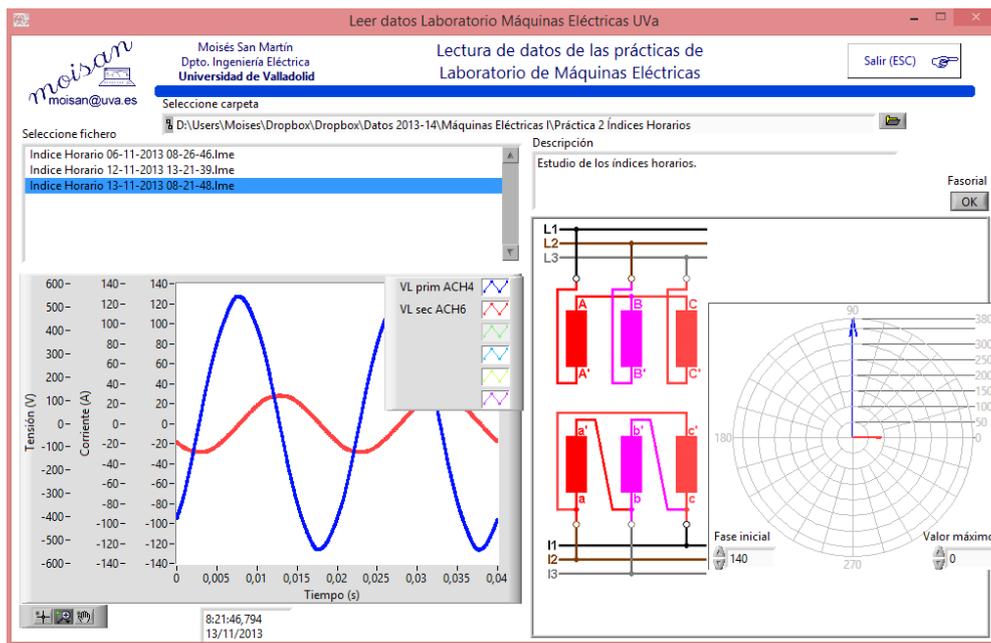


Figura 149.- Determinación experimental de Índice Horario (Fuente: Elaboración propia)

### Simulador para la determinación de índice horario

Otro de los fenómenos objeto de estudio en el ámbito de esta Tesis ha sido el Índice Horario en transformaciones trifásicas, es decir el conocimiento del ángulo de desfase entre tensiones primarias y secundarias.

Se ha generado un software simulador que visualiza el procedimiento para la determinación del índice horario. Se inicia el software con la pantalla inicial mostrada en la figura 150.

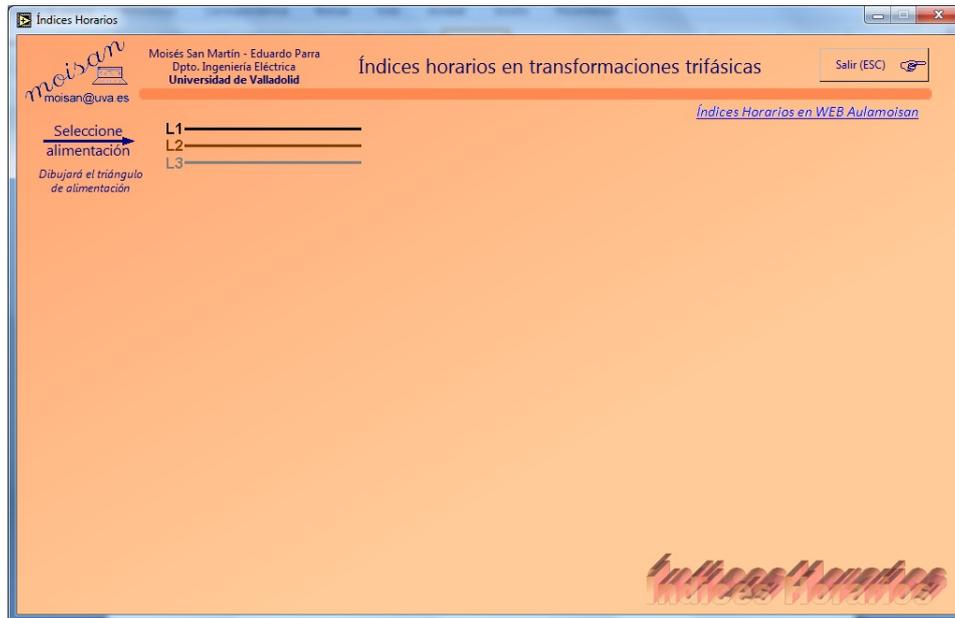


Figura 150.- Pantalla inicial. Índices Horarios (Fuente: Elaboración propia)

En primer lugar se deberá seleccionar la alimentación entre las posibles (véase la figura 151) pulsando con el botón izquierdo del ratón en las tres líneas de alimentación.

Una vez seleccionada la alimentación se representará el triángulo de tensiones. A continuación se deberá seleccionar la conexión del primario entre las que propone el programas (figura 152):

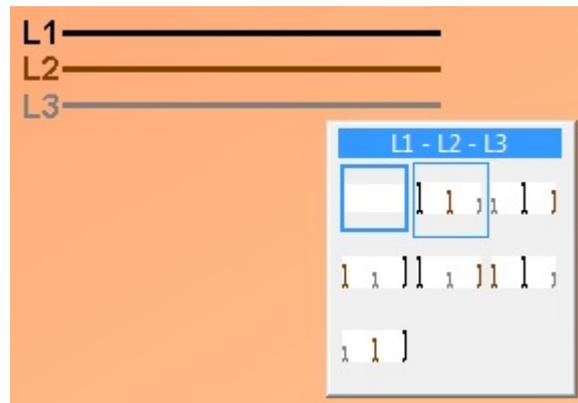


Figura 151.- Índices horarios. Selección alimentación

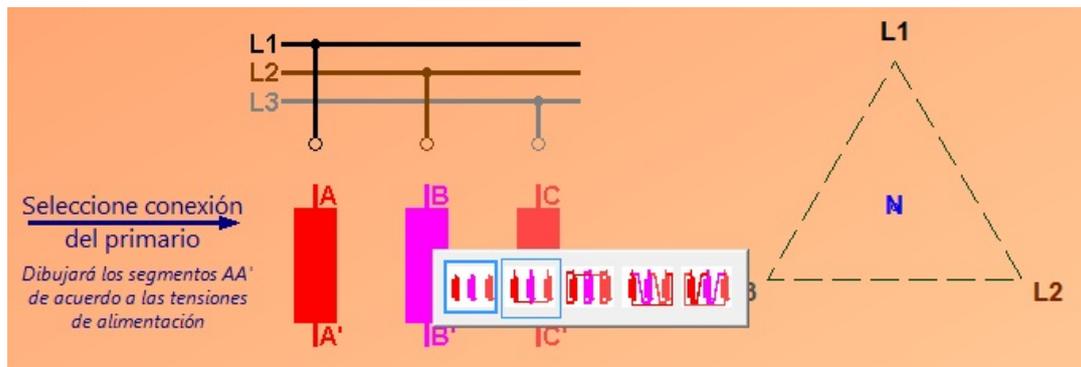


Figura 152.- Índices horarios. Selección de la conexión del primario (Fuente: Elaboración propia)

Una vez seleccionada la conexión del primario, en el triángulo se representarán las tensiones de cada una de las bobinas del primario del transformador, y también las del secundario, que serán paralelas a aquellas (figura 153).

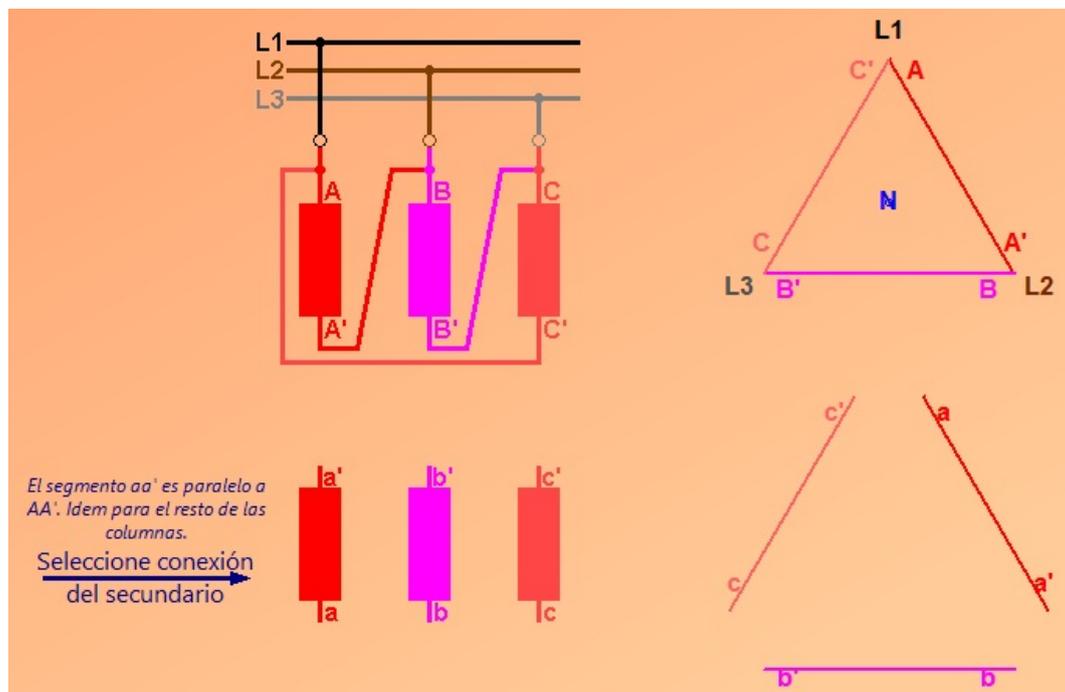


Figura 153.- Índices horarios. Representación tensiones primario y secundario (Fuente: Elaboración propia)

Posteriormente se seleccionará la conexión del secundario, que interconectará los segmentos correspondientes a las tensiones del secundario. En este caso podremos elegir entre conexiones en estrella, triángulo y zigzag (figura 154).

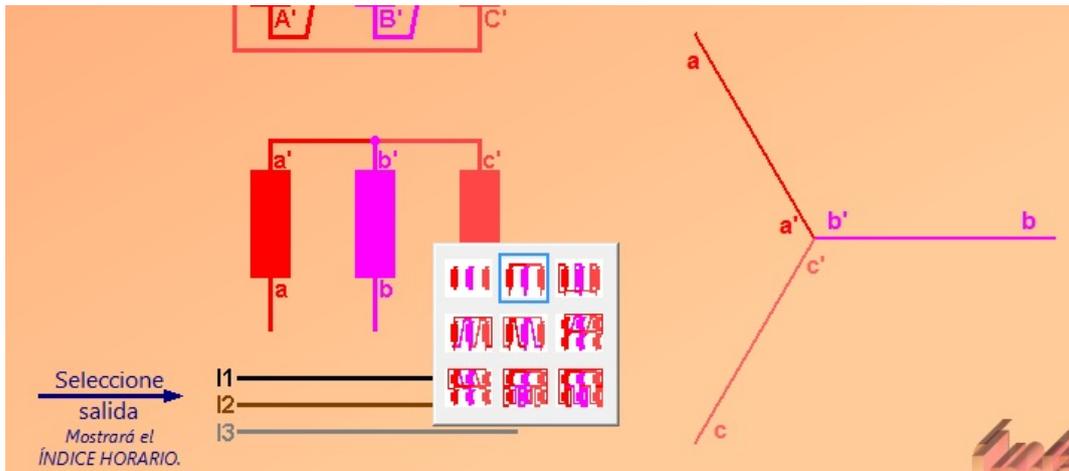


Figura 154.- Índices horarios. Selección conexión secundario (Fuente: Elaboración propia)

Solamente queda elegir la conexión de las líneas de salida del secundario que determinará el índice horario, es decir, el desfase entre las tensiones (simples y compuestas) entre las líneas de entrada del primario y las del secundario (figura 155).

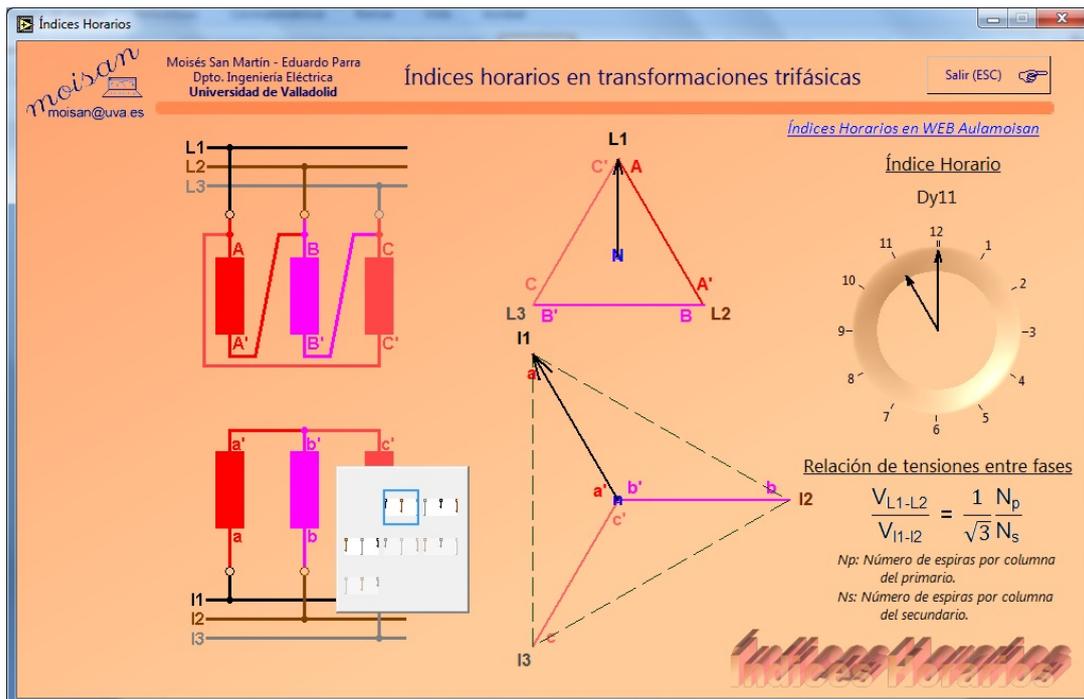


Figura 155.- Índices horarios. Resultado (Fuente: Elaboración propia)

Además del índice horario, el programa indica la relación entre tensiones de línea (entrada y salida).

## 4.4- Aplicación herramienta a máquina de inducción

### 4.4.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar

#### Elementos de la máquina asíncrona

El motor asíncrono trifásico se fundamenta en el teorema de Ferraris: Al conectar un devanado trifásico a una red trifásica equilibrada de tensiones se establece un campo magnético giratorio de amplitud constante y cuya variación es espacial. La velocidad de variación del campo magnético es igual a la velocidad de sincronismo  $n_s$ .

Esta velocidad de sincronismo se determina a partir de la frecuencia, que es el número de ciclos por segundo. Por tanto, para una máquina de dos polos, un ciclo se produce en cada vuelta por tanto la frecuencia es también el número de vueltas por segundo. En el caso de que la máquina tenga 4 polos, un ciclo completo se repite cada media vuelta, por lo que la velocidad será la mitad de la frecuencia. Generalizando este resultado llegamos a que la velocidad en revoluciones por segundo (9) vale:

$$n_s \text{ (r.p.s.)} = \frac{f}{p} \quad (9)$$

siendo  $n_s$ (r.p.s): la velocidad síncrona en revoluciones por segundo,

f: la frecuencia de la tensión aplicada en Hz y

p: el número de pares de polos.

Si trabajamos con la unidad más habitual de velocidad, revoluciones por minuto (r.p.m.), deberemos expresarlo como aparece en la siguiente ecuación (10):

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (10)$$

siendo  $n_s$ : la velocidad síncrona en revoluciones por minuto (r.p.m.),

El flujo producido por ese campo magnético llega al inducido y, por la variación de flujo en el tiempo (ley de Faraday y de Lenz), se inducen fuerzas electromotrices en el inducido (es por esto que también se la llama máquina de inducción), según la citada ley (11):

$$F.e.m. = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (11)$$

Téngase en cuenta que sólo se generan estas fuerzas electromotrices cuando la velocidad del campo magnético giratorio (velocidad síncrona) es distinta de la

velocidad de giro del rotor, dado que el campo magnético que se produce es espacial. Si el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético giratorio, no habrá variación de flujo en el rotor. Es por ello que a esta máquina se la denomina máquina asíncrona, es decir, máquina cuya velocidad de giro es siempre distinta de la de sincronismo.

Si el devanado del rotor está cerrado (mediante cortocircuito o resistencias), se establecerán corrientes  $I_i$  por sus devanados. Estas corrientes, dentro del campo magnético giratorio de inducción  $B_{exc}$  producen una fuerza magnética que viene dada por la (12).

$$F = \int_L I_i \cdot d\vec{l} \times \vec{B}_{exc} \quad (12)$$

Estas fuerzas originan el par que hace que se mueva el rotor hasta alcanzar la velocidad de equilibrio.

Una vez visto el fundamento de la máquina asíncrona, hacemos un análisis en régimen permanente, que se realiza a partir de las curvas características. Estas curvas características representan las magnitudes de par, potencia, intensidad, factor de potencia, etc. en función de la velocidad.

Estas curvas se obtienen a partir del circuito equivalente del motor asíncrono (en régimen permanente), con los mismos ensayos que en el transformador: vacío y cortocircuito. Véase en la figura 156 el circuito equivalente.

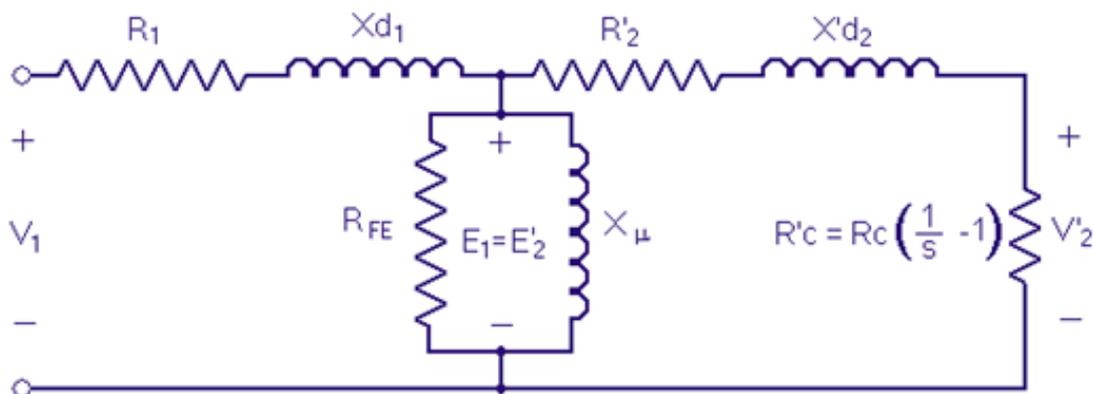


Figura 156.- Circuito equivalente de máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 157 tenemos las curvas características de un motor asíncrono trifásico de potencia 10 kW, tensiones 220/380 V, frecuencia 50 Hz y 2 polos (velocidad de sincronismo = 3000 rpm).

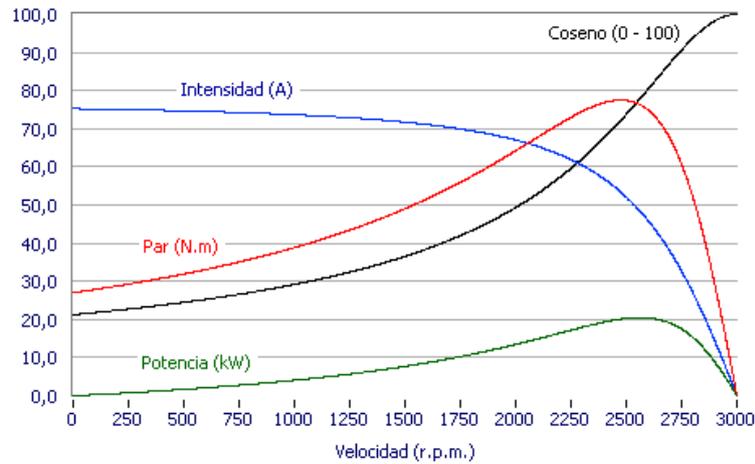


Figura 157.- Curvas características motor de inducción (Fuente: Elaboración propia)

### Diagrama fasorial y diagrama del círculo de la máquina asíncrona

En este apartado se analizará la máquina a partir del diagrama fasorial de los dos modos de funcionamiento: como motor y como generador.

La figura 158 representa el diagrama fasorial de la máquina funcionando como motor, en el que se puede observar que la intensidad está en retraso respecto a la tensión (absorbe energía reactiva inductiva, necesaria para la producción del flujo magnético).



Figura 158.- Diagrama fasorial de la máquina funcionando como motor (Fuente: Elaboración propia)

En el funcionamiento como generador, el ángulo de desfase entre tensión e intensidad es mayor de  $90^\circ$ . En este caso, también la máquina consume energía reactiva inductiva, pues la necesita para la producción del flujo magnético. (La figura 159 representa el diagrama fasorial de la máquina funcionando como generador).

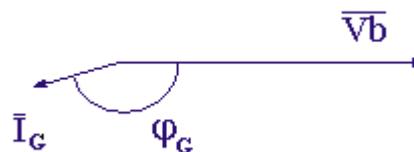


Figura 159.- Diagrama fasorial de la máquina funcionando como alternador (Fuente: Elaboración propia)

Recordemos ahora, que el lugar geométrico de la intensidad en una máquina síncrona es un círculo, lo que se conoce como **diagrama del círculo**. Efectivamente, si giramos 90° las figuras anteriores, tendremos dos puntos de funcionamiento de esta máquina. El lugar geométrico completo corresponde al diagrama representado en la figura 160.

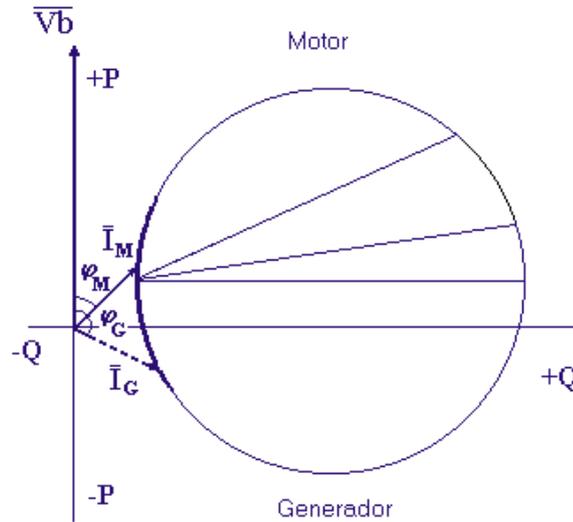


Figura 160.- Diagrama del círculo de una máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

En los ejes vertical y horizontal tenemos representada la componente activa de la intensidad ( $I \cos \varphi$ ) y la componente reactiva ( $I \sin \varphi$ ).

Dado que las potencias activa  $P$  y reactiva  $Q$  vienen dadas por las fórmulas siguientes (13 y 14):

$$P = V_b \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

$$Q = V_b \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (14)$$

y la tensión “ $V_b$ ” (tensión de fase de la red) es constante, los ejes vertical y horizontal representan (a escala diferente) las potencias activa y reactiva, respectivamente.

El eje horizontal de potencia nula divide al círculo en dos mitades: en la parte superior ( $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ,  $\cos \varphi > 0$ , potencia positiva) la máquina funciona como motor, y en la parte inferior ( $\varphi > 90^\circ$ ,  $\cos \varphi < 0$ , potencia negativa), la máquina trabaja como generador.

Se ha marcado en el círculo con trazo más grueso los puntos de funcionamiento en régimen permanente.

### Utilización de la máquina asíncrona como alternador

Esta máquina es utilizada frecuentemente como **motor**, pero también se usa (aunque en menor medida) en minicentrales hidroeléctricas, funcionando como generador. En el análisis de utilizaremos la notación de motor, es decir, potencias positivas serán potencias consumidas, y potencias negativas serán potencias generadas.

El acoplamiento de la máquina a la red es tan sencillo como conectarlo mediante un interruptor de acoplamiento. Una vez conectado, en el devanado trifásico se produce el campo magnético giratorio (teorema de Ferraris) que realiza el intercambio entre energías eléctrica y mecánica. Para aportar energía se deberá aumentar la velocidad con el motor de arrastre (motor primario o de accionamiento).

Las curvas características completas, considerando también la parte de generación, están representadas en la figura 161:

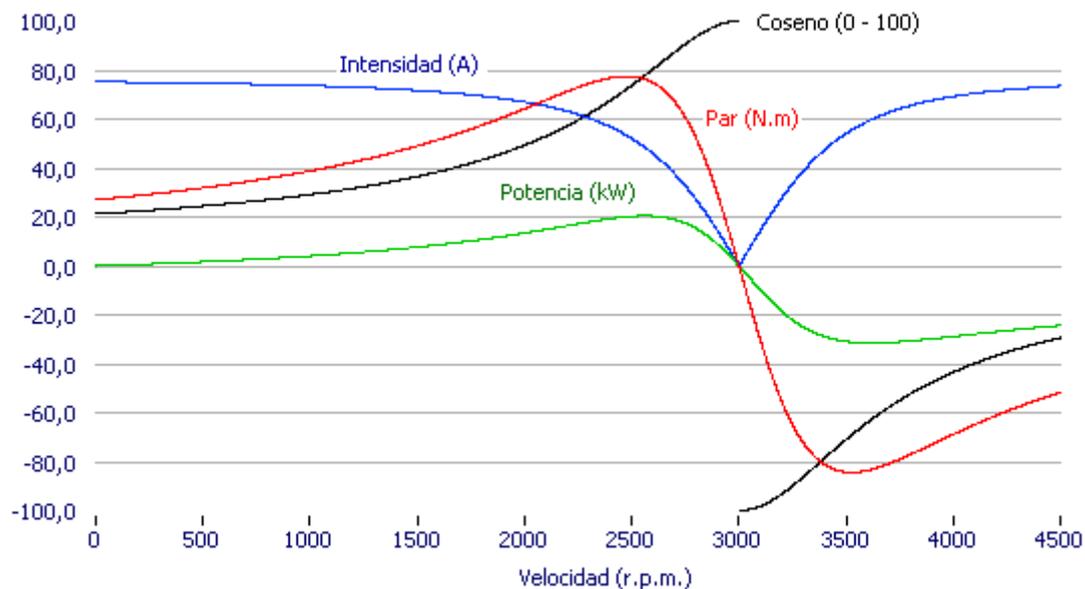


Figura 161.- Curvas características máquina asíncrona (motor y alternador) (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.2.- Máquina asíncrona de rotor de jaula de ardilla ensayada

Se presenta la figura 162 con la máquina asíncrona ensayada, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3 KW
- Tensión nominal: 380/660 V
- Corriente nominal: 6,3/3,65 A
- Factor de potencia: 0,85
- Velocidad: 1.450 r.p.m.



Figura 162.- Máquina asíncrona de rotor de jaula ensayada (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.3.- Adquisición de datos y determinación del modelo

Se ha procedido a implementar el sistema de gestión y control a la máquina mencionada procediendo a realizar una adquisición de datos en el funcionamiento de la misma (arranque, funcionando como motor y funcionando como alternador).

En la figura 163 se representa la potencia absorbida frente a la velocidad.

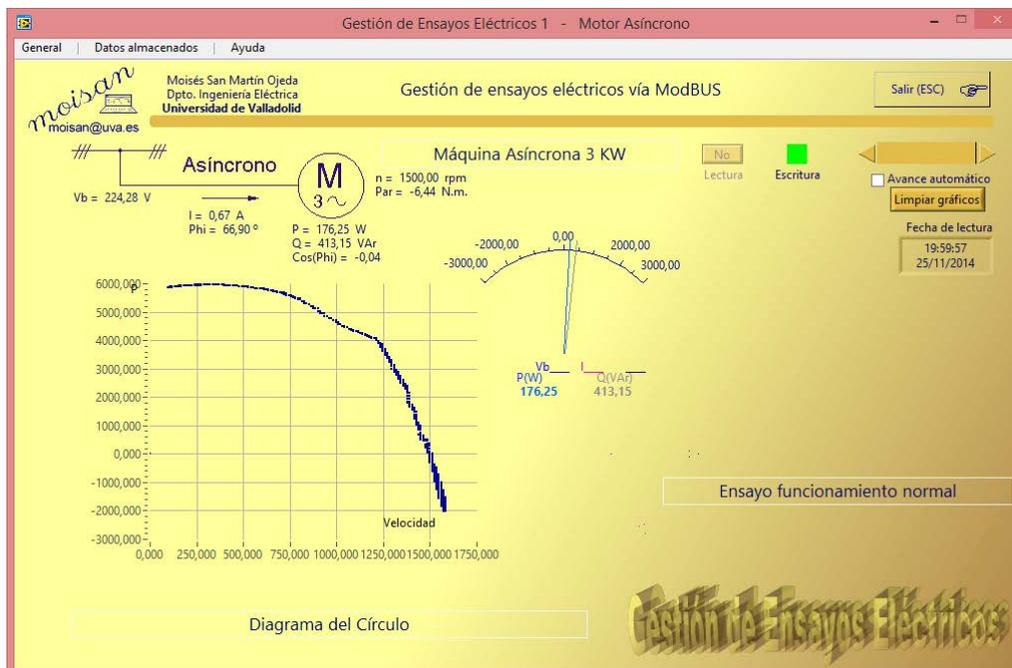


Figura 163.- Curva potencia absorbida frente a la velocidad (Fuente: Elaboración propia)

Otras curvas experimentales se pueden obtener a partir de los datos adquiridos. En la figura 164 se representa la corriente absorbida frente a la velocidad.

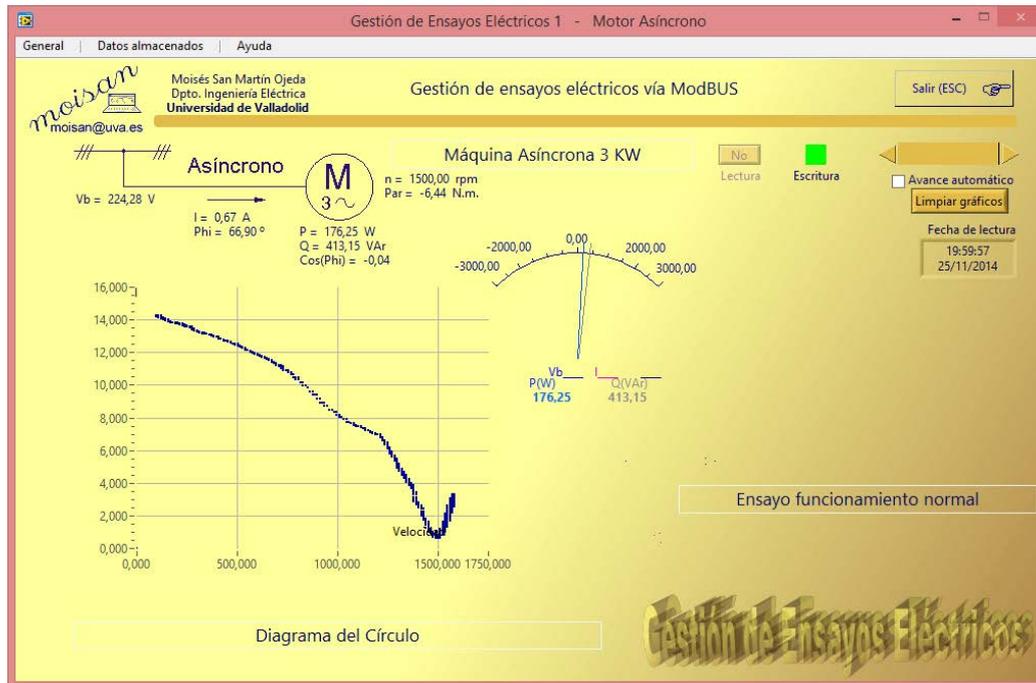


Figura 164.- Curva corriente frente a velocidad de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 165 se representa la potencia reactiva frente a la velocidad.

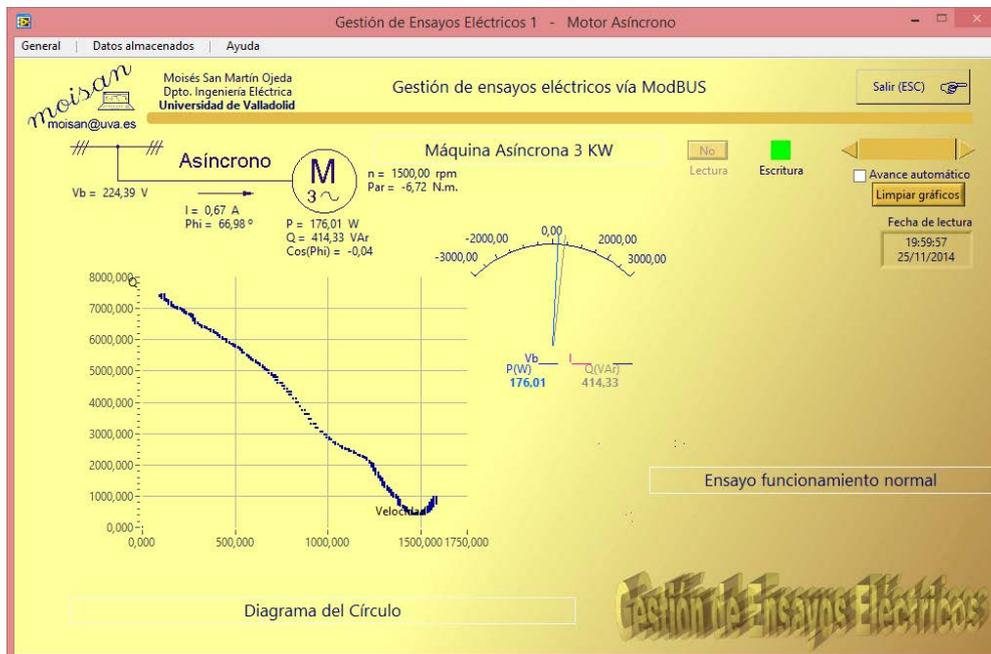


Figura 165.- Curva potencia reactiva frente a velocidad de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

Además, en la representación de la potencia activa frente a la reactiva se obtiene el arco del llamado diagrama del círculo (véase la figura 166).

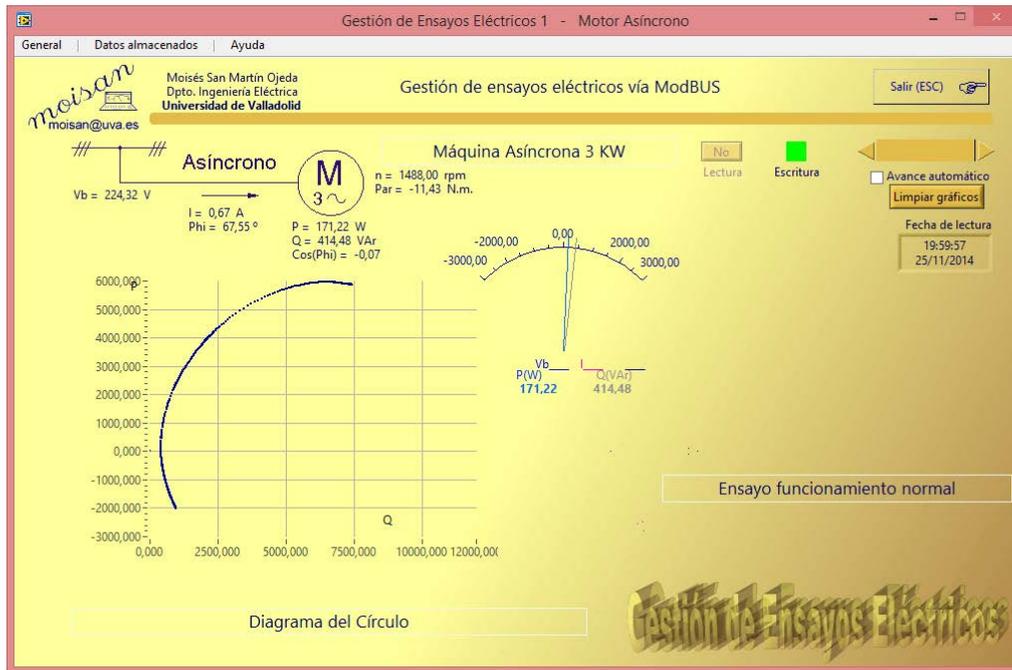


Figura 166.- Diagrama del círculo de una máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

Exportando los datos a Excel podemos observar que se han adquirido un total de 4.286 estados de funcionamiento (tabla 21).

#	Vb	I	P	Q	Velocidad	Fecha	Hora
1	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23
2	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23
3	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23
4	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23
5	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23
6	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
7	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
8	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
9	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
10	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
11	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23
12	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:23
...							
...							
...							
4285	224,28	0,668	176,25	413,15	1488	25/11/2014	19:59:57
4286	224,32	0,667	171,22	414,48	1488	25/11/2014	19:59:57

Tabla 21.- Datos del diagrama del círculo exportados a Excel

#### 4.4.4.- Análisis de los datos adquiridos

De los datos adquiridos en el funcionamiento habitual de la máquina podemos conocer el comportamiento de la máquina en cualquier régimen de funcionamiento.

Para ello se buscan dos puntos de funcionamiento específicos: el punto de funcionamiento en rotor bloqueado, y el punto de funcionamiento en vacío.

Buscamos el punto de funcionamiento en rotor bloqueado que se produce en el momento en el que se conecta la máquina a la red (véase la figura 167).

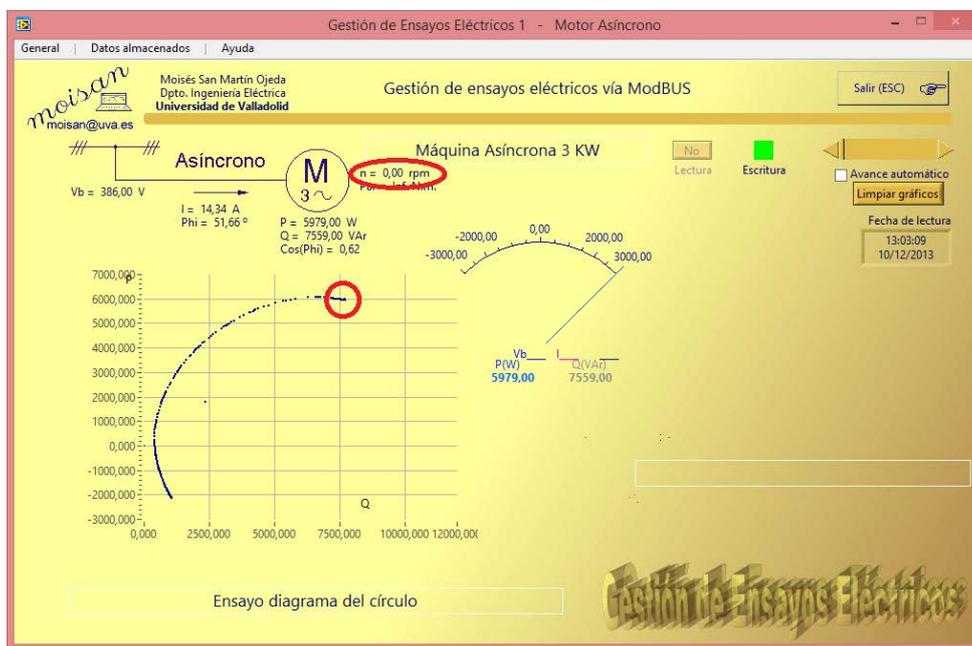


Figura 167.- Funcionamiento de la máquina en rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)

De estos puntos de funcionamiento se va a obtener la rama serie del circuito equivalente utilizado como modelo en esta máquina de inducción (véase la figura 168).

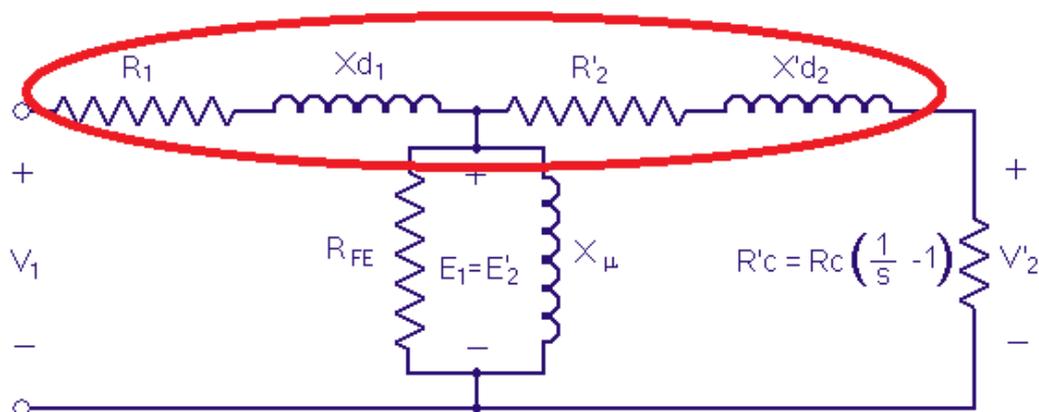


Figura 168.- Rama serie obtenida a partir del funcionamiento en rotor bloqueado (Fuente: Elaboración propia)



Se representa en la tabla 22 los valores obtenidos de velocidad nula. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Para ello se deberá tener en cuenta que la potencia activa absorbida corresponde a tres veces la consumida por las resistencias ( $R_{cc} = R_1 + R'_2$ ), y la potencia reactiva absorbida corresponde a tres veces la consumida por las reactancias ( $X_{cc} = X_{d1}$  y  $X'_{d2}$ ).

#	Vb	I	P	Q	Velocidad	Fecha	Hora	Rcc	Xcc
1	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23	9,38	16,98
2	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23	9,38	16,98
3	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23	9,38	16,98
4	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23	9,38	16,98
5	222,13	11,452	3689,53	6680,51	0	25/11/2014	19:56:23	9,38	16,98
6	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
7	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
8	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
9	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
10	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
11	221,19	14,411	5835,31	7576,49	0	25/11/2014	19:56:23	9,37	12,16
12	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:23	9,40	12,17
13	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:23	9,40	12,17
14	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:24	9,40	12,17
15	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:24	9,40	12,17
16	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:24	9,40	12,17
17	221,19	14,381	5831,94	7553,50	0	25/11/2014	19:56:24	9,40	12,17
18	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
19	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
20	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
21	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
22	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
23	221,15	14,367	5831,38	7539,75	0	25/11/2014	19:56:24	9,42	12,18
...									
...									
...									
71	221,25	14,289	5852,69	7463,57	0	25/11/2014	19:56:26	9,55	12,18
72	221,25	14,289	5852,69	7463,57	0	25/11/2014	19:56:26	9,55	12,18
73	221,25	14,289	5852,69	7463,57	0	25/11/2014	19:56:26	9,55	12,18
74	221,25	14,289	5852,69	7463,57	0	25/11/2014	19:56:27	9,55	12,18
75	221,25	14,289	5852,69	7463,57	0	25/11/2014	19:56:27	9,55	12,18

Tabla 22.- Valores obtenido de la máquina con rotor bloqueado

Con todos estos puntos de funcionamiento es posible determinar el valor medio de  $R_{cc} = 9,469 \Omega$  y  $X_{cc} = 12,180 \Omega$ .

La resistencia del estator se puede medir de forma directa resultando un valor  $R_1 = 4,51 \Omega$ . Por lo tanto resulta un valor  $R'_2$  igual a  $4,959 \Omega$ .

Las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'd_2$  correspondientes al modelo de dispersión de flujo en los devanados del estator y rotor respectivamente se divide a la mitad, dado que en el modelo de circuito equivalente con la reducción del rotor al estator se considera igual número de espiras en estator y rotor. Por lo tanto, si  $X_{cc} = 12,180 \Omega$  se obtiene que  $X_{d1} = X'd_2 = 6,09 \Omega$ . Si consideramos los coeficientes de autoinducción (a la frecuencia de 50 Hz) resulta  $L_{d1} = L'd_2 = 19,385 \text{ mH}$ .

El punto de funcionamiento en vacío corresponde a la máquina trabajando a su velocidad de sincronismo (véase la figura 169).

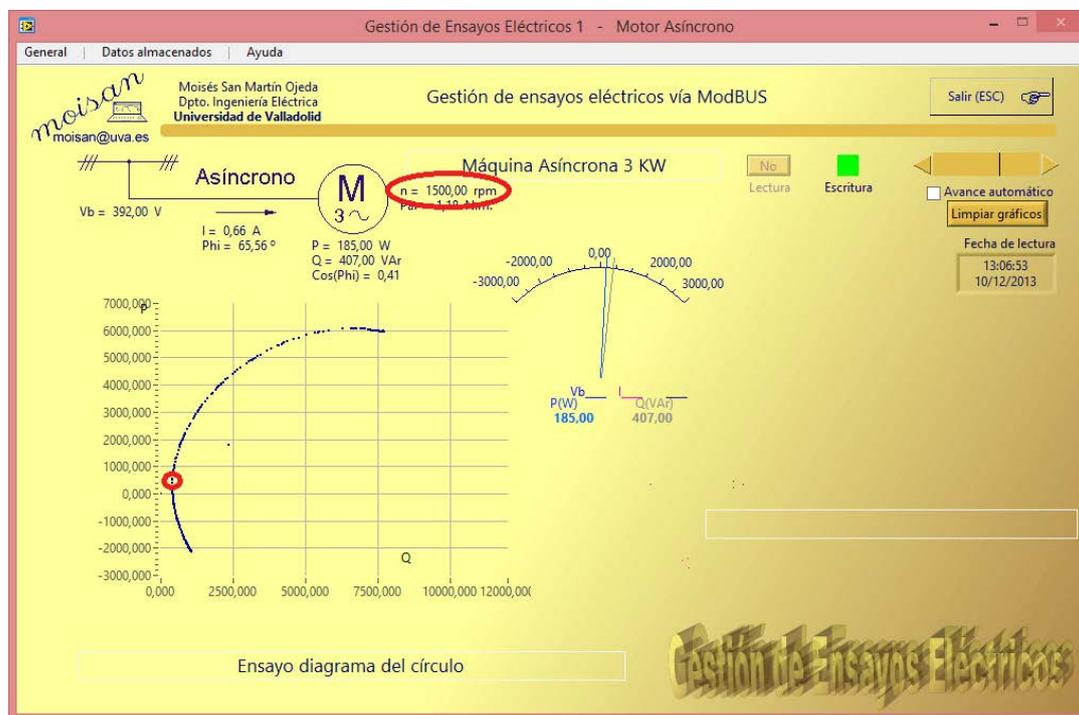


Figura 169.- Funcionamiento en vacío de la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

Del funcionamiento en vacío se obtiene la rama paralelo del circuito equivalente, sabiendo que las potencias absorbidas (activa y reactiva) en vacío corresponde a tres veces la consumida por la resistencia  $R_{FE}$  y la reactancia  $X_{\mu}$  respectivamente (véase la figura 170).

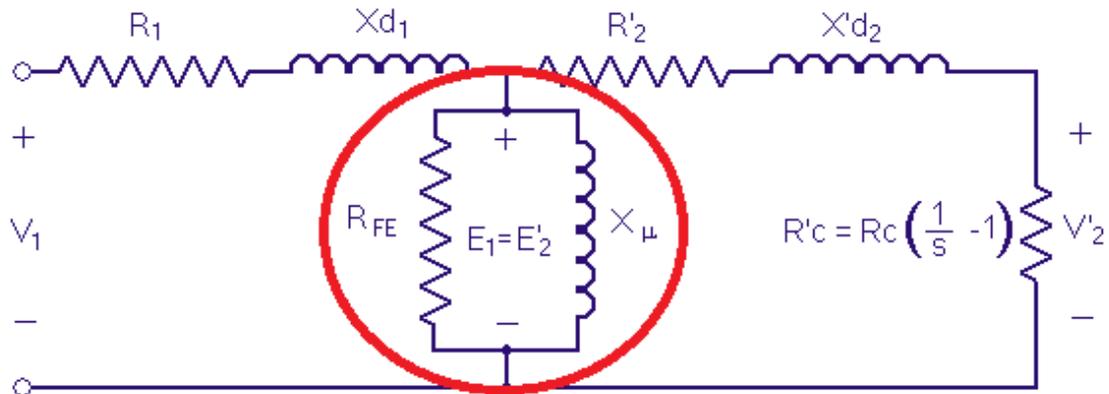


Figura 170.- Rama paralelo obtenida a partir del funcionamiento en vacío (Fuente: Elaboración propia)

Se representa en las siguientes figuras los valores obtenidos de velocidad de sincronismo. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$  (tabla 23).

#	Vb	I	P	Q	Velocidad	Fecha	Hora	Rfe	Xn
3775	224,24	0,654	160,07	409,31	1500	25/11/2014	19:59:32	942,41	368,55
3776	224,24	0,654	160,07	409,31	1488	25/11/2014	19:59:32	942,41	368,55
3777	224,24	0,654	160,07	409,31	1500	25/11/2014	19:59:32	942,41	368,55
3778	224,24	0,654	160,07	409,31	1500	25/11/2014	19:59:32	942,41	368,55
3779	224,24	0,654	160,07	409,31	1500	25/11/2014	19:59:32	942,41	368,55
3780	224,22	0,669	182,93	410,86	1488	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3781	224,22	0,669	182,93	410,86	1500	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3782	224,22	0,669	182,93	410,86	1500	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3783	224,22	0,669	182,93	410,86	1500	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3784	224,22	0,669	182,93	410,86	1488	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3785	224,22	0,669	182,93	410,86	1500	25/11/2014	19:59:32	824,48	367,09
3786	224,30	0,656	157,77	412,01	1500	25/11/2014	19:59:32	956,64	366,32
3787	224,30	0,656	157,77	412,01	1500	25/11/2014	19:59:32	956,64	366,32
3788	224,30	0,656	157,77	412,01	1488	25/11/2014	19:59:32	956,64	366,32
3789	224,30	0,656	157,77	412,01	1500	25/11/2014	19:59:33	956,64	366,32
...									
...									
...									
4277	224,28	0,668	176,25	413,15	1500	25/11/2014	19:59:57	856,18	365,24
4278	224,28	0,668	176,25	413,15	1500	25/11/2014	19:59:57	856,18	365,24
4279	224,28	0,668	176,25	413,15	1500	25/11/2014	19:59:57	856,18	365,24
4280	224,28	0,668	176,25	413,15	1488	25/11/2014	19:59:57	856,18	365,24
4281	224,32	0,667	171,22	414,48	1488	25/11/2014	19:59:57	881,64	364,20

Tabla 23.- Valores obtenido de la máquina a velocidad de sincronismo

Con estos puntos es posible determinar el valor medio de  $R_{FE} = 864,74 \Omega$  y de  $X_{\mu} = 366,51 \Omega$ . Es decir, se obtiene un valor de pérdidas en el hierro  $R_{FE} = 864,74 \Omega$  y un valor reactancia magnetizante característica del flujo útil  $X_{\mu} = 366,51 \Omega$  (o como coeficiente de autoinducción, considerando que el ensayo se ha realizado a la frecuencia de 50 Hz, de  $L_{\mu} = 1,1666 \text{ H}$ ).

A partir de estos resultados del circuito equivalente, y con el mismo software, es posible obtener otras curvas ahora con variables calculadas. Por ejemplo tenemos en la figura 171 la representación de la potencia útil frente a la velocidad.

Con estos datos vamos a conocer el comportamiento de la máquina para cualquier régimen de funcionamiento, mediante el simulador de la máquina de inducción explicado a continuación.

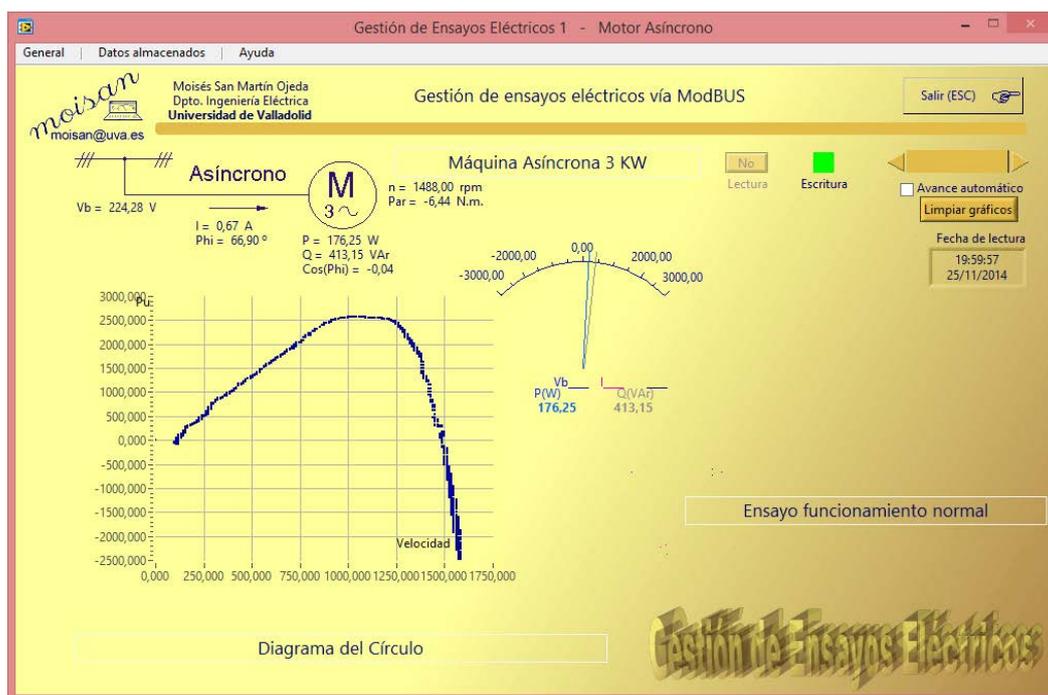


Figura 171.- Potencia útil frente a la velocidad en la máquina asíncrona (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.4.1.-Aplicación de los datos de adquisición al simulador de máquinas

Se ha generado un simulador para determinar el comportamiento de una máquina asíncrona trifásica (o de inducción). El modelo elegido ha sido el de circuito equivalente.

Continuando con los datos adquiridos en la adquisición y llevados al simulador comprobamos la validez del modelo a partir del diagrama del círculo obtenido. Se representa en la figura 172 el simulador a partir de los parámetros calculados y se ha superpuesto en la parte derecha los puntos obtenidos en la adquisición correspondientes al diagrama del círculo.

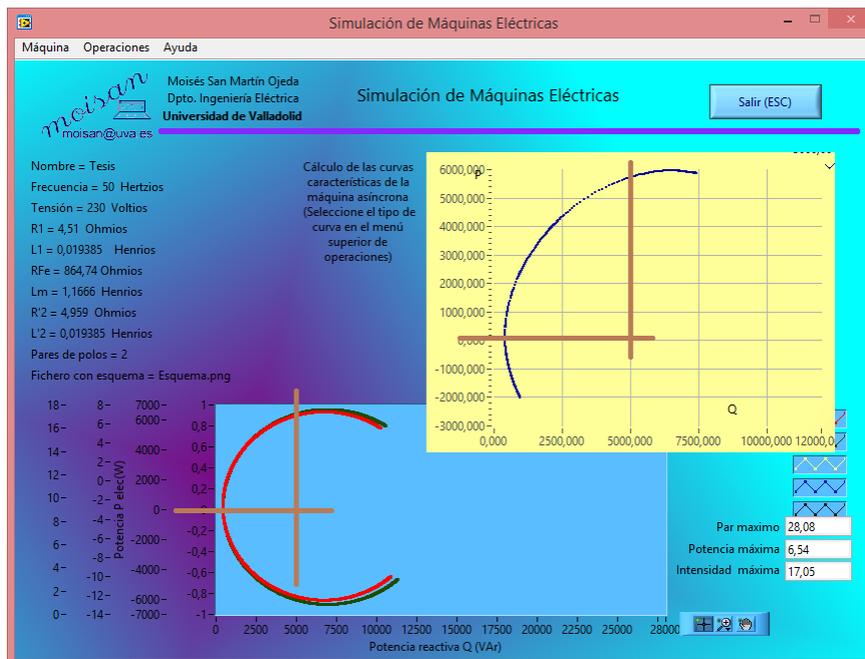


Figura 172.- Diagrama del círculo con los datos adquiridos (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.4.2.-Nueva herramienta de aprendizaje

El conjunto de los datos adquiridos junto al simulador, proporcionan nuevas herramientas de aprendizaje que permiten analizar el comportamiento de la máquina. Por ejemplo, se pueden conocer las curvas características del funcionamiento de esta máquina de inducción como motor, alternador y freno (véase la figura 173).

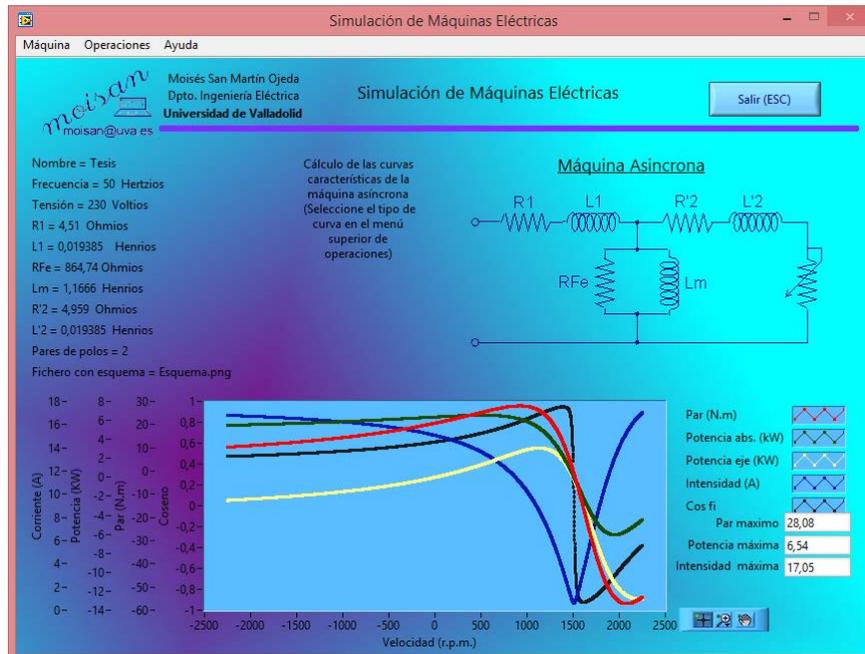


Figura 173.- Curvas características de la máquina ensayada (Fuente: Elaboración propia)

Incluso es posible conocer el funcionamiento de esta máquina conectada a un variador de velocidad de control escalar (véase la figura 174).

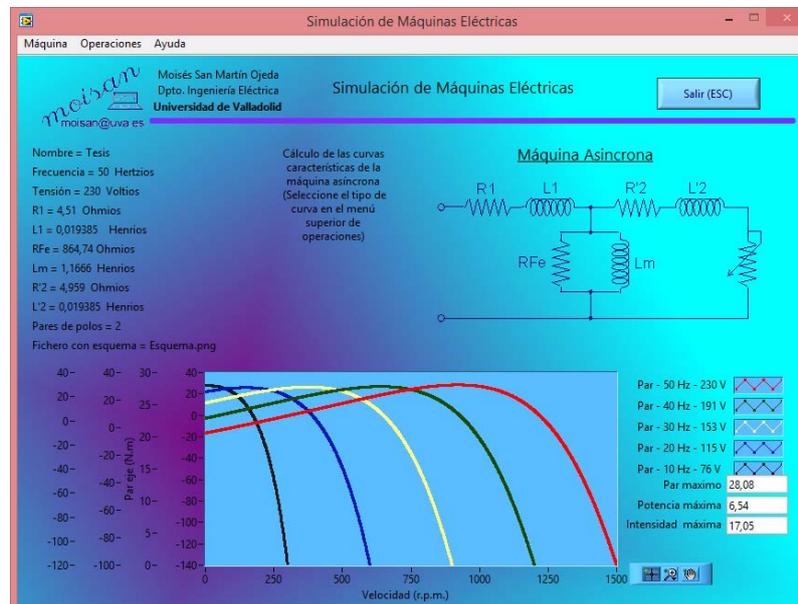


Figura 174.- Curvas características de la máquina ensayada (control escalar) (Fuente: Elaboración propia)

Además, se puede analizar su comportamiento ante variaciones de las características de funcionamiento. Se presenta en la figura 175 la variación del comportamiento ante variación en la resistencia del rotor. Se ha superpuesto en la parte superior derecha el resultado obtenido anteriormente y se ha marcado en la curva de par el valor de velocidad en el que se obtiene el par máximo.

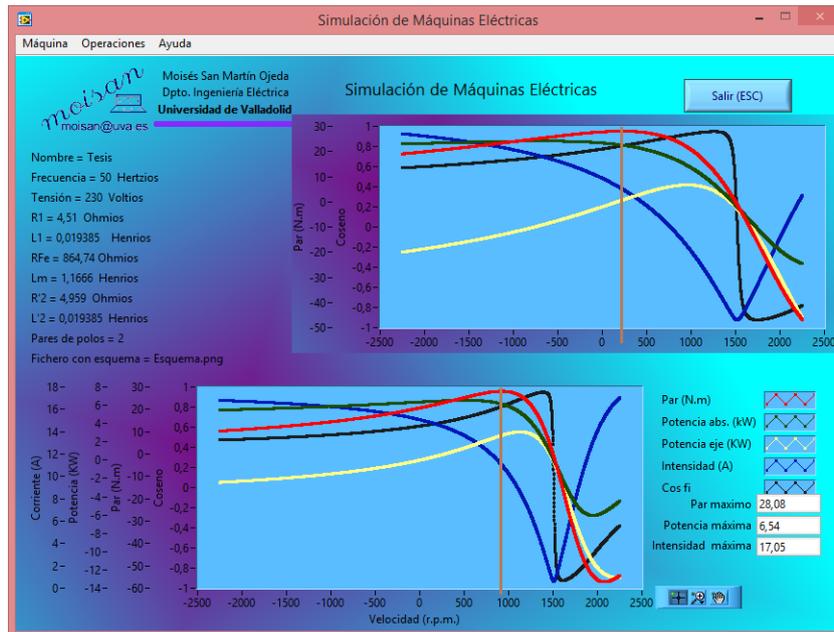


Figura 175.- Estudio ante variaciones de la resistencia del rotor (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.5.- Máquina asíncrona de rotor bobinado ensayada

Se presenta, a continuación la figura 176 con la máquina asíncrona ensayada, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3 KW
- Tensión nominal: 220/380 V
- Corriente nominal: 11,8/6,8 A
- Rotor: 115 V - 1,5 A
- Velocidad: 1.450 r.p.m.



Figura 176.- Máquina asíncrona de rotor bobinado ensayada (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.6.- Adquisición de datos de corrientes en estator y rotor

Se ha procedido a implementar el sistema de gestión y control a la máquina mencionada procediendo a realizar una adquisición de datos que adquiriera las corrientes de estator y rotor en el momento del arranque de la máquina funcionando como motor (véase la figura 177).

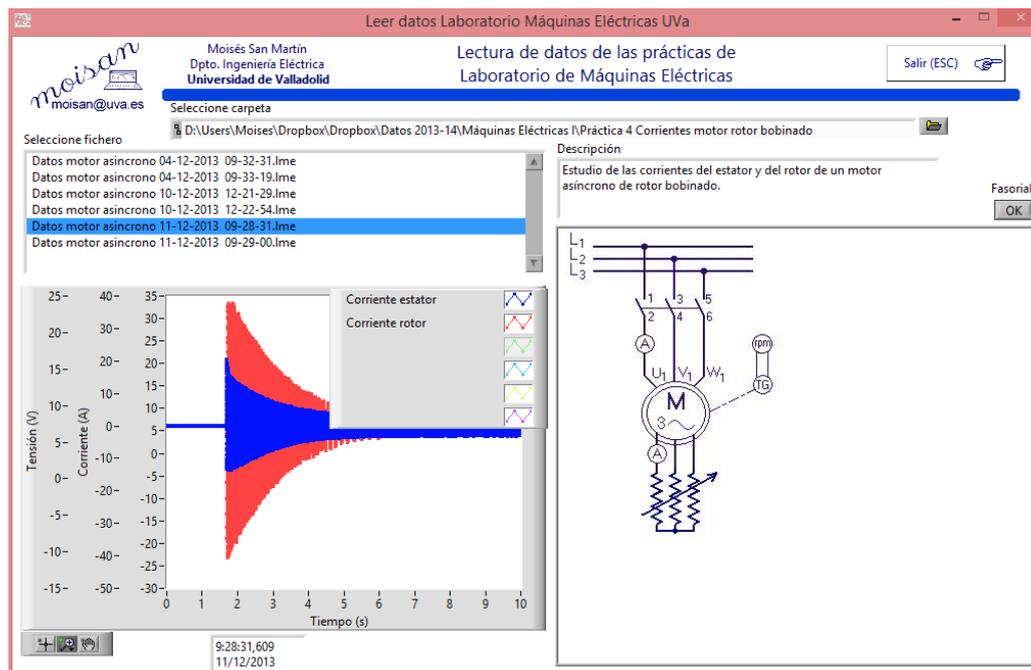


Figura 177.- Corrientes de estator y rotor 1 (Fuente: Elaboración propia)

En estas figuras es posible analizar la frecuencia de las corrientes del rotor (la del estator corresponde a la frecuencia de la red), y determinar tanto su deslizamiento como la velocidad de funcionamiento (figura 178).

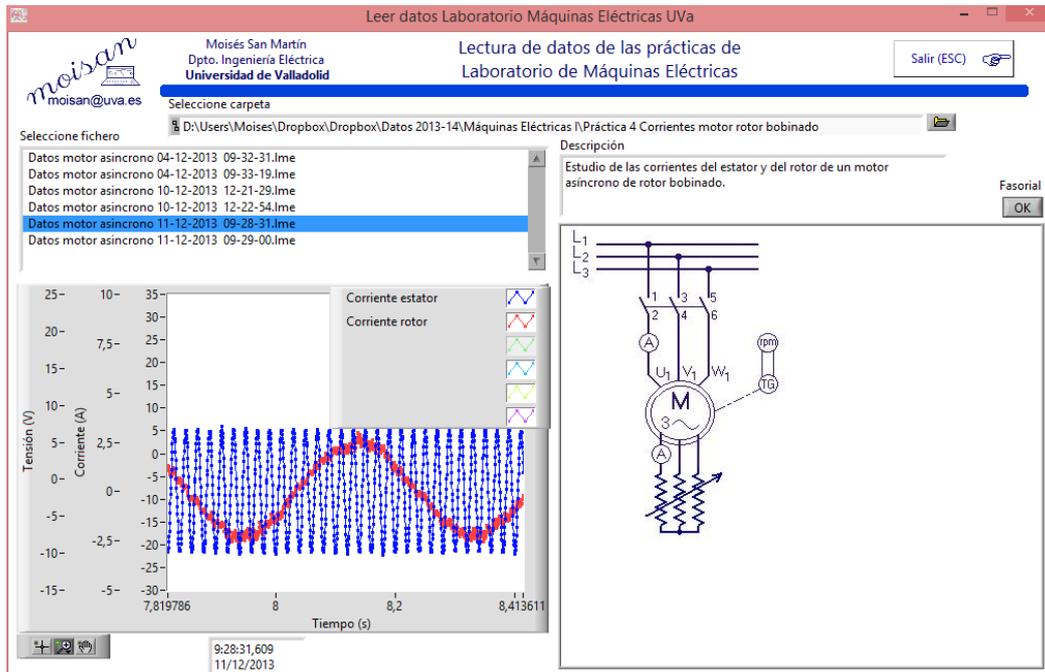


Figura 178.- Corrientes de estator y rotor 2 (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.7.- Determinación del momento de inercia

Con el sistema de gestión y control se ha determinado el momento de inercia (véase la figura 179).

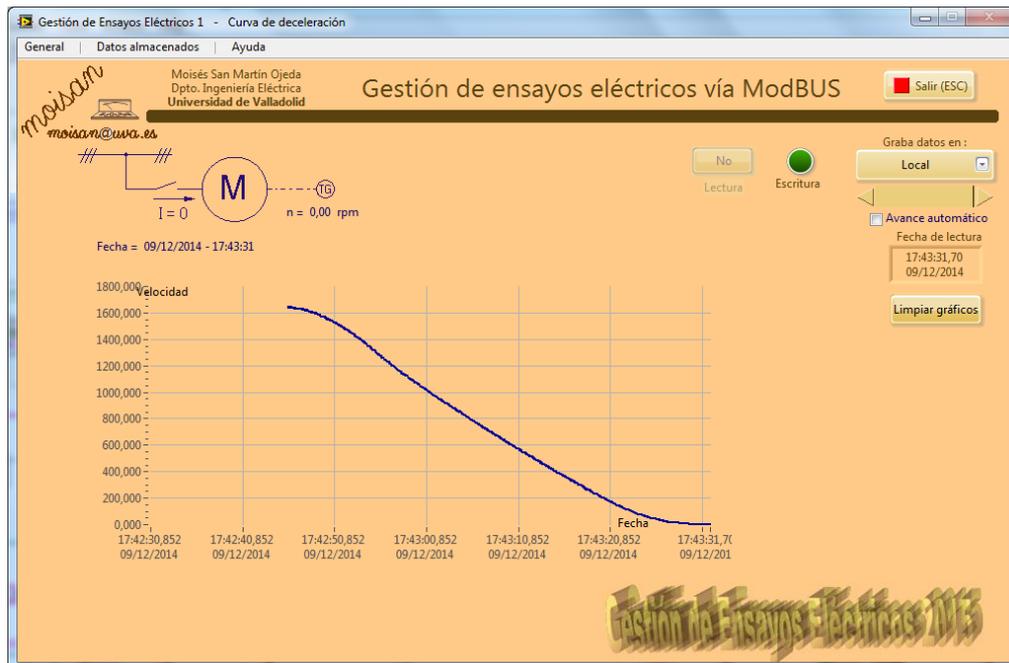


Figura 179.- Determinación del momento de inercia (Fuente: Elaboración propia)

El **Momento de Inercia** se determina experimentalmente mediante el ensayo de deceleración UNE 60034-2 [215]. Este **Método de deceleración** consiste en medir el tiempo de deceleración entre dos velocidades predeterminadas entre  $n(1+\delta)$  y  $n(1-\delta)$  (p.ej. de 110% a 90% ó de 105% a 95%). Se determinarán las pérdidas del sistema para el rango de velocidades elegido. En el momento de la desconexión (Par motor nulo), estas pérdidas son las pérdidas mecánicas más las pérdidas en el hierro.

La ecuación que caracteriza la variación de velocidad viene dada por (15):

$$T_e - T_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (15)$$

siendo:

$T_e$ , el par electromagnético y

$T_r$  el par resistente.

En el caso de la desconexión del motor, únicamente tenemos par resistente, con lo que la ecuación nos queda (16):

$$-T_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (16)$$

Dado que el par resistente, para la velocidad calculada es igual a las pérdidas divididas por la velocidad, la ecuación nos queda

$$-P_{perd} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (17)$$

en la que la derivada de la velocidad la obtenemos de la curva de deceleración y el momento de inercia lo obtenemos a partir de (18):

$$J = \left. \frac{P_{perd}}{\omega \frac{d\omega}{dt}} \right|_{\omega=\omega_1} \quad (18)$$

#### 4.4.7.1.- Determinación de pérdidas

En el funcionamiento de la máquina asíncrona, las pérdidas magnéticas en el hierro y las pérdidas mecánicas vienen totalizadas, por lo que se hace necesario separarlas mediante los métodos que se describen a continuación.

### Separación de pérdidas del hierro de las pérdidas mecánicas

Para la determinación de pérdidas tratamos de separar las pérdidas en el hierro de las pérdidas mecánicas. Esto se hace, habitualmente, determinando las pérdidas en vacío haciendo disminuir la tensión manteniendo la velocidad constante e igual a su valor nominal. Las pérdidas, para tensión cero corresponderán a las pérdidas mecánicas.

Los resultados de este ensayo vienen dados en la siguiente gráfica (figura 180), de donde se obtiene que la potencia para tensión cero (pérdidas mecánicas) son tres veces la de una fase (252,63 W), en la que se ha aproximado los datos a una curva polinómica de orden dos, con la que se ha hallado el valor de pérdidas para tensión cero.

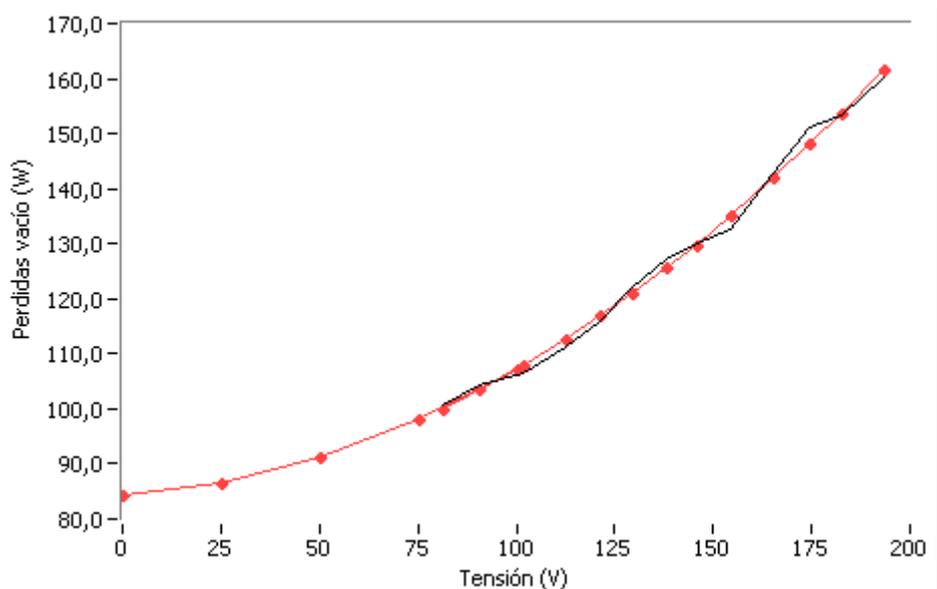


Figura 180.- Separación de pérdidas mecánicas (Fuente: Elaboración propia)

Para la obtención de pérdidas se ha aproximado los valores a una curva de segundo grado cuya expresión es la siguiente (19):

$$P_0(V) = 84,20816 + 0,0473309 \times V + 0,00182896 \times V^2 \quad (19)$$

Para la tensión de 215 voltios, tenemos unas pérdidas en vacío de 178,93 vatios por fase. Las pérdidas en el hierro más las pérdidas en devanados en vacío serán por tanto (20):

$$P_{hierro+dev} = 3 \times (178,93 - 84,21) = 284,16 \text{ W} \quad (20)$$

A este valor se le deberá restar las pérdidas en el devanado del estator, dado que la intensidad de línea es de unos 2,39 amperios. Si la resistencia de una fase es de 5,45 ohmios, las pérdidas en el devanado son (21):

$$P_{devestator} = 3 \times 5,45 \times \left( \frac{2,39}{\sqrt{3}} \right)^2 = 31,13 \text{ W} \quad (21)$$

Las pérdidas del hierro serán, por tanto (22):

$$P_{hierro} = 284,16 - 31,13 = 253,03 \text{ W} \quad (22)$$

#### 4.4.7.2.- Curva de deceleración

Posteriormente se ha sometido al motor a un ensayo de deceleración donde tomamos la velocidad (figura 181).

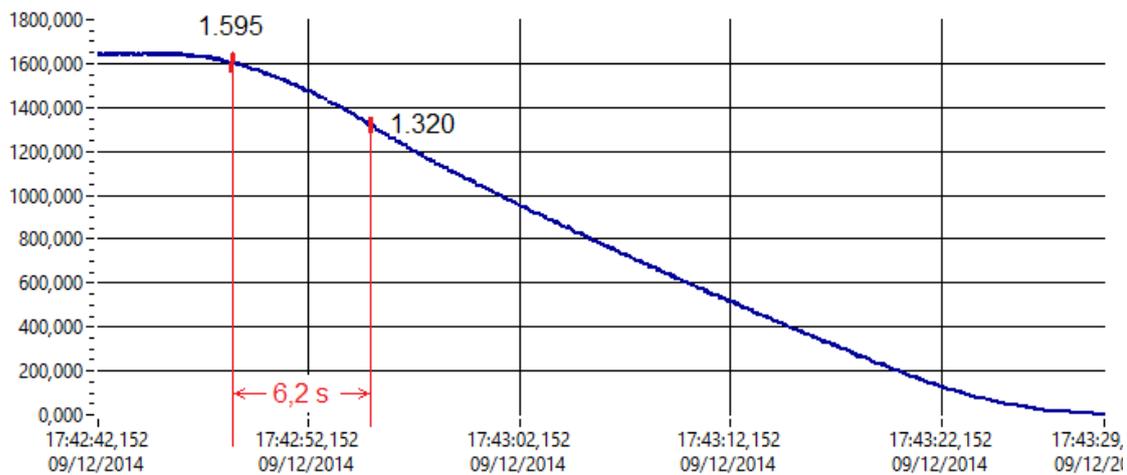


Figura 181.- Curva de deceleración (Fuente: Elaboración propia)

En esta figura se determina el tiempo que tarda en pasar de velocidad  $n(1 + \delta)$  a la velocidad  $n(1 - \delta)$  que es de 6,2 segundos.

Una vez que tenemos todos los datos podemos calcular el momento de inercia como (23):

$$J = \left. \frac{P_{perd}}{\omega \frac{d\omega}{dt}} \right|_{\omega=\omega_n} = \left. \frac{P_{perd}}{2\omega_n^2 \delta} \right|_{\Delta t} = \frac{253,03}{156,45 \times 4,07} = 0,34 \text{ kg.m}^2 \quad (23)$$

Se obtiene un momento de inercia de  $J = 0,34 \text{ kg.m}^2$ .

## 4.5- Aplicación herramienta a máquina síncrona

### 4.5.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar

#### Elementos de la máquina síncrona

Estas máquinas son utilizadas fundamentalmente como generadores de energía eléctrica en las centrales de producción de energía. Es por esto que, en el análisis de esta máquina utilizaremos la notación de generador, es decir, potencias positivas serán potencias generadas, y potencias negativas serán potencias consumidas.

La máquina síncrona está formada por un devanado inductor y un devanado inducido. El devanado inductor, normalmente situado en el rotor, se alimenta con tensión continua, y su intensidad (intensidad de excitación) producirá un campo magnético giratorio (con una velocidad de giro igual a la del movimiento del rotor) (figura 182).

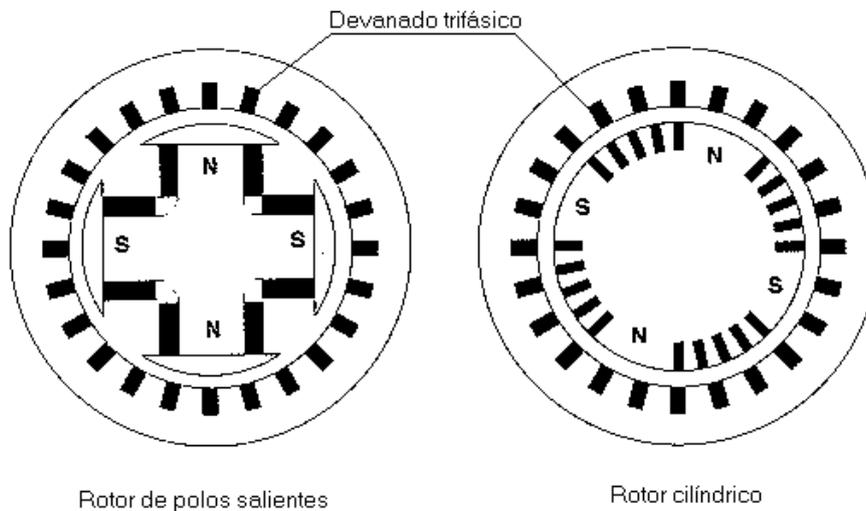


Figura 182.- Constitución máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

El devanado inducido, formado por tres grupos de bobinas desfasadas espacialmente 120 grados (devanado trifásico) “recoge” el flujo producido por el devanado inductor, y produce (ley de Faraday) fuerzas electromotrices en cada uno de los tres grupos de bobinas. Estas fuerzas electromotrices son alternas, tienen la misma amplitud y están desfasadas 120 grados, por lo que conforman un sistema trifásico de tensiones.

La frecuencia de la tensión generada depende directamente de la velocidad de giro. No olvidemos que la frecuencia es el número de ciclos por segundo, por lo que, para una máquina de dos polos (un ciclo se produce en cada vuelta) si queremos generar

frecuencia de 50 ciclos por segundo deberemos hacer girar el rotor a 50 vueltas por segundo o, lo que es lo mismo, 3.000 vueltas (revoluciones) por minuto (3.000 r.p.m. son 50 vueltas por 60 segundos que tiene cada minuto).

En el caso de que la máquina tenga 4 polos, un ciclo completo se repite cada media vuelta, por lo que para generar una tensión a 50 Hz, deberemos hacer girar al alternador a 1.500 r.p.m. ( $50 \times 0,5 \times 60$ ). A esta velocidad se le denomina velocidad síncrona “ $n_s$ ”, y que, por lo dicho anteriormente, obedece a la (24):

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (24)$$

siendo  $n_s$ : la velocidad síncrona en revoluciones por minuto (r.p.m.),

f: la frecuencia de la tensión generada en Hz y

p: el número de pares de polos.

### **Planteamiento del análisis de la máquina síncrona**

Antes de presentar el ensayo a realizar, analizaremos teóricamente el comportamiento de las máquinas en régimen permanente. En la figura 183 tenemos representado el esquema unifilar del sistema objeto de nuestro estudio, compuesto por un generador (con su fuerza electromotriz, resistencias, autoinducciones, etc.), una carga trifásica y la línea de conexión del generador con la carga.

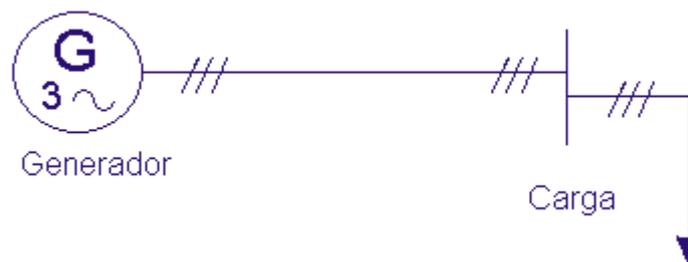


Figura 183.- Esquema unifilar de la máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

Para el análisis de este sistema, usando la teoría de circuitos, descomponemos el sistema en un conjunto de tres generadores monofásicos conectados en estrella, resistencias y autoinducciones internas (propias del generador o de la línea), y la carga trifásica equilibrada (de estructura simétrica) (figura 184).

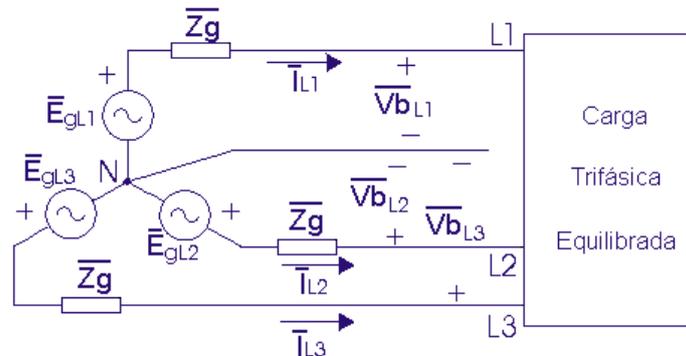


Figura 184.- Esquema general máquina con carga (Fuente: Elaboración propia)

La generación proporciona un sistema equilibrado de tensiones (tensiones fase a neutro) que obedecen a las siguientes ecuaciones (25):

$$\begin{aligned} e_{gL1}(t) &= \sqrt{2} E_g \cos(\omega t + \theta) \\ e_{gL2}(t) &= \sqrt{2} E_g \cos(\omega t - 120^\circ + \theta) \\ e_{gL3}(t) &= \sqrt{2} E_g \cos(\omega t - 240^\circ + \theta) \end{aligned} \quad (25)$$

siendo “E<sub>g</sub>” el valor eficaz de la fuerza electromotriz y “θ” el llamado ángulo de carga o ángulo de par (desfase entre la fuerza electromotriz del generador y la tensión en bornes).

Una vez conectada la carga, se establecerá un sistema trifásico equilibrado de intensidades (corrientes de línea) de valores (26):

$$\begin{aligned} i_{L1}(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - \varphi) \\ i_{L2}(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 120^\circ - \varphi) \\ i_{L3}(t) &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 240^\circ - \varphi) \end{aligned} \quad (26)$$

siendo “I” el valor eficaz y “φ” el ángulo de desfase entre la tensión de la carga y su intensidad de corriente.

La tensión en bornes de la carga formará un sistema trifásico equilibrado de tensiones entre fase y neutro (27), y tomaremos su argumento como origen de fases (obsérvese que con esta asignación no se pierde generalidad):

$$\begin{aligned} v_{bL1}(t) &= \sqrt{2} V_b \cos \omega t \\ v_{bL2}(t) &= \sqrt{2} V_b \cos(\omega t - 120^\circ) \\ v_{bL3}(t) &= \sqrt{2} V_b \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (27)$$

en el que “V<sub>b</sub>” es el valor eficaz de la tensión en bornes de la carga.

### Resolución del problema de análisis de la máquina síncrona

Para resolver el problema realizamos la transformación del circuito objeto de análisis al dominio fasorial, con lo que nos quedaría el esquema de la figura lateral, y en la que las distintas variables llevan una línea superior que indica que ahora trabajamos en el dominio fasorial. Éstas son la

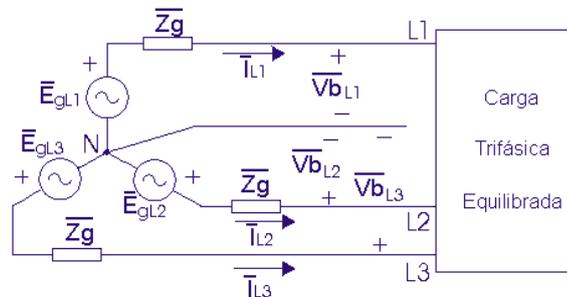


Figura 185.- Esquema en dominio fasorial (Fuente: Elaboración propia)

fuerza electromotriz, la impedancia del generador, la intensidad y la tensión en bornes (figura 185).

Por tratarse de un sistema trifásico equilibrado de estructura simétrica, abordaremos su estudio con el circuito monofásico equivalente (ver la figura 186), dado que una vez obtenida la solución para una fase, tenemos resuelto el problema para las tres fases sin más que desplazar las magnitudes  $120^\circ$ .

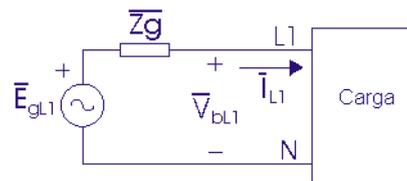


Figura 186.- Esquema monofásico equivalente (Fuente: Elaboración propia)

Con esta simplificación, reducimos las incógnitas a las tres siguientes (28, 29 y 30), que representamos mediante su forma polar:

$$\overline{E_{gL1}} = \overline{E_g} = E_g e^{j0^\circ} \quad (28)$$

$$\overline{V_{bL1}} = \overline{V_b} = V_b e^{j0^\circ} \quad (29)$$

$$\overline{I_{L1}} = \overline{I} = I e^{-j\varphi} \quad (30)$$

Las ecuaciones necesarias para el análisis y la resolución del problema son las que se muestran a continuación (31 y 32):

$$\overline{E_g} = \overline{V_b} + \overline{Z_g} \cdot \overline{I} \quad (31)$$

$$P = 3 V_b I \cos \varphi ; Q = 3 V_b I \sin \varphi \quad (32)$$

### Diagrama fasorial de la máquina síncrona

Para el análisis del comportamiento de estas máquinas, también se utiliza el diagrama fasorial, en el que representaremos las magnitudes más importantes: tensión en bornes  $V_b$ , fuerza electromotriz  $E_g$ , intensidad de la corriente establecida  $I$  y la caída de tensión en el generador  $Z_g \cdot I$  (véase la figura 187 donde tenemos la tensión en bornes como origen de fases, la fuerza electromotriz, la intensidad y la caída de tensión en la impedancia). Se representa únicamente las magnitudes de la primera fase, pues las correspondientes al resto de fases tienen el mismo módulo y están desfasadas respecto a aquellas 120 grados.

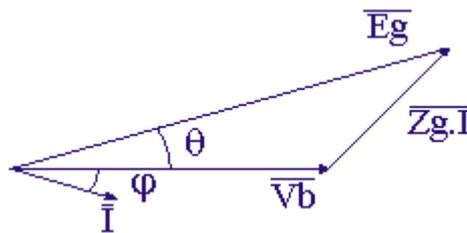


Figura 187.- Diagrama fasorial de la máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

Obsérvese que la intensidad está retrasada un ángulo  $\varphi$  respecto a la tensión (el generador produce energía reactiva inductiva, que es consumida por la carga a él conectada), y la fuerza electromotriz está adelantada un ángulo  $\theta$ . Esto quiere decir que la potencia es positiva, es decir, el alternador está produciendo potencia eléctrica.

La representación de todos los diagramas fasoriales se ha realizado referenciando las tensiones e intensidades con la notación de generador (la intensidad sale del terminal positivo del generador).

En la figura 188 se representa el diagrama fasorial de la máquina funcionando como generador de energía eléctrica. Además, el generador produce energía reactiva capacitiva, que es consumida por la carga.

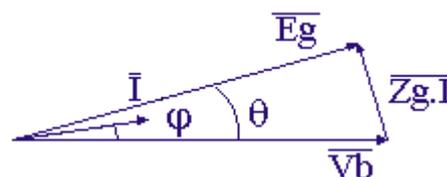


Figura 188.- Máquina síncrona funcionando como generador y aportando energía reactiva capacitiva (Fuente: Elaboración propia)

Estas máquinas de generación también pueden trabajar como motores, es decir, como cargas eléctricas. Experimentalmente, esto se consigue desconectando el motor

primario (y acoplado una carga mecánica al eje). En este caso, la potencia será negativa, y la intensidad tendrá sentido contrario al representado en las figuras anteriores.

La figura 189 representa el diagrama fasorial de la máquina funcionando como motor, pues su potencia activa es negativa. Además, está consumiendo energía reactiva capacitiva procedente de la red a la que está conectado.

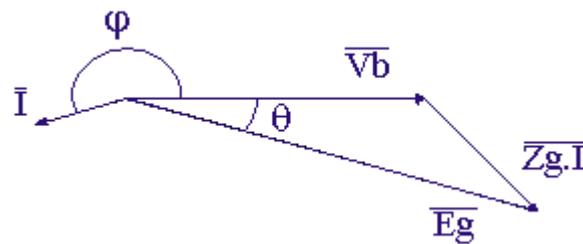


Figura 189.- Máquina síncrona funcionando como motor y consumiendo energía reactiva capacitiva (Fuente: Elaboración propia)

Observe que la fuerza electromotriz está retrasada un ángulo  $\theta$  respecto de la tensión en bornes, lo que significa que la potencia activa es negativa.

La figura 190 representa la máquina funcionando como motor (también su potencia activa es negativa). Este motor consume potencia reactiva inductiva, que será aportada por la red eléctrica a la que está conectado.

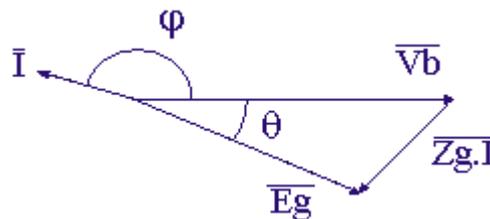


Figura 190.- Máquina síncrona funcionando como motor y consumiendo energía reactiva inductiva (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.2.- Máquina síncrona ensayada

Se presenta, a continuación la figura 191 con la máquina asíncrona ensayada, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3,8 kVA
- Tensión nominal: 380/660 V
- Corriente nominal: 5,8/3,35 A
- Corriente de excitación: 1,5 A
- Velocidad: 1.500 r.p.m.

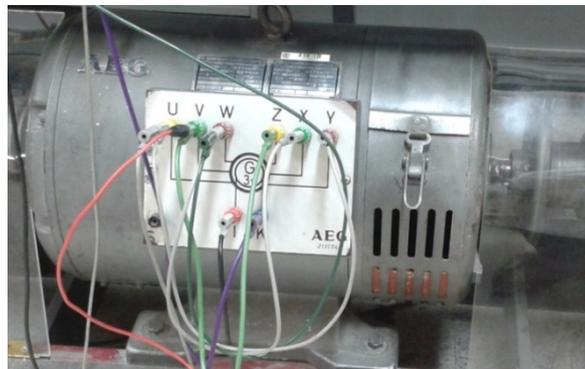


Figura 191.- Máquina síncrona ensayada (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.3.- Adquisición de datos y obtención de curvas características

Se ha procedido a implementar el sistema de gestión y control a la máquina mencionada procediendo a realizar una adquisición de datos en el funcionamiento de la misma.

Los datos aquí mostrados proceden de los datos almacenados en los ficheros correspondientes.

##### **Obtención de la característica de vacío**

Se ha procedido a adquirir los datos de la característica de vacío de la máquina síncrona funcionando como alternador, que representa la tensión generada frente a la corriente de excitación.

Esta característica de vacío permite analizar el comportamiento del circuito magnético del alternador (véase la figura 192). Obsérvese que la característica de vacío tiene tres partes claramente diferenciadas:

- Zona lineal, para pequeñas corrientes de excitación
- Codo de saturación
- Zona saturada

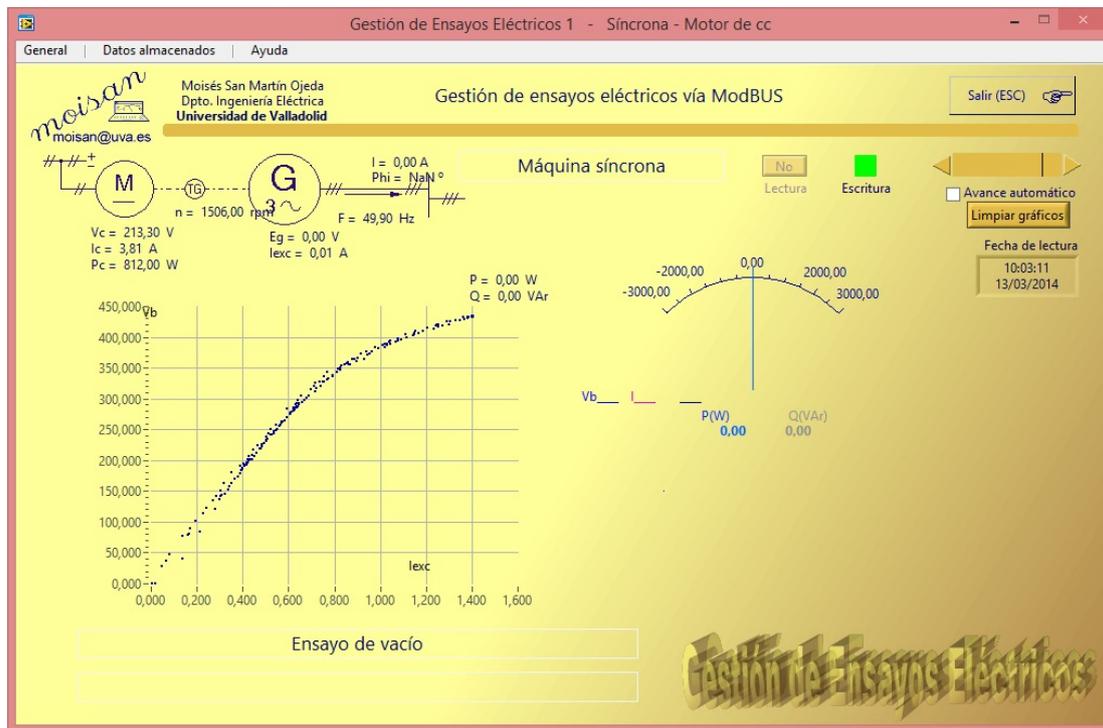


Figura 192.- Característica de vacío de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la tabla 24 se han tomado un total de 253 puntos de funcionamiento.

Estos datos almacenados son susceptibles de ser tratados de manera sistemática. Véase, por ejemplo en la figura 193, la representación de esta característica de vacío en el entorno Excel.

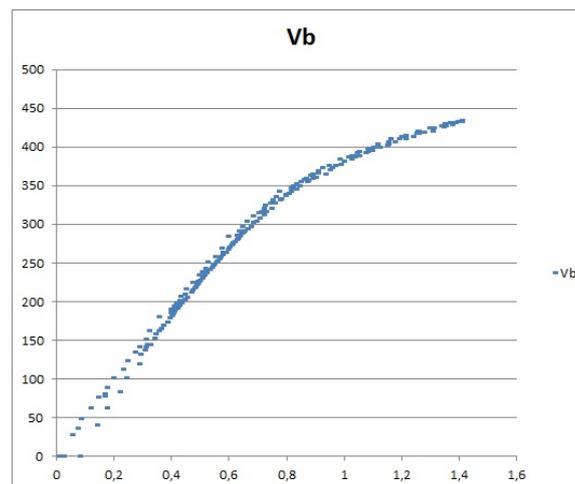


Figura 193.- Tratamiento datos característica de vacío (Fuente: Elaboración propia)



#	Vb	I	P	Q	Velocidad	Frecuencia	lexc	Vcc	Icc	Pcc	Fecha	Hora
1	0	0	0	0	1503	0	0,005	213,5	3,952	843	13/03/2014	9:58:58
2	0	0	0	0	1503	52	0,02	213,5	3,976	848	13/03/2014	9:58:59
3	0	0	0	0	1503	50	0,075	213,5	3,952	843	13/03/2014	9:59:00
4	40	0	0	0	1505	49,9	0,136	213,5	3,952	843	13/03/2014	9:59:01
5	63	0	0	0	1506	49,9	0,169	213,5	4	853	13/03/2014	9:59:02
6	84	0	0	0	1504	49,9	0,214	213,5	4	853	13/03/2014	9:59:03
7	101	0	0	0	1506	49,9	0,238	213,4	4,024	858	13/03/2014	9:59:04
8	120	0	0	0	1507	49,9	0,281	213,3	4,072	868	13/03/2014	9:59:05
9	132	0	0	0	1506	49,9	0,288	213,4	4,096	874	13/03/2014	9:59:06
10	137	0	0	0	1504	49,9	0,301	213,5	4,12	879	13/03/2014	9:59:07
11	141	0	0	0	1505	49,9	0,305	213,5	4,096	874	13/03/2014	9:59:08
12	144	0	0	0	1504	49,9	0,31	213,5	4,12	879	13/03/2014	9:59:09
13	144	0	0	0	1506	49,9	0,309	213,6	4,12	879	13/03/2014	9:59:10
14	144	0	0	0	1504	49,9	0,309	213,7	4,096	875	13/03/2014	9:59:11
15	145	0	0	0	1502	49,9	0,321	213,6	4,096	874	13/03/2014	9:59:12
16	153	0	0	0	1507	49,9	0,335	213,6	4,12	880	13/03/2014	9:59:14
17	158	0	0	0	1506	49,9	0,341	213,6	4,12	880	13/03/2014	9:59:15
18	162	0	0	0	1505	49,9	0,352	213,6	4,12	880	13/03/2014	9:59:16
19	165	0	0	0	1503	49,9	0,359	213,6	4,12	879	13/03/2014	9:59:17
20	170	0	0	0	1505	49,9	0,365	213,6	4,12	879	13/03/2014	9:59:18
21	169	0	0	0	1504	49,9	0,365	213,6	4,12	879	13/03/2014	9:59:19
22	169	0	0	0	1504	49,9	0,365	213,6	4,12	880	13/03/2014	9:59:20
...												
...												
...												
249	0	0	0	0	1508	49,9	0,021	213,5	3,783	807	13/03/2014	10:03:10
250	0	0	0	0	1506	49,9	0,005	213,3	3,807	812	13/03/2014	10:03:11
251	0	0	0	0	1508	49,9	0,004	213,7	3,783	808	13/03/2014	10:03:12
252	0	0	0	0	1505	49,9	0,004	213,9	3,783	808	13/03/2014	10:03:14
253	0	0	0	0	1507	49,9	0,004	213,8	3,759	803	13/03/2014	10:03:15

Tabla 24.- Detalle datos característica de vacío (Excel)

### **Obtención de la característica reactiva**

Posteriormente, y sin desconectar la máquina, se ha procedido a adquirir los datos de la característica reactiva de la máquina síncrona funcionando como alternador, que representa la tensión generada frente a la corriente de excitación cuando se conectan cargas puramente reactivas y manteniendo constante la corriente generada igual a la nominal.

La figura 194 representa esta curva reactiva junto a la curva de vacío obtenida anteriormente.

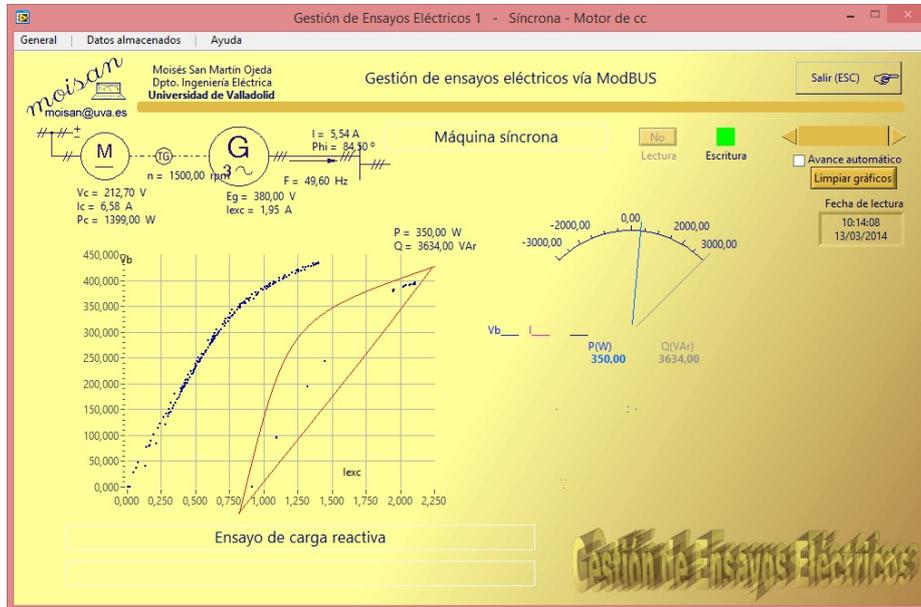


Figura 194.- Característica reactiva de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

### Obtención de la característica de cortocircuito

Posteriormente, y sin desconectar la máquina, se ha procedido a adquirir los datos de la característica de cortocircuito de la máquina síncrona funcionando como alternador, que representa la corriente inducida frente a la corriente de excitación cuando se cortocircuita la salida del alternador (véase la figura 195).

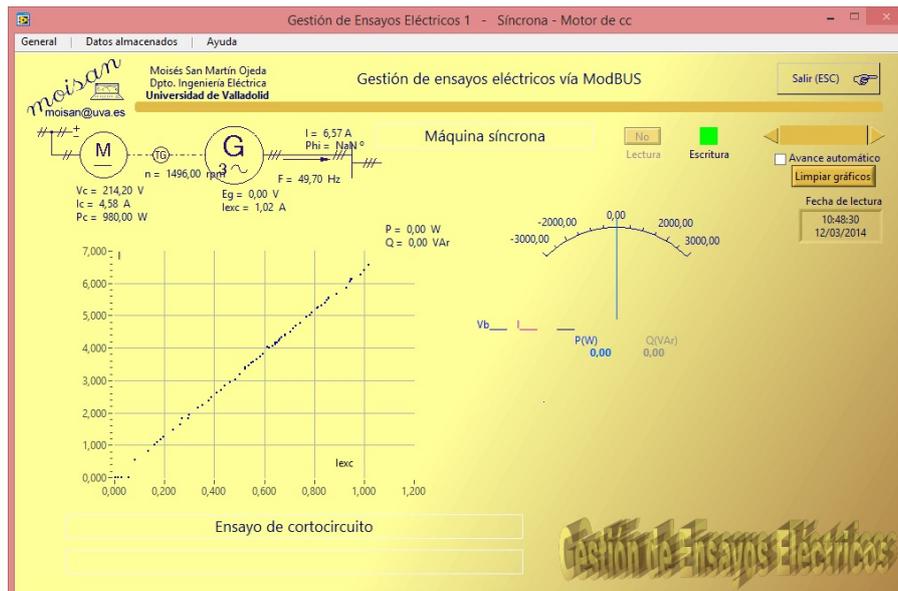


Figura 195.- Característica de cortocircuito de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

Con los ensayos de vacío, reactiva y cortocircuito es posible realizar el estudio de la máquina síncrona determinando la reactancia de Potier.

### **Obtención de las curvas en V**

Posteriormente, y sin desconectar la máquina, se ha procedido a adquirir los datos de la característica de curvas en V de la máquina síncrona, que representa la corriente inducida frente a la corriente de excitación cuando se varía la potencia reactiva de la máquina (véase la figura 196).

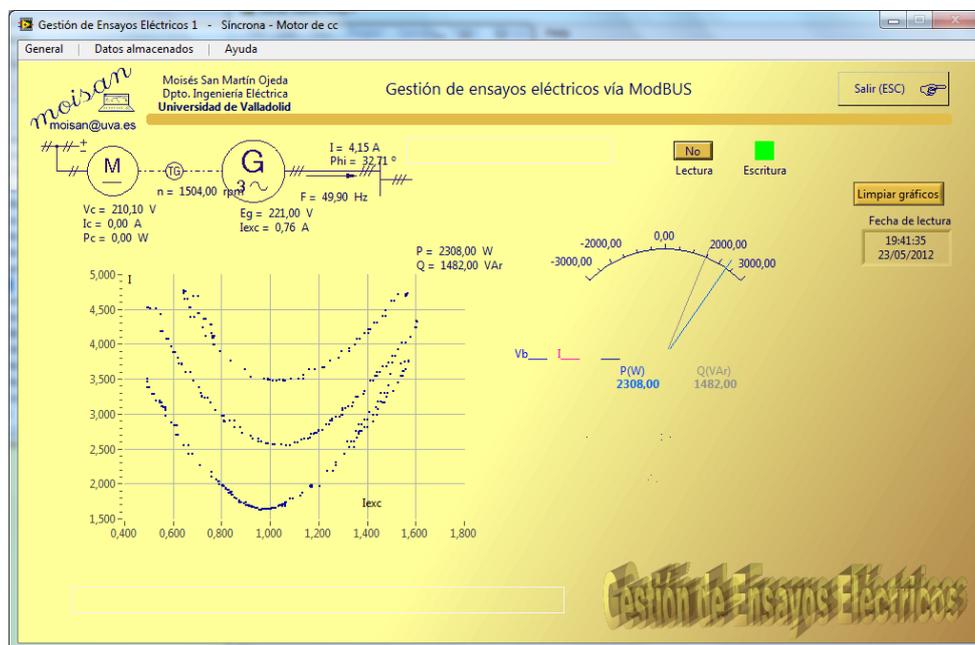


Figura 196.- Curvas en V de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

Estas curvas en V se obtienen de manera teórica realizando el estudio del alternador utilizando como modelo un generador ideal conectado a una impedancia constante. Para ello hemos utilizado el simulador generado en el ámbito de esta tesis.

#### **4.5.4.- Simulador de máquina síncrona**

Se ha generado un simulador para determinar el comportamiento de una máquina síncrona trifásica. El simulador permite visualizar el comportamiento de la máquina síncrona funcionando en modo aislado o conectado a red eléctrica.

El software permite modificar las variables de entrada (principalmente potencias activa y reactiva) y determina la respuesta a la misma. Incluso permite analizar la evolución del funcionamiento de la máquina. Véase en la figura 197, por ejemplo, las curvas en V de la máquina síncrona que muestran la variación de la corriente absorbida frente a la fuerza electromotriz del alternador cuando se modifica la potencia reactiva.



Figura 197.- Simulador de máquina síncrona. Curvas en V (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.5.- Ensayo de deslizamiento de la máquina síncrona

Además de la conexión adquisición de valores medios y eficaces, se ha aplicado el sistema de gestión y control para la adquisición de valores instantáneos en la máquina síncrona.

En la figura 198 se representa la adquisición de datos correspondiente al ensayo de deslizamiento para la determinación de las reactancias longitudinal y transversal de una máquina síncrona mediante la adquisición de la tensión y corriente de una fase haciendo trabajar a la máquina fuera de sincronismo.

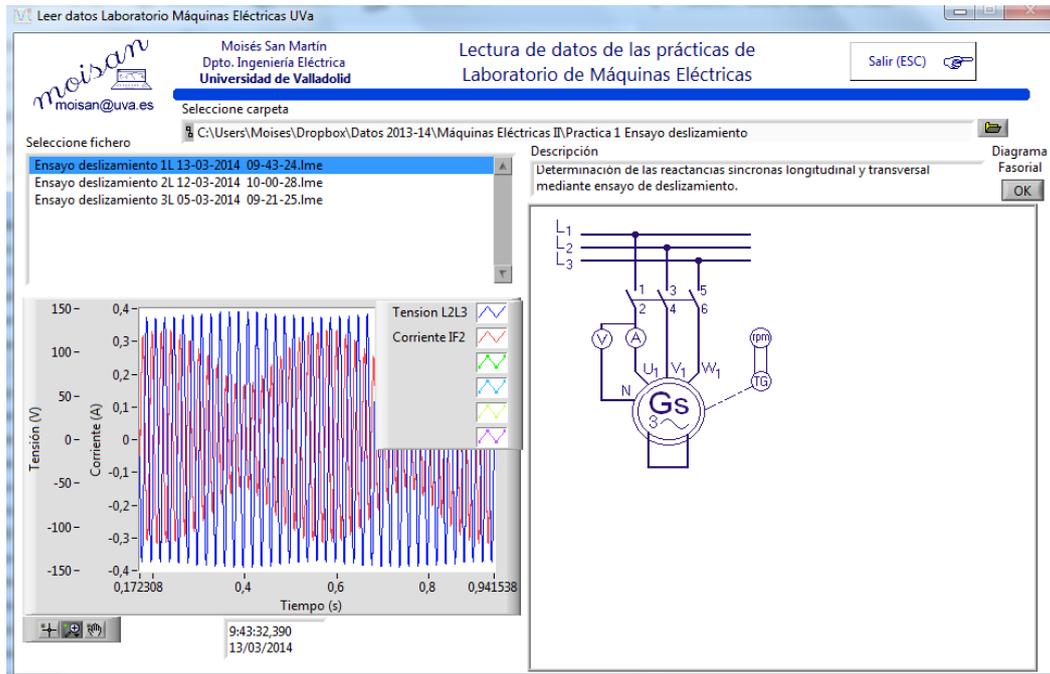


Figura 198.-Ensayo de deslizamiento de máquina síncrona (Fuente: Elaboración propia)

## 4.6- Aplicación herramienta a máquina de corriente continua

### 4.6.1.- Fundamentos de la máquina a ensayar

#### Motores de corriente continua

Las máquinas de corriente continua (motores y generadores o dinamos), al igual que el resto de máquinas eléctricas, disponen de dos partes claramente diferenciadas: el inductor y el inducido.

El inductor va a ser el encargado de producir el flujo magnético necesario que va a recorrer el circuito magnético uniendo magnéticamente el estator y el rotor y también el inductor con el inducido. En el inducido se van a producir las fuerzas contraelectromotrices que van a dar origen a intensidades en el inducido y a pares que van a dar origen al movimiento de la máquinas.

La figura 199 representa un esquema de la máquina, donde tenemos el inducido, señalado por las letras **A-B** y el inductor, señalado por **J-K**.

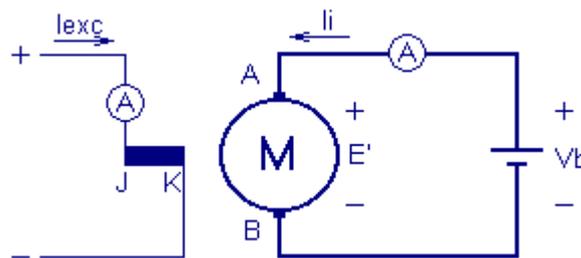


Figura 199.- Motor de corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

En el esquema representado, el inductor y el inducido están separados eléctricamente por lo que se trata de una máquinas que se denomina de excitación independiente.

El fundamento de está máquina es el siguiente. Al aplicar una tensión al inductor se establece una intensidad de excitación **I<sub>exc</sub>** que recorre el devanado del inductor, según la ley de Ampere (33).

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_{exc} \cdot I_{exc} \quad (33)$$

Esta corriente va a producir un flujo magnético que va a recorrer todo el circuito magnético, que une inductor con inducido. Sobre el inducido se aplica una tensión  $V_b$  por una fuente cuya energía eléctrica se va a transformar en energía mecánica. Esta tensión  $V_b$  va a dar origen a una intensidad por el devanado del inducido ( $I_i$ ). Pues bien, esta intensidad del inducido  $I_i$  sobre el la inducción magnética  $B_{exc}$  producida por la intensidad de excitación  $I_{exc}$  va a dar origen a unas fuerzas que provocarán el movimiento del rotor, según la siguiente fórmula de Lorentz (34).

$$F = \int_L I_i \cdot d\vec{l} \times \vec{B}_{exc} \quad (34)$$

### Tipos de excitaciones en la máquina de corriente continua

Dependiendo de la forma constructiva del devanado inductor tenemos distintos tipos de máquinas.

#### a) Excitación independiente

El esquema explicado anteriormente corresponde a una excitación independiente, dado que el inductor no está unido eléctricamente con el inducido. La tensión aplicada al inductor suelen ser del mismo orden que la aplicada al inducido, por lo que la resistencia que debe presentar el devanado del inductor debe ser elevada (muchas espiras y de pequeña sección). La figura 200 muestra de nuevo este esquema.

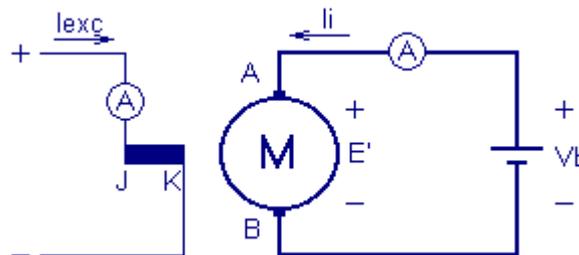


Figura 200.- Motor de corriente continua de excitación independiente (Fuente: Elaboración propia)

#### b) Excitación derivación

En este tipo de máquinas, el inductor y el inducido están conectados eléctricamente, por lo que el inductor toma la energía del mismo punto que la toma el inducido por lo que en este caso se habla de máquina autoexcitada. Todas las máquinas que veremos a continuación serán máquinas autoexcitadas.

En la máquina con excitación derivación, el inductor se conecta en paralelo con el inducido, según muestra el esquema de la figura 201, por lo que la tensión del inductor será del mismo orden que la del inducido (la tensión no es exactamente igual debido a la resistencia conectada en serie con el fin de variar la intensidad de excitación). Exáctamente igual que en el caso de excitación independiente, se requiere que el devanado presente elevada resistencia, por lo que estará formado por muchas espiras de pequeña sección.

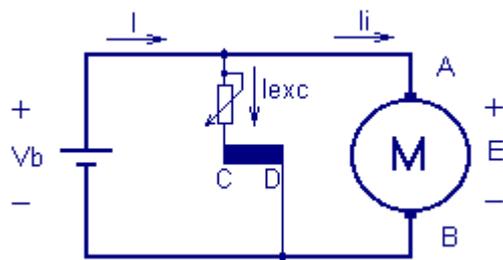


Figura 201.- Motor de corriente continua excitación derivación (Fuente: Elaboración propia)

### c) Excitación serie

En este tipo de máquinas, el inductor y el inducido están conectados prácticamente en serie, por lo que la intensidad del inductor es del mismo orden que la del inducido (excepto por la resistencia conectada en paralelo con el fin de variar la intensidad de excitación). Véase la figura 202.

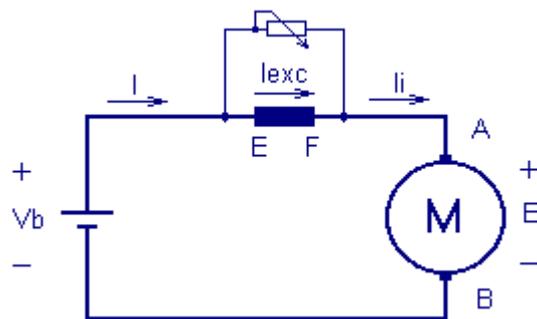


Figura 202.- Motor de corriente continua excitación serie (Fuente: Elaboración propia)

En este esquema, dado que la caída de tensión en el devanado inductor debe ser pequeña, éste estará formado por muy pocas espiras de elevada sección.

#### d) Excitación compuesta

En aquellas máquinas donde tenemos los dos tipos de excitaciones explicados anteriormente podemos realizar una combinación de ellas con el fin de mejorar las ventajas.

Vamos a tener dos maneras de conectar las dos excitaciones, dependiendo que el devanado derivación esté junto al inducido, lo que se denomina excitación compuesta (compound) corta, y si el devanado derivación está alejado del inducido se le llama excitación compuesta (compound) larga.

La figura 203 representa una máquina con excitación compuesta corta (compound corta).

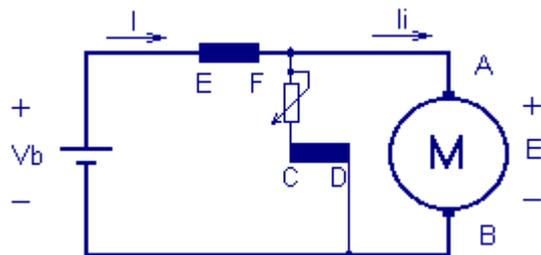


Figura 203.- Motor de corriente continua excitación compuesta corta (Fuente: Elaboración propia)

La figura 204 representa una máquina con excitación compuesta larga (compound larga).

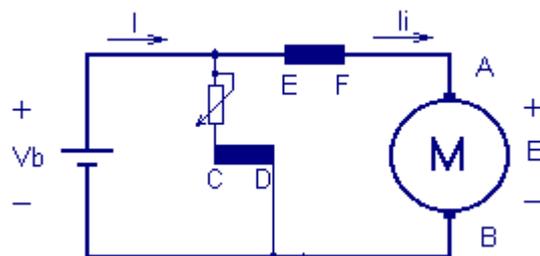


Figura 204.- Motor de corriente continua excitación compuesta larga (Fuente: Elaboración propia)

### Velocidad en motores de corriente continua

En los motores de corriente continua, la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) viene dada por la siguiente (35):

$$\text{F.c.e.m.} = E' = \frac{\phi \cdot N \cdot n}{60} \times \frac{p}{a} \quad (35)$$

siendo:

$\phi$  = Flujo total por polo (Weber).

$N$  = Número de conductores.

$n$  = Velocidad del rotor en revoluciones por minuto (r.p.m.).

$p$  = Pares de polos.

$a$  = Pares de circuitos paralelos.

La expresión de la Fuerza contraelectromotriz  $E'$ , es aproximadamente igual a la tensión aplicada  $V_b$  ya que  $E'$  viene dada (observe el esquema de la figura anterior) como (36):

$$E' = V_b - R_i \cdot I_i \cong V_b \quad (36)$$

siendo:

$V_b$  = Tensión en bornas aplicada al motor.

$R_i$  = Resistencia del devanado de inducido.

De estas dos ecuaciones, (35 y 36), despejamos la velocidad  $n$ , y consideramos constante el número de conductores, el número de polos y el número de circuitos en paralelo, por lo que obtenemos que la velocidad  $n$  viene expresada como (37):

$$n \cong k \frac{V_b}{\phi} \quad (37)$$

Esta nos indica que es posible variar la velocidad de un motor de corriente continua de dos maneras diferentes: Variando su tensión aplicada  $V_b$  y variando el flujo, es decir, la intensidad de excitación  $I_{exc}$ .

#### 4.6.2.- Máquina de corriente continua ensayada

Se presenta, a continuación la figura 205 con la máquina de corriente continua ensayada, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3 kW
- Tensión nominal: 220 V
- Corriente nominal inducido: 17 A.
- Corriente nominal excitación 1,25 A
- Velocidad: 1.450 rpm



Figura 205.- Máquina de cc ensayada (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.3.- Ensayos excitación independiente y determinación de curvas características

Con el sistema de gestión y control se han realizado una serie de ensayos para determinar las características de funcionamiento que se detallan a continuación.

#### **Curva de velocidad frente a la variación de la carga**

La figura 206 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación independiente en el que se ha variado la corriente del inducido (la carga mecánica) y se ha medido la velocidad. Se ha realizado el ensayo para dos tensiones diferentes.

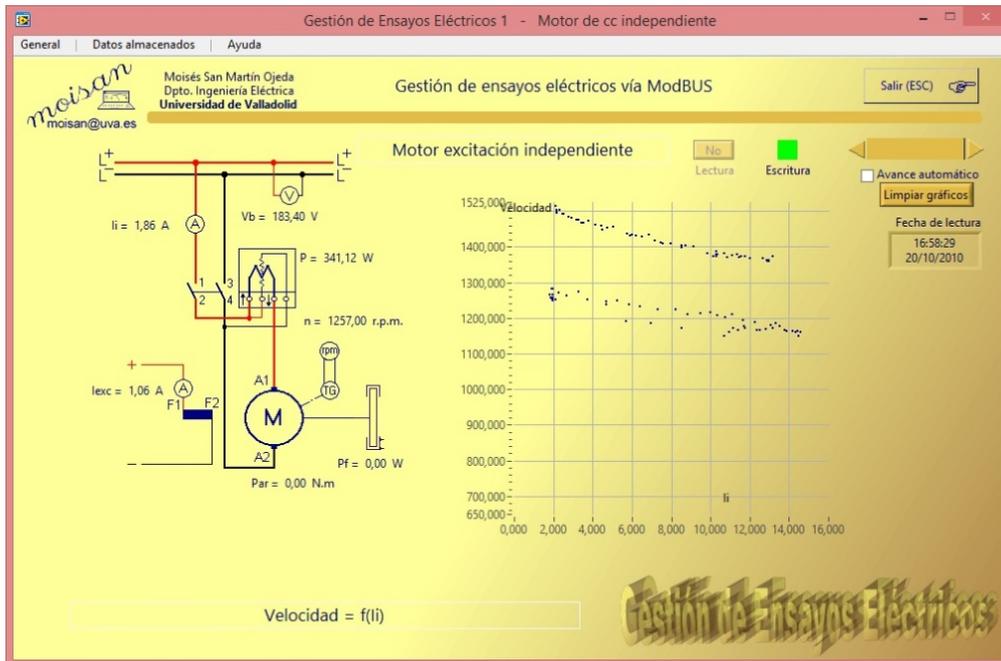


Figura 206.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)

### Curva de variación de velocidad frente a la corriente de excitación

La figura 207 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación independiente en el que se ha variado la corriente de excitación y se ha medido la velocidad manteniendo la tensión aplicada constante.

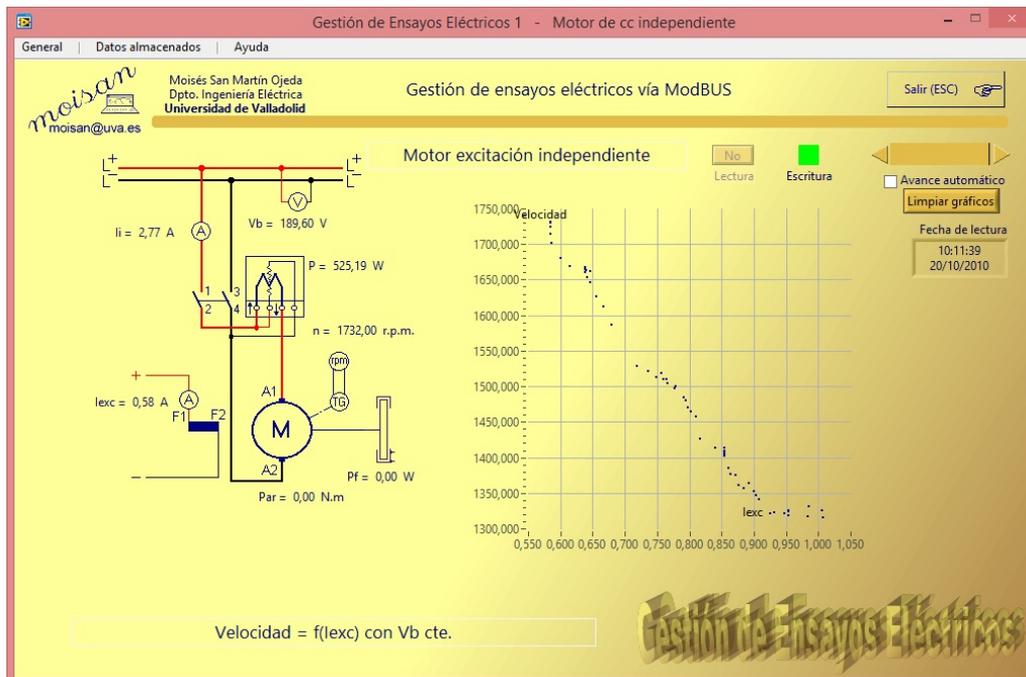


Figura 207.- Variación de velocidad frente a la excitación

### Curva de variación de velocidad frente a la tensión aplicada

La figura 208 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación independiente en el que se ha variado la tensión aplicada y se ha medido la velocidad manteniendo la corriente de excitación constante.

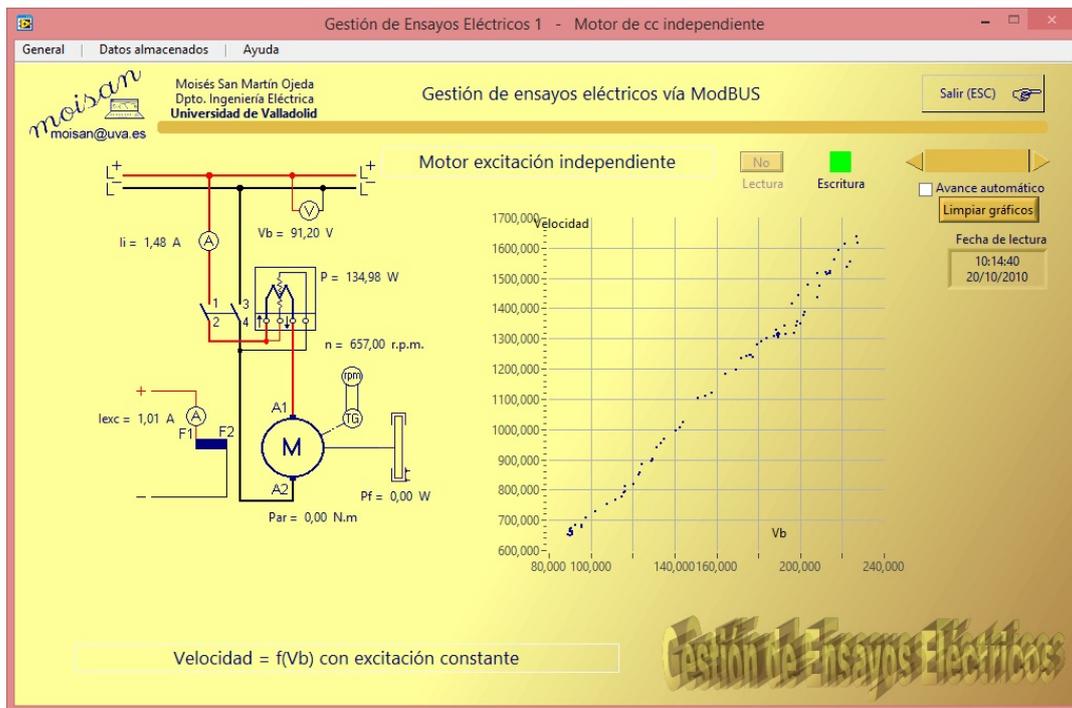


Figura 208.- Variación de velocidad frente a la tensión aplicada (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.4.- Ensayos excitación derivación y determinación de curvas características

Con el sistema de gestión y control se han realizado una serie de ensayos para determinar las características de funcionamiento que se detallan a continuación.

### Curva de velocidad frente a la variación de la carga

La figura 209 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación derivación en el que se ha variado la corriente del inducido (la carga mecánica) y se ha medido la velocidad. Se ha realizado el ensayo para dos tensiones diferentes.

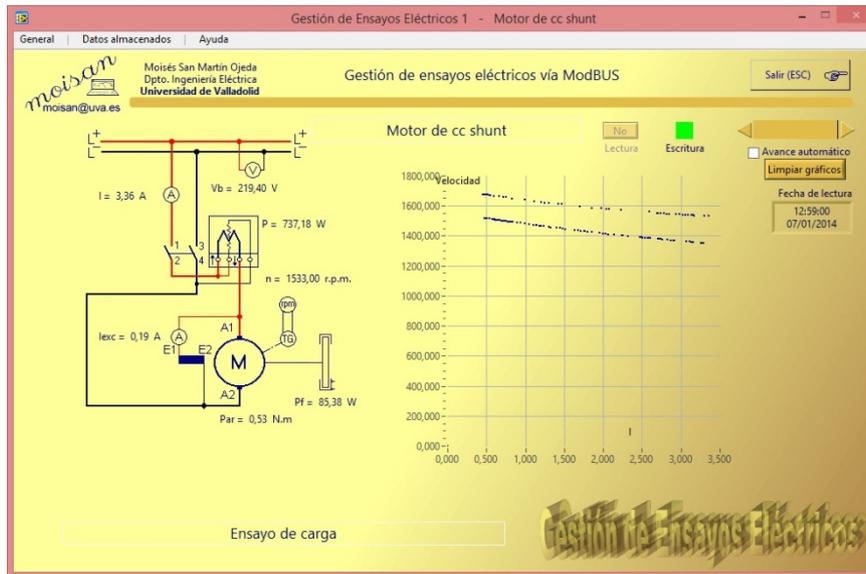


Figura 209.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.5.- Ensayos excitación serie y determinación de curvas características

Con el sistema de gestión y control se han realizado una serie de ensayos para determinar las características de funcionamiento que se detallan a continuación.

#### Curva de velocidad frente a la variación de la carga

La figura 210 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación serie en el que se ha variado la corriente del inducido (la carga mecánica) y se ha medido la velocidad. Se ha realizado el ensayo para tres tensiones diferentes.

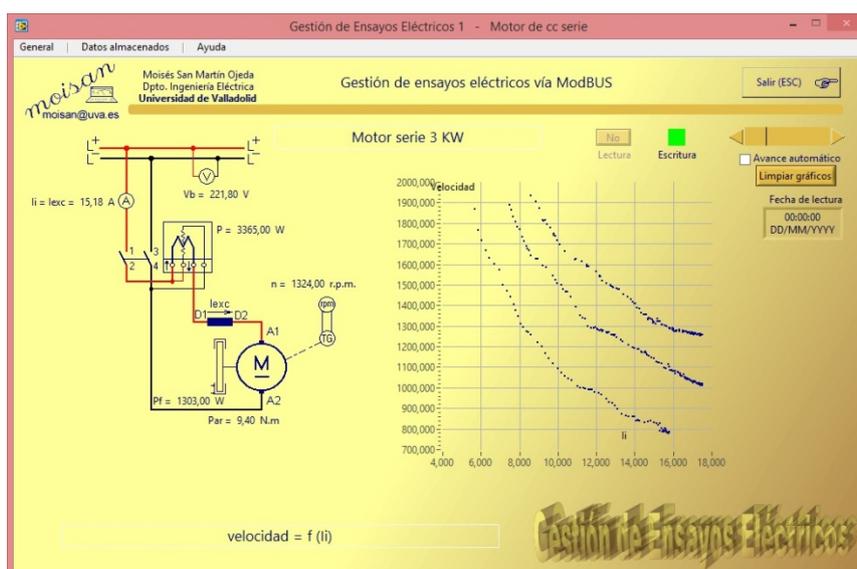


Figura 210.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)



Obsérvese que en esta adquisición se han tomado 426 puntos de funcionamiento. Véase la tabla 25 en la que se han exportado estos datos a Excel.

#	Vb	li	P	Pfreno	Velocidad
1	221,7	17,519	3882	1195	1259
2	221,8	17,519	3884	1196	1257
3	221,7	17,495	3878	1197	1256
4	221,6	17,495	3876	1199	1258
5	221,6	17,495	3875	1200	1258
6	221,6	17,495	3875	1201	1256
7	221,6	17,446	3864	1202	1256
8	221,5	17,398	3851	1203	1258
9	221	17,422	3850	1204	1259
10	221	17,422	3850	1205	1260
11	221	17,422	3850	1206	1260
12	221	17,422	3850	1207	1258
13	220,9	17,398	3842	1208	1256
14	221	17,422	3849	1209	1255
15	221	17,422	3849	1210	1257
16	220,9	17,398	3842	1211	1260
17	221	17,374	3839	1212	1259
18	221	17,374	3839	1214	1257
19	220,9	17,374	3836	1215	1257
20	220,9	17,374	3837	1216	1257
21	221,2	17,374	3841	1217	1257
22	221,2	17,374	3842	1218	1255
...					
...					
...					
422	152,3	6,434	980	1792	1630
423	152,3	6,241	950	1792	1667
424	152,3	6,048	921	1792	1718
425	152,2	5,855	891	1792	1766
426	152,2	5,687	865	1793	1868

Tabla 25.- Variación de velocidad frente a la carga

#### 4.6.6.- Ensayos excitación compuesta corta y determinación de curvas características

Con el sistema de gestión y control se han realizado una serie de ensayos para determinar las características de funcionamiento que se detallan a continuación.

## Curva de velocidad frente a la variación de la carga

La figura 211 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación compuesta corta en el que se ha variado la corriente del inducido (la carga mecánica) y se ha medido la velocidad. Se ha realizado el ensayo para dos tensiones diferentes.

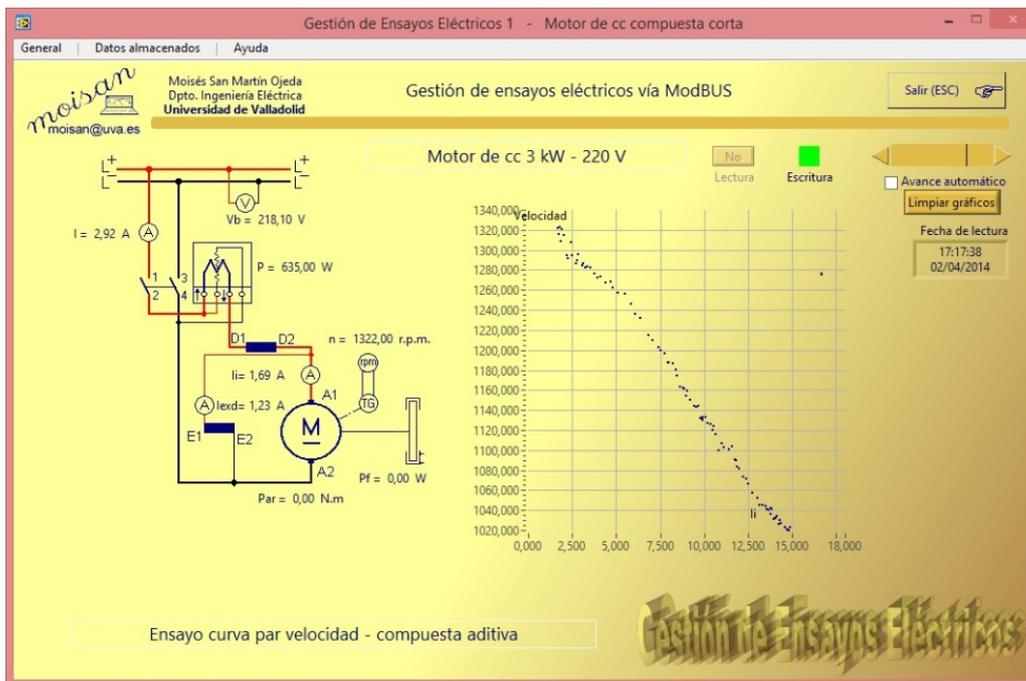


Figura 211.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)

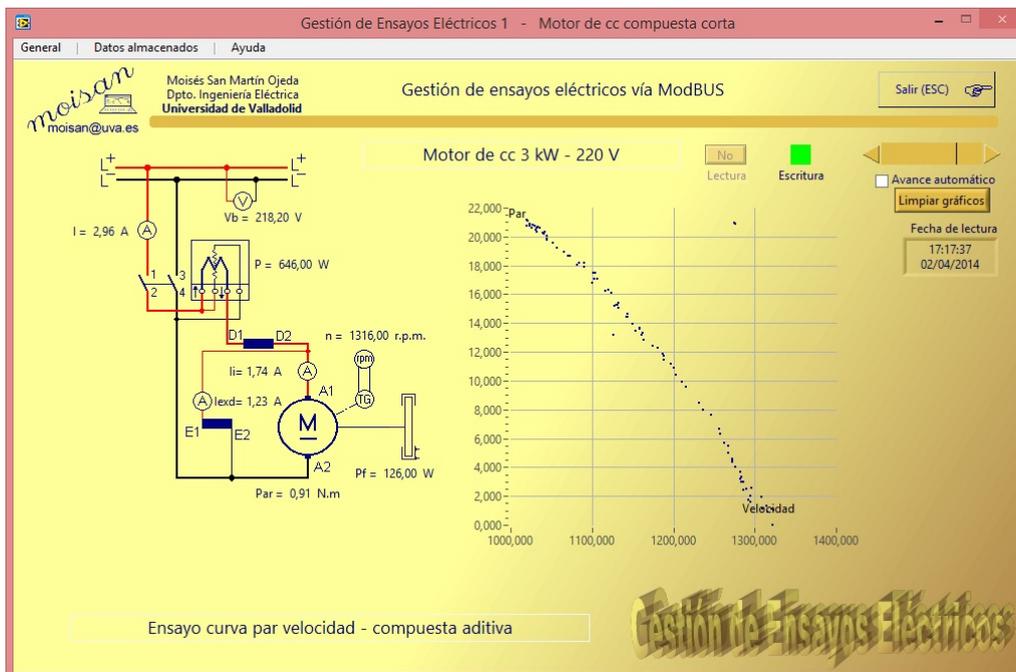


Figura 212.- Curva de par-velocidad (Fuente: Elaboración propia)

Dado que se adquieren otras variables (potencias, tensiones, corrientes, velocidad) es posible obtener el par y representar la curva de par-velocidad (véase la figura 212).

#### 4.6.7.- Ensayos excitación compuesta larga y determinación de curvas características

Con el sistema de gestión y control se han realizado una serie de ensayos para determinar las características de funcionamiento que se detallan a continuación.

#### Curva de velocidad frente a la variación de la carga

La figura 213 representa el ensayo del motor de corriente continua excitación compuesta corta en el que se ha variado la corriente del inducido (la carga mecánica) y se ha medido la velocidad.

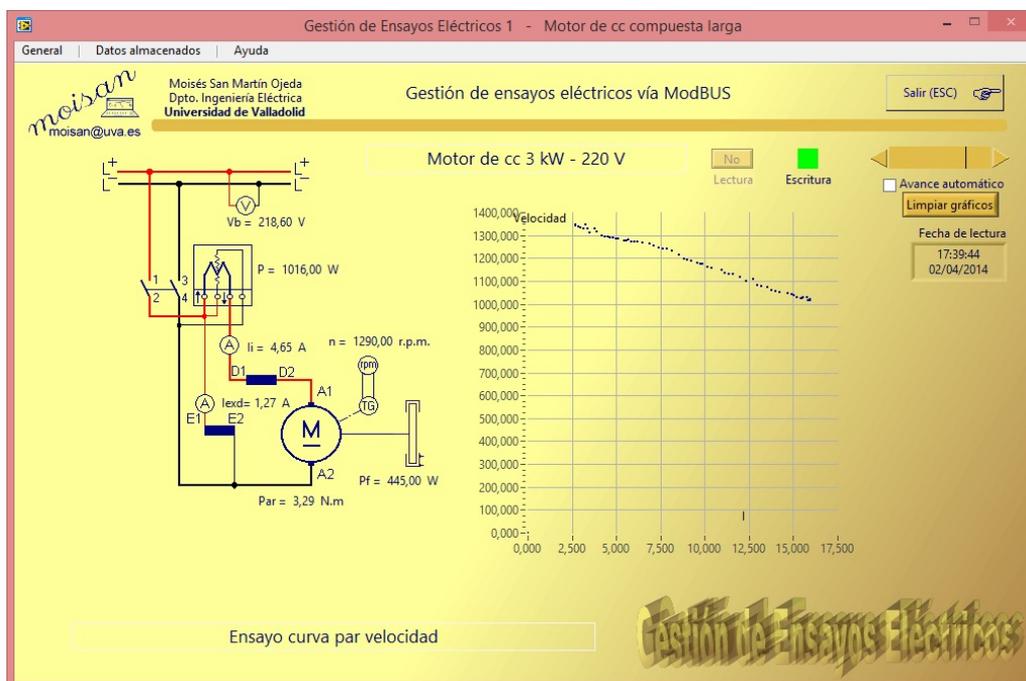


Figura 213.- Variación de velocidad frente a la carga (Fuente: Elaboración propia)

Dado que se adquieren otras variables (potencias, tensiones, corrientes, velocidad) es posible obtener el par y representar la curva de par-velocidad (véase la figura 214).

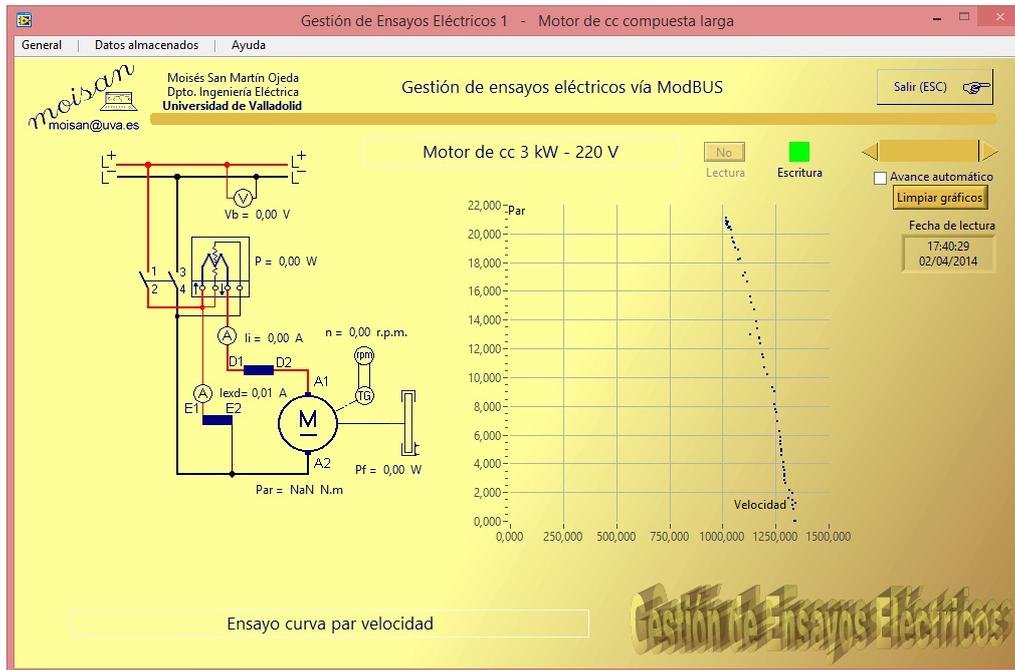


Figura 214.- Curva de par-velocidad (Fuente: Elaboración propia)

## 4.7- Aplicaciones WEB e Internet

Las nuevas tecnologías de Internet se han aplicado de diferentes modos en el sistema de gestión y control desarrollado en esta tesis.

### 4.7.1.- Publicación de datos en la nube

La utilización de sistemas de almacenamiento remoto permite liberar a los dispositivos físicos de ocupar espacio y posibilita el acceso a los datos desde diferentes orígenes.

El sistema desarrollado en esta tesis permite el almacenamiento de los datos en la nube, con la única condición de que el servidor de almacenamiento remoto soporte el protocolo WebDAV, que incorpora características de seguridad mediante claves de identificación y acceso.

En la figura 215 se representan las diferentes carpetas donde se almacenan de forma automática los datos en el servidor BOX.

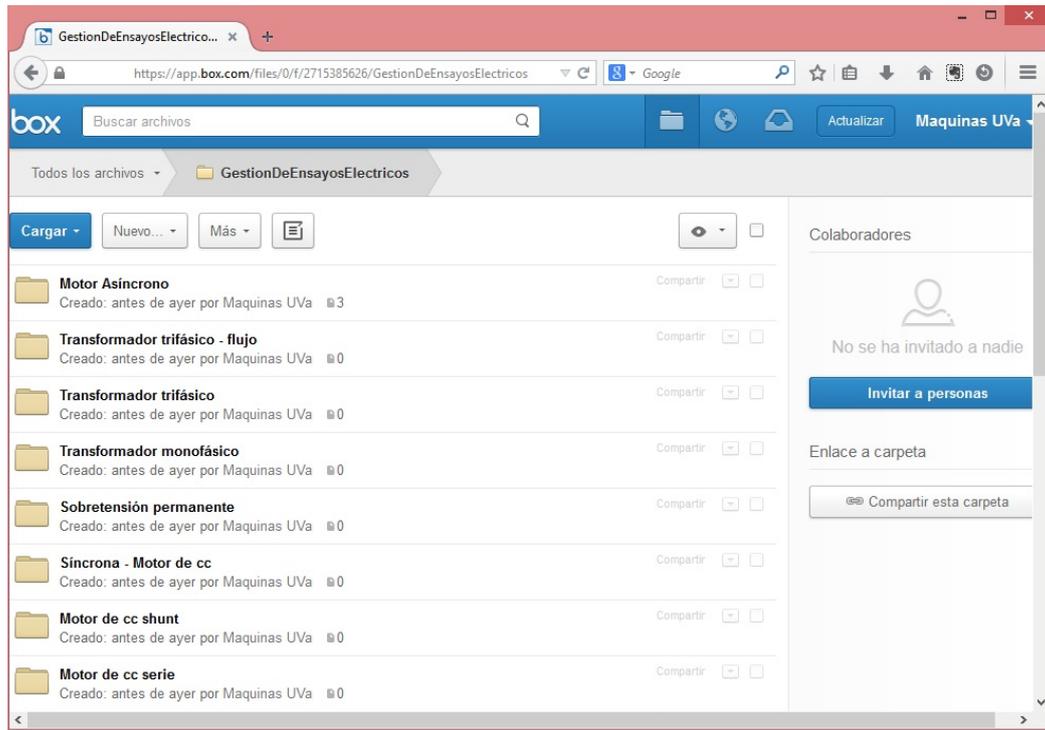


Figura 215.-Datos en servidor Box (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 216 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

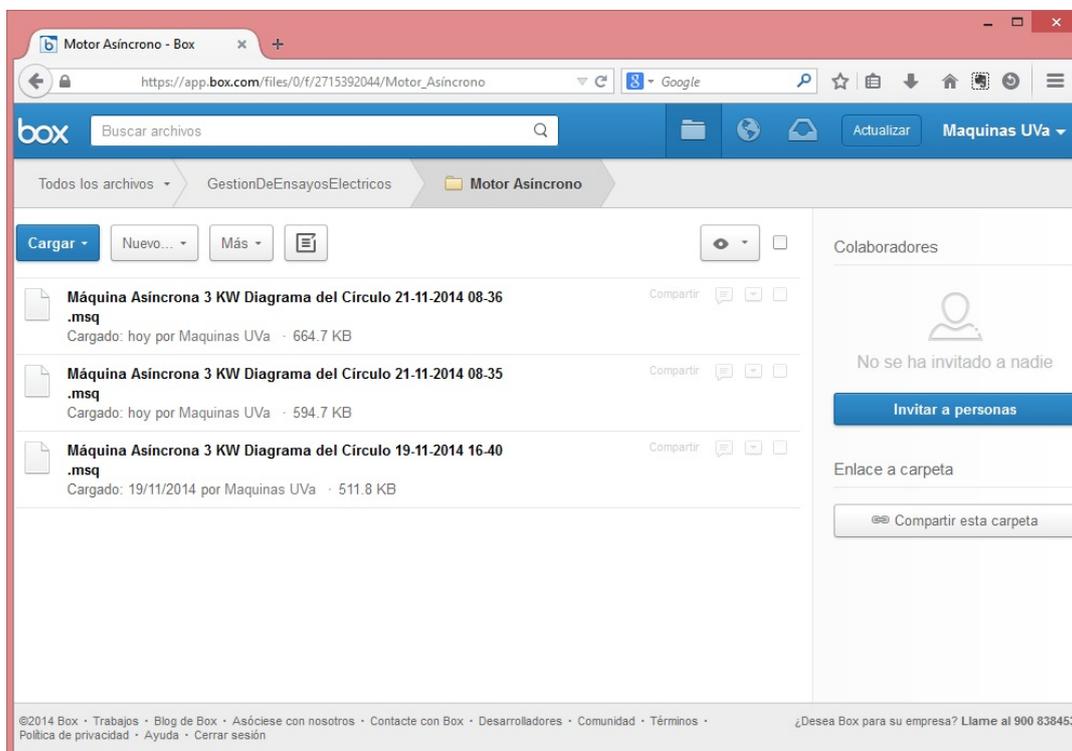


Figura 216.-Datos en servidor Box (2) (Fuente: Elaboración propia)

Otro de los servidores que se ha utilizado para el almacenamiento es el servidor OwnCloud (véase la figura 217).

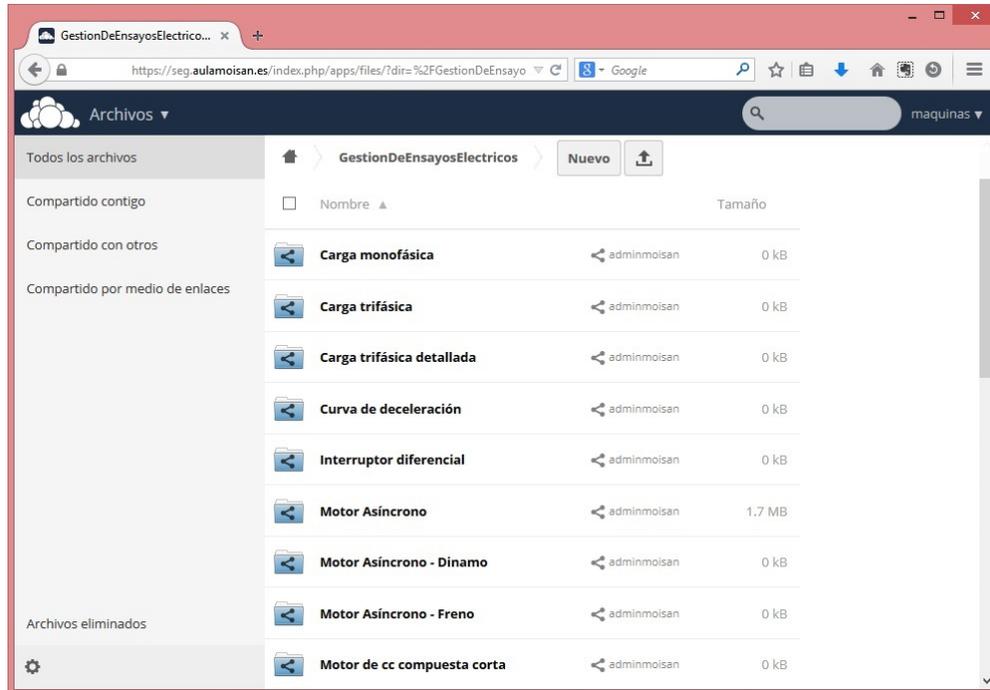


Figura 217.-Datos en servidor OwnCloud (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 218 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

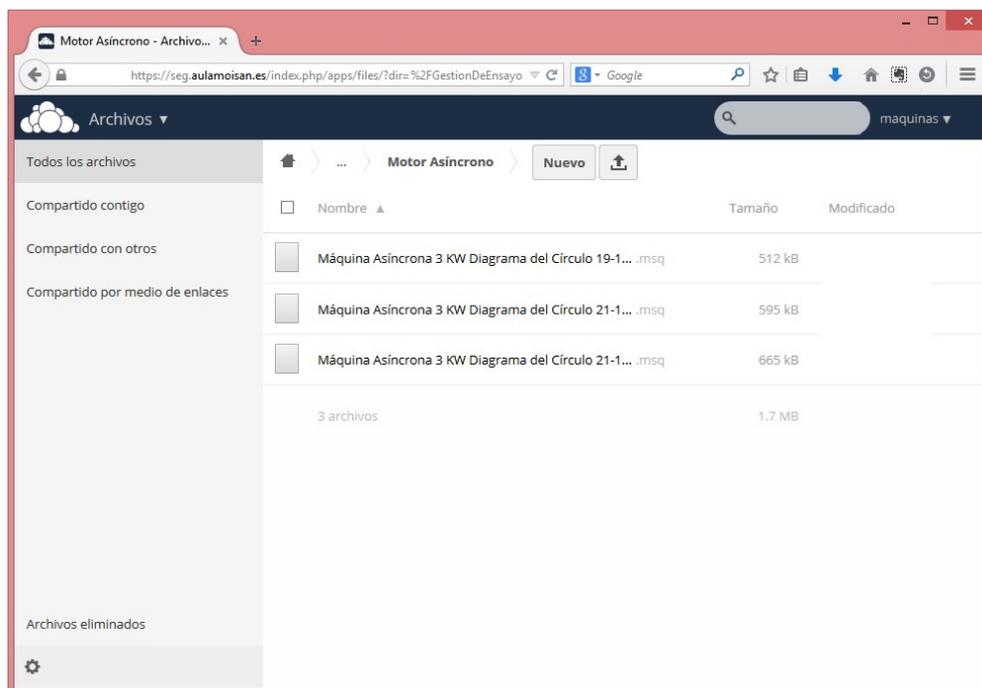


Figura 218.-Datos en servidor OwnCloud (2) (Fuente: Elaboración propia)

Otro de los servidores que se ha utilizado para el almacenamiento es el servidor Google Drive (véase la figura 219).

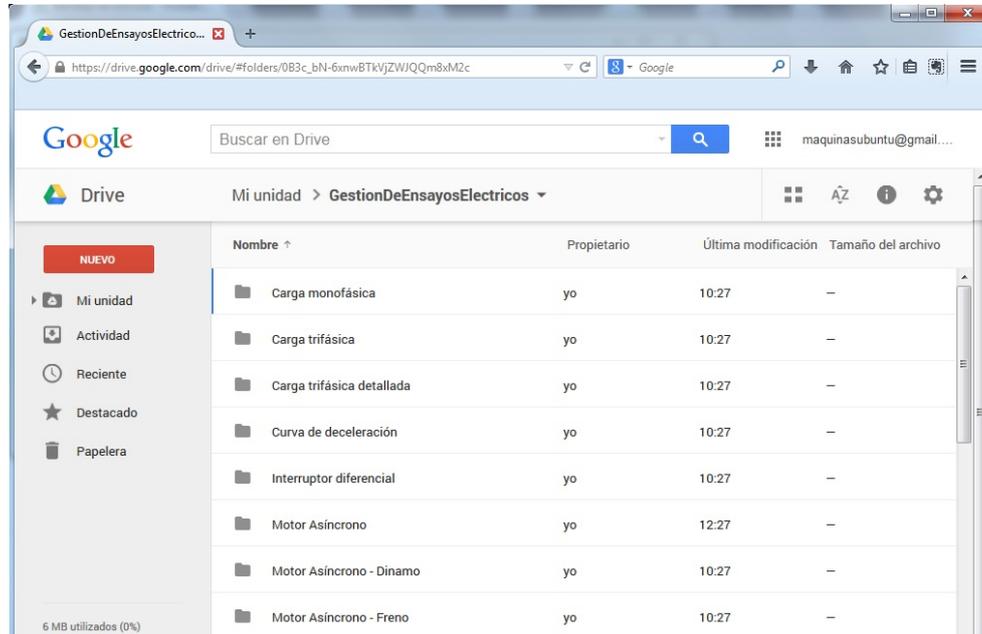


Figura 219.-Datos en servidor Google Drive (1) (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 220 se muestra un detalle de la carpeta “Motor Asíncrono” donde se han almacenado datos de funcionamiento de la máquina síncrona.

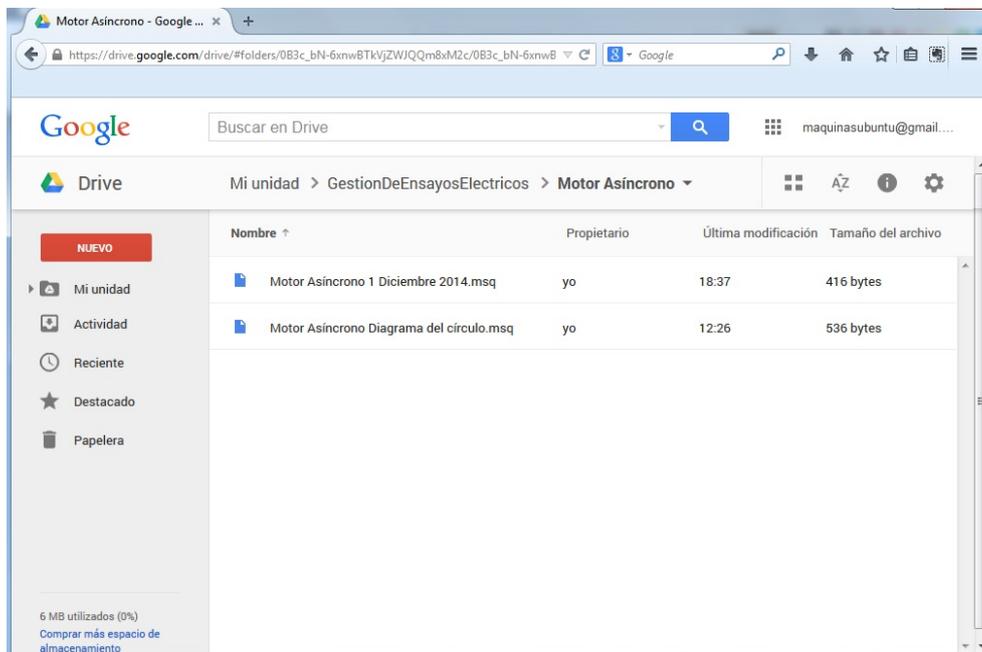


Figura 220.-Datos en servidor Google Drive (2) (Fuente: Elaboración propia)

Todos estos datos pueden ser gestionados desde el software de gestión y control, pudiendo tanto almacenar datos en estos servidores como leer de estos servidores sin

ocupar espacio en el equipo físico donde está implementado dicho software (véase la figura 221).

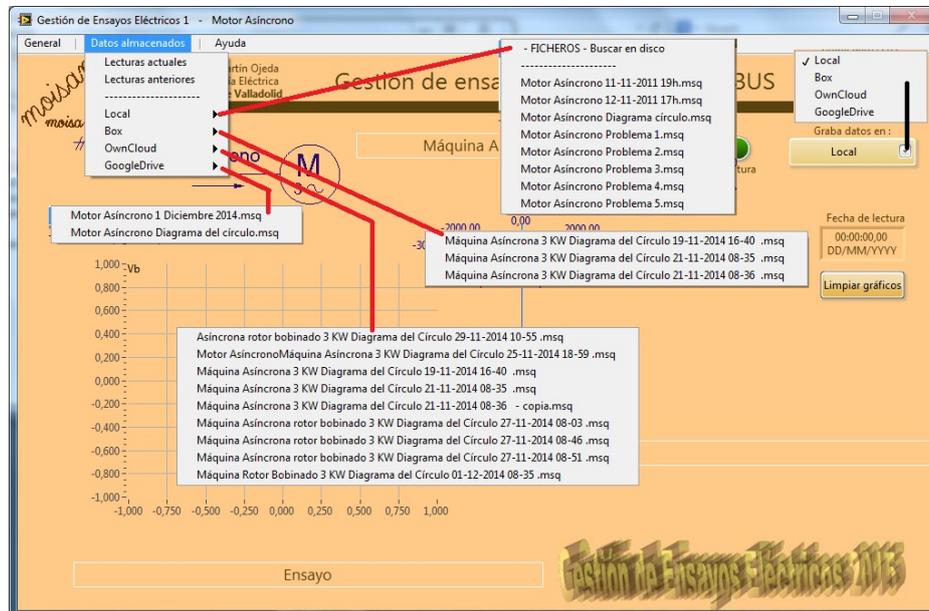


Figura 221.-Gestión de ficheros con el software de gestión y control (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.7.2.- Visualización y control vía WEB

Las aplicaciones WEB van a permitir la visualización y control del proceso industrial desde una página WEB, sin necesidad de tener instalado el sistema de gestión y control, y en dispositivos de lo más diversos (teléfonos móviles, tablets, etc.). En la figura 222 se representa el acceso vía WEB desde dispositivo Tablet.

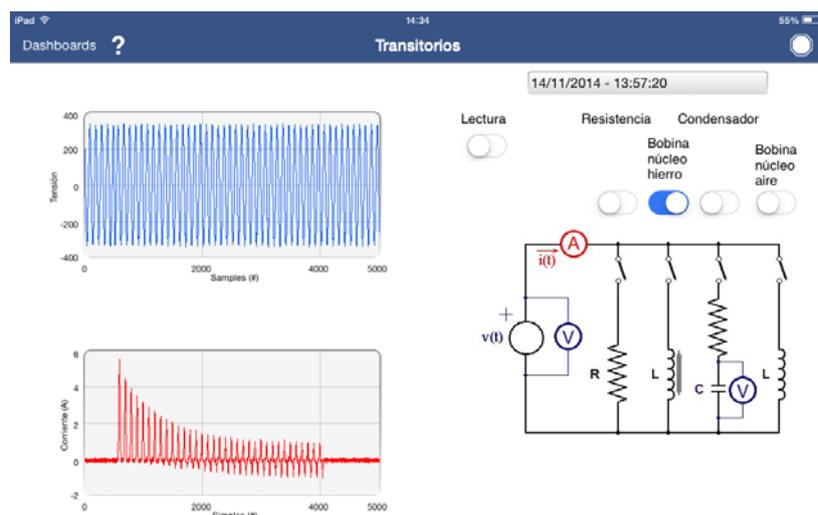


Figura 222.- Acceso desde dispositivo Tablet (Fuente: Elaboración propia)

Las misma aplicación se puede acceder vía WEB desde ordenador de despacho (véase la figura 223).

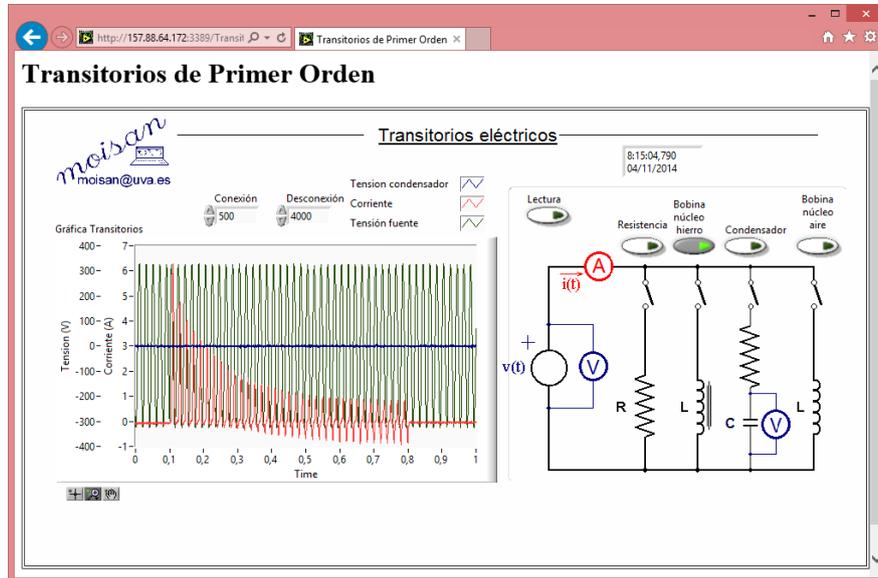


Figura 223.- Acceso WEB desde ordenador (Fuente: Elaboración propia)

La plataforma desarrollada en la realización de esta Tesis permite la publicación del software desarrollado en página WEB.

Se han desarrollado, a título de ejemplo, software de control vía WEB para la adquisición de tensiones y corrientes, que se muestran a continuación.

Estos montajes se han realizado físicamente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, si bien se puede controlar remotamente vía WEB desde cualquier lugar.

#### 4.7.3.- Control WEB para el estudio de transitorios eléctricos

Se ha implementado un montaje para el estudio de transitorios para varias cargas elementales: resistencias, bobinas y condensadores.

##### Transitorio en resistencia eléctrica

El siguiente montaje, mostrado en la figura 224 realiza la conexión y desconexión de una resistencia eléctrica.

Obsérvese que no se produce transitorio alguno por no ser un elemento que acumula energía eléctrica.

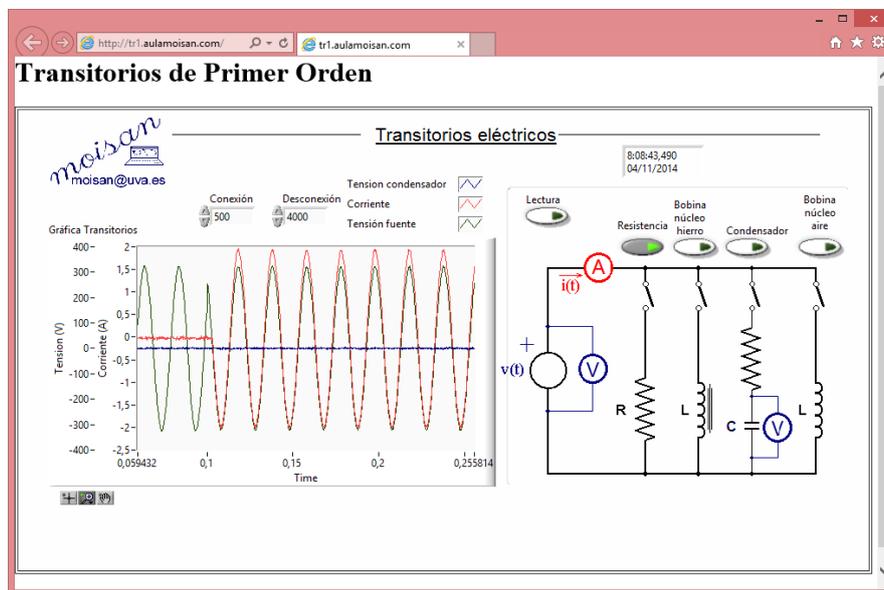


Figura 224.- Transitorio en resistencia eléctrica (Fuente: Elaboración propia)

### Transitorio en bobina con núcleo de aire

El siguiente montaje, mostrado en la figura 225 realiza la conexión y desconexión de una bobina eléctrica con núcleo de aire. En este caso se produce transitorio en la corriente de la bobina.

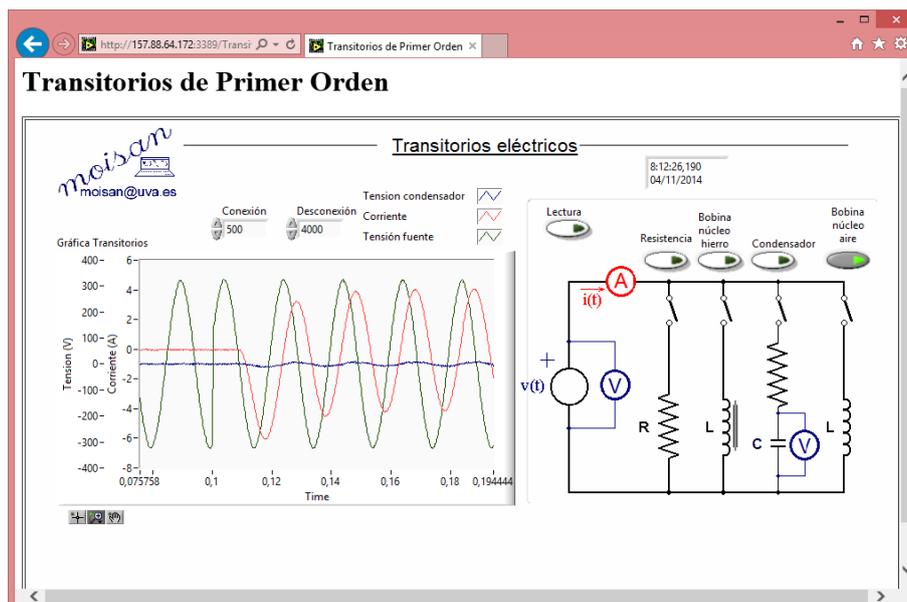


Figura 225.- Transitorio en bobina con núcleo de aire (Fuente: Elaboración propia)

### Transitorio en bobina con núcleo ferromagnético

El siguiente montaje, mostrado en la figura 226 realiza la conexión y desconexión de una bobina eléctrica con núcleo ferromagnético. En este caso se produce transitorio en la corriente de la bobina. Obsérvese el comportamiento no magnético de este circuito.

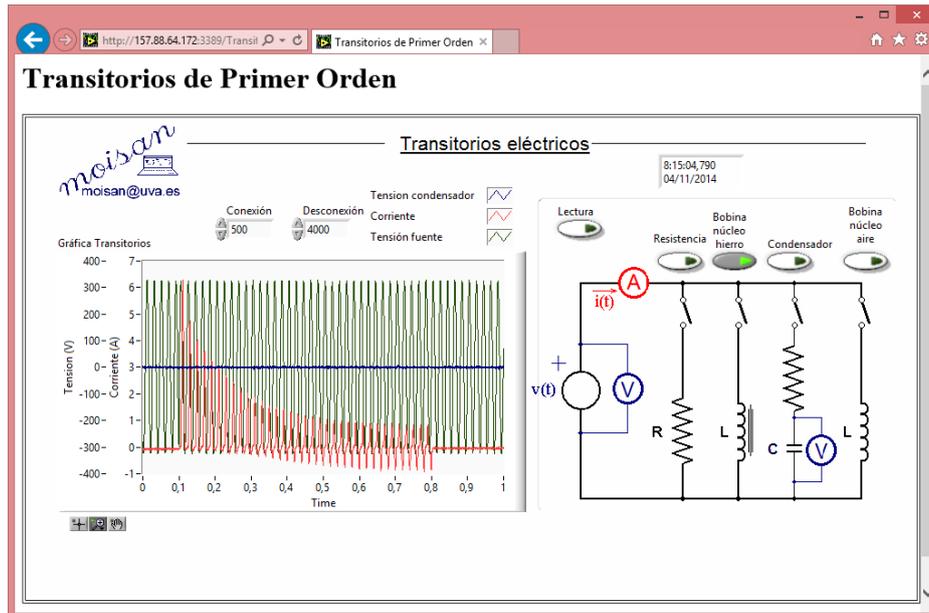


Figura 226.- Transitorio en bobina con núcleo ferromagnético (Fuente: Elaboración propia)

Una vez alcanzado el periodo estacionario, la corriente en la bobina sería la típica corriente de vacío con armónicos (figura 227).

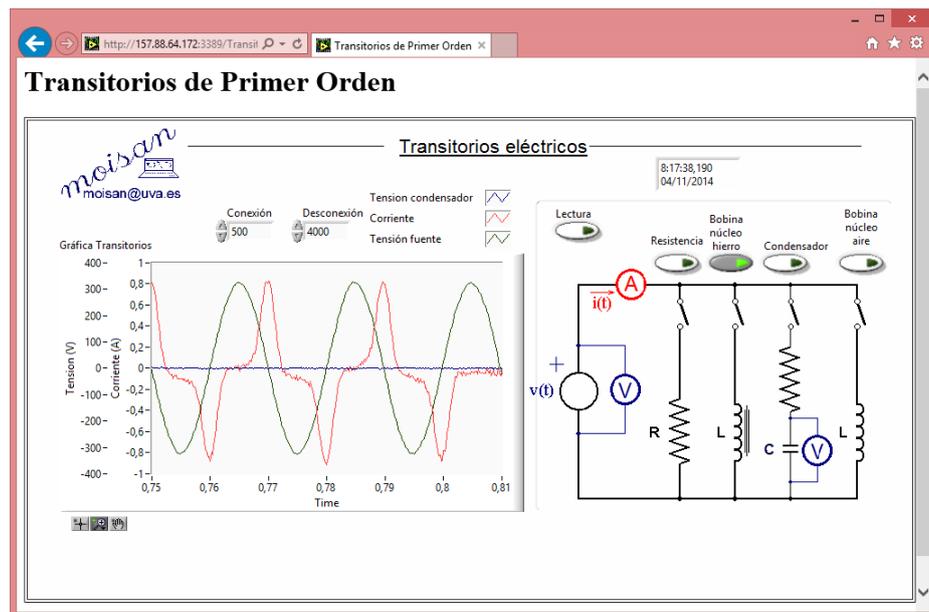


Figura 227.- Bobina con núcleo ferromagnético en estado estacionario (Fuente: Elaboración propia)

## Transitorio en condensador

El siguiente montaje, mostrado en la figura 228 realiza la conexión y desconexión de un condensador. En este caso se produce transitorio en la tensión del condensador.

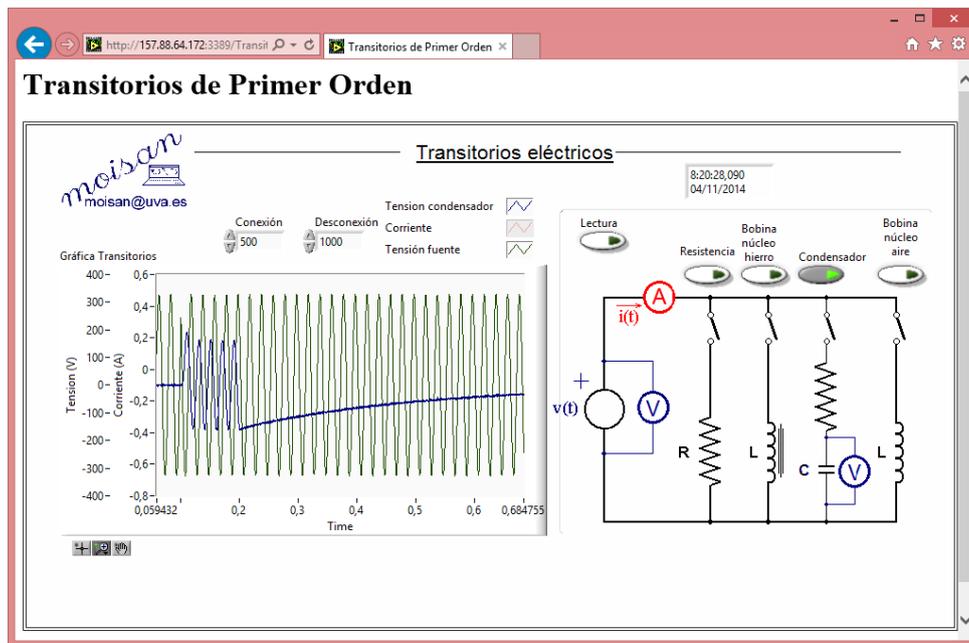


Figura 228.- Transitorio en condensador (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 229 se presenta un detalle de la conexión del condensador.

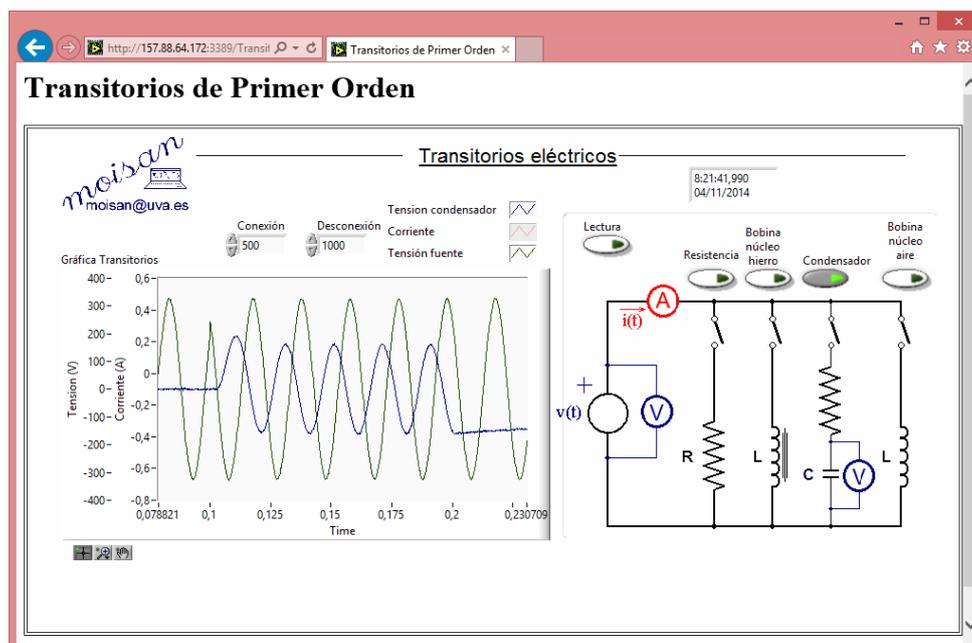


Figura 229.- Detalle transitorio en condensador (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.7.3.1.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden

Para el estudio de los transitorios de primer orden en circuitos eléctricos se ha diseñado un simulador software que analiza los principales fenómenos asociados a los transitorios eléctricos cuando se utilizan elementos lineales (figura 230).

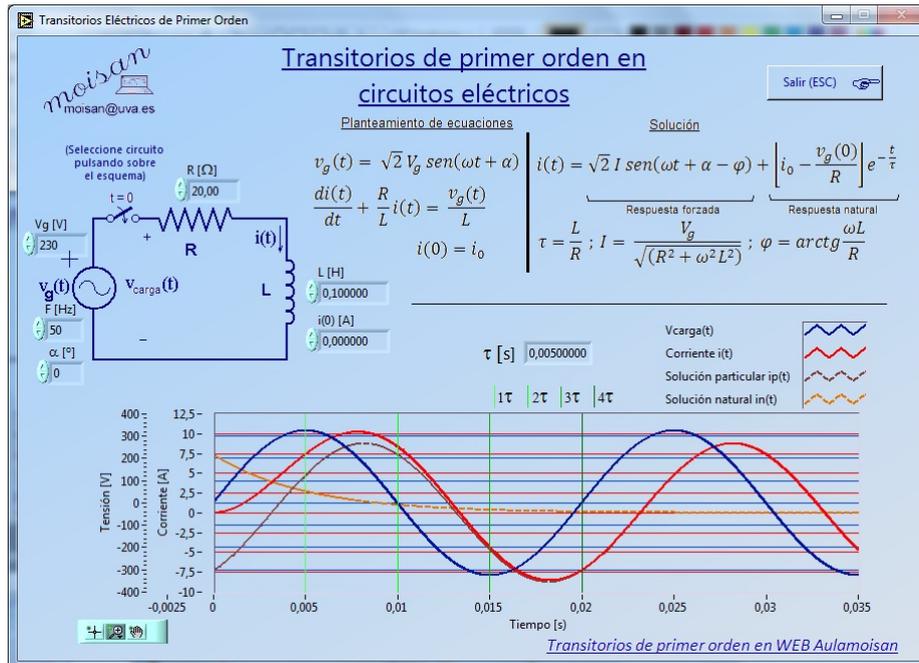


Figura 230.- Simulador de transitorios eléctricos de primer orden (Fuente: Elaboración propia)

El programa desarrollado resuelve la conexión de un generador (en el instante de tiempo  $t = 0$ ) a una carga formada por una resistencia en serie con una autoinducción, o a una resistencia en serie con un condensador.

El generador a conectar puede ser tanto de corriente continua como de corriente alterna.

Para su resolución se plantean las ecuaciones asociadas al fenómeno a analizar, ecuaciones que se representan a continuación para los distintos circuitos objeto de estudio y en las que en todos los casos se ha escogido como incógnita la asociada al elemento de almacenamiento de energía (autoinducción o condensador) (figura 231 a figura 234).

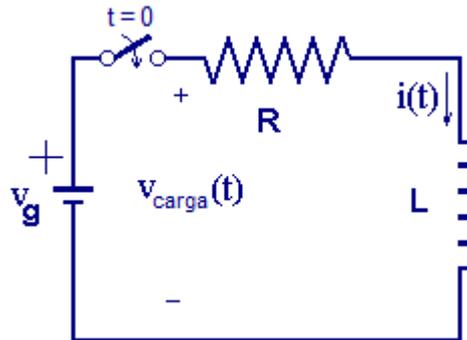


Figura 231.- Análisis del circuito RL en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

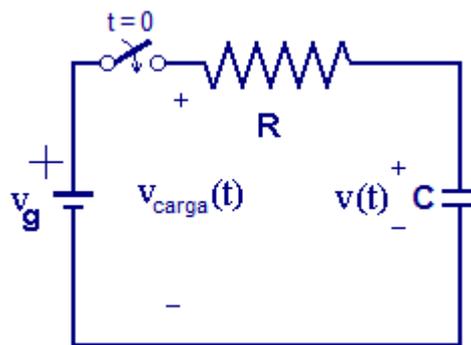


Figura 232.- Análisis del circuito RC en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

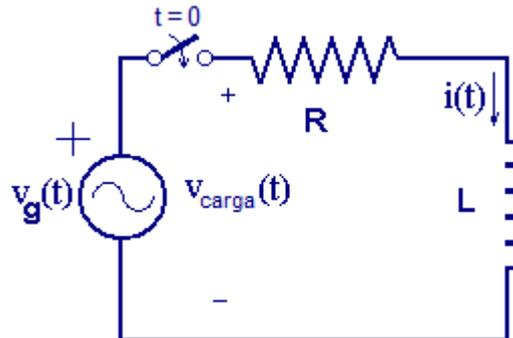


Figura 233.- Análisis del circuito RL en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

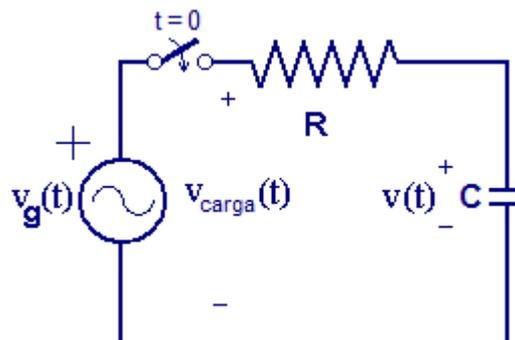


Figura 234.- Análisis del circuito RC en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Una vez planteadas las ecuaciones se resuelven recurriendo a métodos numéricos mediante la utilización del método de resolución de ecuaciones diferenciales de Runge Kutta de cuarto orden.

En la respuesta se caracterizará la constante de tiempo, la respuesta natural y la respuesta particular (véase la figura 235).

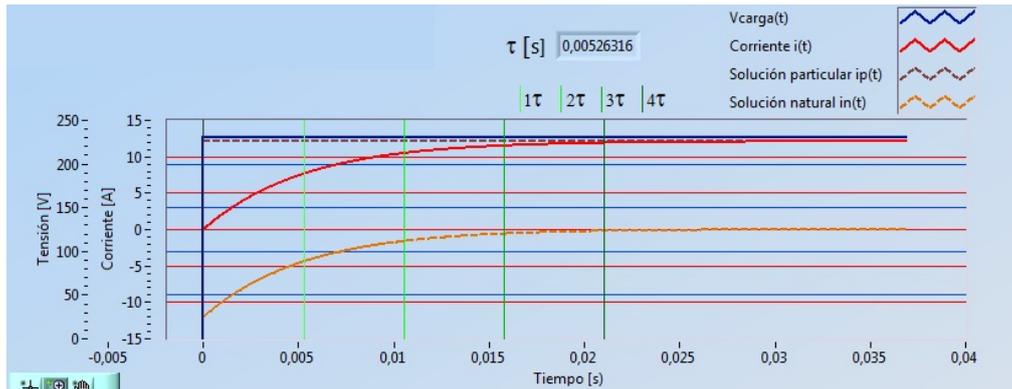


Figura 235.- Transitorios eléctricos de primer orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.7.3.2.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden

Para el estudio de los transitorios de segundo orden en circuitos eléctricos se ha diseñado un simulador software que analiza los principales fenómenos asociados a los transitorios eléctricos (figura 236).

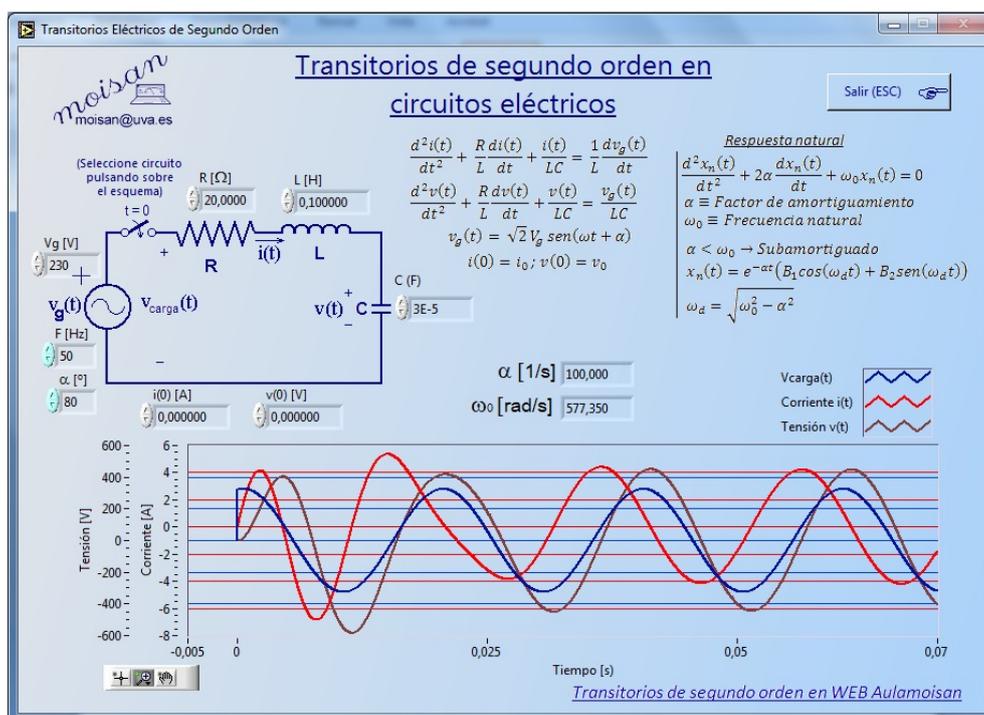


Figura 236.- Simulador de transitorios eléctricos de segundo orden (Fuente: Elaboración propia)

El programa desarrollado resuelve la conexión de un generador (en el instante de tiempo  $t = 0$ ) a una carga eléctrica. La carga estará formada por una resistencia en serie con una autoinducción y un condensador también conectados en serie; y también por una resistencia en serie con una autoinducción y un condensador, estos dos últimos conectados en paralelo.

El generador a conectar puede ser tanto de corriente continua como de corriente alterna.

Para su resolución se plantean las ecuaciones asociadas al fenómeno a analizar, ecuaciones que se representan a continuación para los distintos circuitos objeto de estudio y en las que en todos los casos se ha escogido como incógnita la asociada al elemento de almacenamiento de energía, la corriente en el caso de la autoinducción y la tensión en caso del condensador (figura 237 a figura 240).

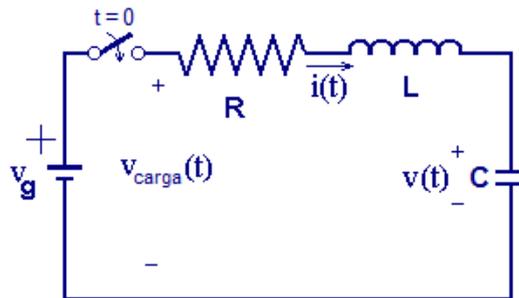


Figura 237.- Análisis del circuito RLC serie en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

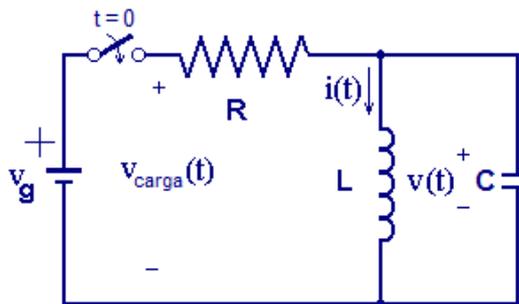


Figura 238.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente continua (Fuente: Elaboración propia)

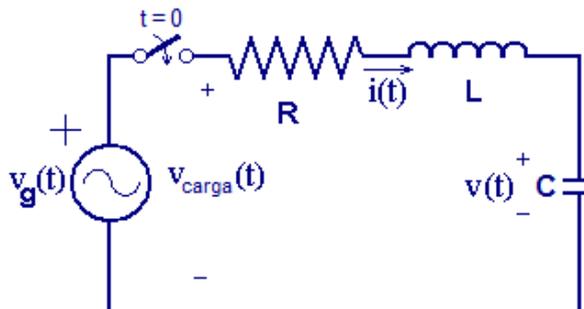


Figura 239.- Análisis del circuito RLC serie en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

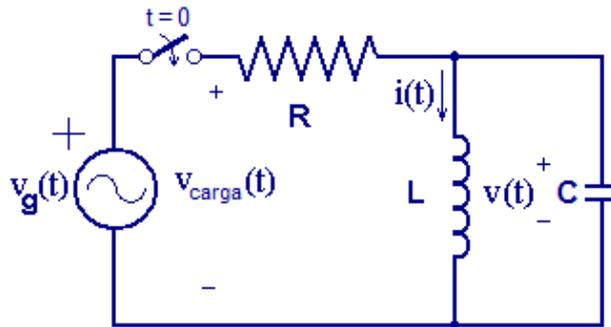


Figura 240.- Análisis del circuito RLC paralelo en corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Una vez planteadas las ecuaciones se resuelven recurriendo a métodos numéricos mediante la utilización del método de resolución de ecuaciones diferenciales de Runge Kutta de cuarto orden.

En la gráfica se representará la tensión de la carga, así como la corriente de la autoinducción y la tensión del condensador.

La respuesta completa estará compuesta por dos componentes: la respuesta natural y la respuesta forzada (del mismo tipo que la señal de la fuente de tensión).

Se caracteriza la respuesta natural como solución a la ecuación homogénea, en la que se define el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural (figura 241).

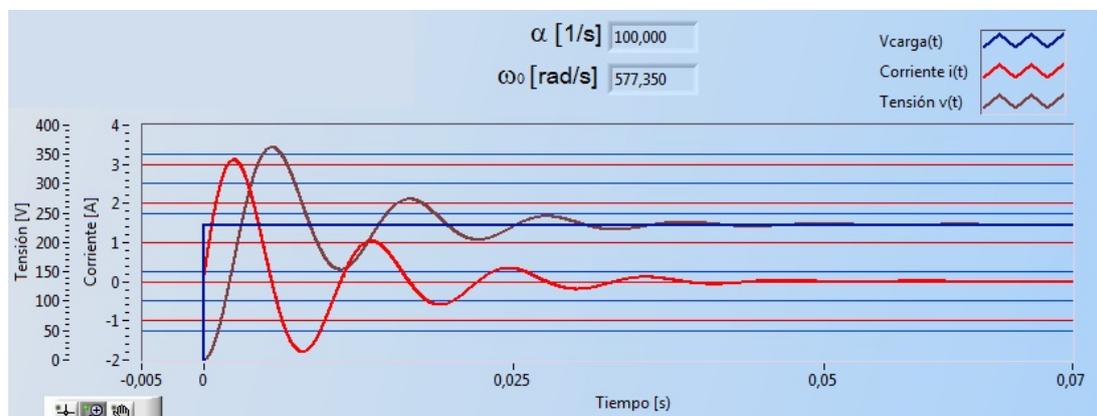


Figura 241.- Transitorios eléctricos de segundo orden. Detalle respuesta natural y particular (Fuente: Elaboración propia)

La resolución de la ecuación da origen a tres casos diferentes respuesta natural, sobreamortiguado, subamortiguado y críticamente amortiguado.

#### 4.7.4.- Control WEB de cargas monofásicas

Se ha implementado un montaje para el estudio de circuitos monofásicos compuestos por generador de corriente alterna conectado a cargas elementales: resistencia, bobina o condensador.

En la figura 242 se representa la adquisición de datos (y control WEB) correspondiente a diferentes cargas monofásicas.

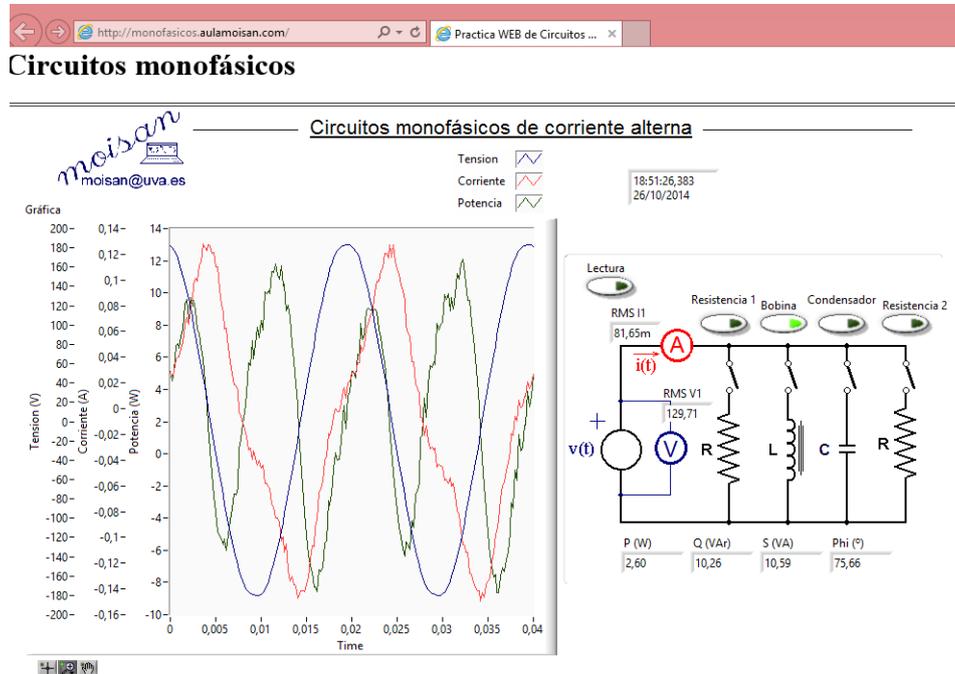


Figura 242.- Control WEB de cargas monofásicas (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.7.5.- Control WEB de cargas trifásicas

Se ha implementado un montaje para el estudio de circuitos monofásicos compuestos por generador de corriente alterna conectado a cargas elementales: resistencia, bobina o condensador.

En la figura 243 se representa la adquisición de datos (y control WEB) correspondiente a diferentes cargas trifásicas.

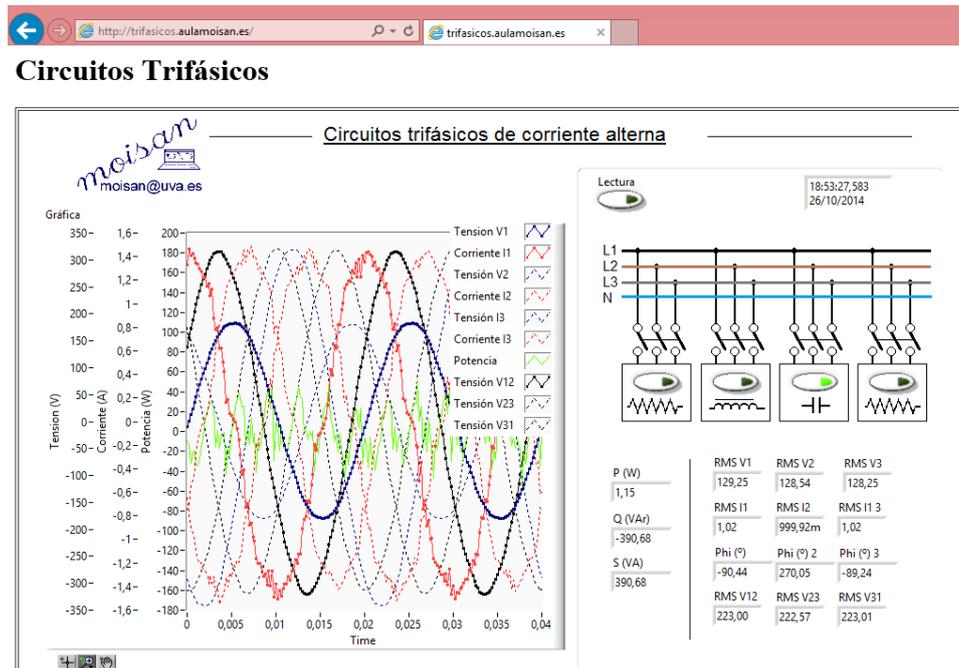


Figura 243.- Control WEB cargas trifásicas (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.8- Aplicación industrial

El sistema presentado en esta Tesis permite su implementación de manera inmediata en industria, dada las características de los equipos industriales empleados y su utilidad.

- a) Los aparatos de medida utilizados (véase la figura 244 y la figura 245) son aparatos habituales en la industria.



Figura 244.- Panel de medidas 1 (Fuente: Elaboración propia)



Figura 245.- Panel de medidas 2 (Fuente: Elaboración propia)

- b) Los equipos de control utilizados son los habituales en industria (figura 246 y figura 247):



Figura 246.- Autómata utilizado (Fuente: Elaboración propia)



Figura 247.- Equipo de control en tiempo real utilizado (Fuente: Elaboración propia)



- c) Los protocolos de comunicaciones utilizados en el desarrollo de esta aplicación son industriales
- Modbus
  - Ethernet
  - Ftp
  - WebDAV

Como ejemplo de aplicación industrial se ilustran algunas de los sistemas implementados en industria por el autor en el ámbito de esta Tesis.

#### 4.8.1.- Validación de librerías de máquinas eléctricas en simulador EcosimPRO

Entre las aplicaciones industriales del sistema de gestión y control desarrollado en el esta Tesis Doctoral ha sido la validación de una serie de librerías de máquinas eléctricas del Simulador EcosimPRO, de Empresarios Agrupados Internacional, A.I.E. ([www.ecosimpro.com](http://www.ecosimpro.com)).

La empresa propietaria del Simulador EcosimoPRO **Empresarios Agrupados A.I.E.** es una Agrupación de Interés Económico y está participada por GHESA, TRSA, IBERDROLA Ingeniería y Construcción, TRPI y GAS NATURAL FENOSA ENGINEERING.

EcosimPro es un programa de modelado y simulación con el objetivo de conocer el comportamiento de sistemas físico-químicos en determinadas situaciones de operación.

EcosimPro se ha utilizado en un gran abanico de disciplinas. En líneas generales, las principales áreas en las que se ha empleado, entre otras muchas, han sido las siguientes:

- **Control ambiental y soporte de vida en naves tripuladas (ECLSS):** Es la herramienta oficial en este campo de la ESA. También son usuarios de esta librería NASA, Agencia Espacial Canadiense, EADS, Alenia, etc. para diseño de sus experimentos en naves tripuladas.
- **Propulsión Espacial:** La ESA ha desarrollado una serie de librerías estándar que actualmente utilizan una gran parte de las compañías europeas que trabajan en este sector. EcosimPro se ha usado para

modelar sistemas de propulsión química, eléctrica, cohete, etc. que son hoy día el estado del arte en esta área.

- **Energía:** Se ha empleado en múltiples proyectos relacionados con las Centrales de Generación (Ciclos Combinados, Nucleares, etc.) para hacer estudios térmicos, golpe de ariete, transitorios en tuberías, etc. Además se han modelado plantas termosolares, celdas de combustible, etc.
- **Procesos:** En procesos industriales ha servido para modelar plantas desaladoras, plantas azucareras, plantas de producción de alimentos, etc. que reproducen su comportamiento real.
- **Criogenia:** Se ha utilizado EcosimPro para modelar sistemas criogénicos en sistemas tan complejos como el LHC (Large Hadron Collider) del CERN que ha permitido estudiar y mejorar la estrategia del sistema de refrigeración. Se ha usado un conjunto de refrigerantes con una temperatura de operación entorno a los 4.5K.
- **Sistemas Fluidos:** Existe una potente librería para modelar sistemas fluidos en una y dos fases. Es usada hoy en día por empresas del mundo de la energía y de la aeronáutica para modelar distintos procesos.
- **Control:** Usado ampliamente en aplicaciones multidisciplinarias que requieren sistemas de control monovariante, multivariante, avanzado, predictivo, etc. El modelado de este sistema se hace de una manera natural al representar cada componente físico por un componente de control de EcosimPro.
- **Sistemas discretos:** Se han modelizado complejos sistemas de manejo de maletas para el aeropuerto de barajas para hacer dimensionamientos y estudios de diseño y cuellos de botella.

Empresarios Agrupados ha desarrollado unas librerías de Máquinas Eléctricas para EcosimPRO que integra todo un abanico de componentes eléctricos como máquinas, transformadores, convertidores de potencia, algoritmos de control, etc. (véase la figura 248 donde se representa parte de los elementos de esta librería).

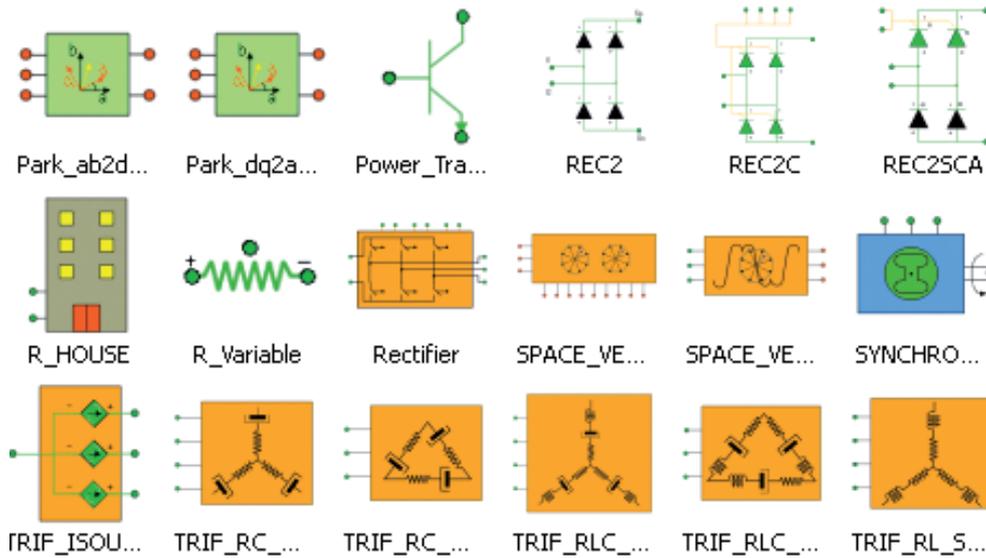


Figura 248.- Parte de la librería de Máquinas Eléctricas de EcosimPRO (Fuente: WEB [www.ecosimpro.com](http://www.ecosimpro.com))

Se representa a continuación un ejemplo de control de corriente sobre un motor de inducción realizado con EcosimPRO (figura 249).

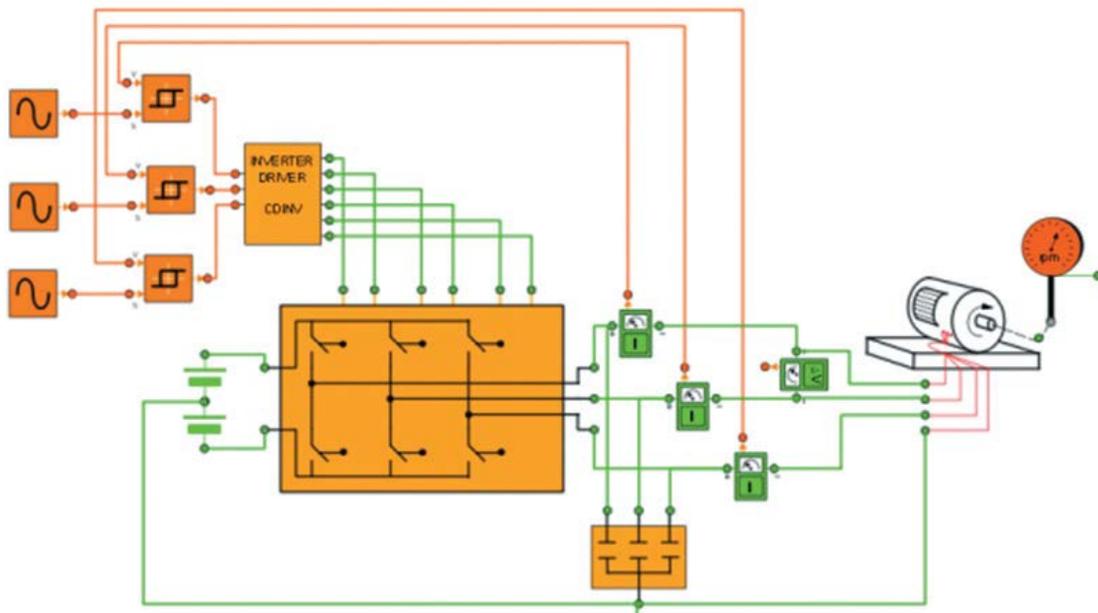


Figura 249.- Ejemplo de simulación de motor en EcosimPRO (Fuente: WEB [www.ecosimpro.com](http://www.ecosimpro.com))

Mediante los ficheros de datos de la aplicación desarrollada en el ámbito de esta tesis se han podido validar las nuevas librerías de Máquinas Eléctricas referidas a los siguientes componentes:

- Máquinas de inducción.
- Transformadores eléctricos

#### **4.8.2.- Sistema de Telegestión de Minicentrales Hidráulicas**

El autor de esta Tesis ha trabajado en el desarrollo de un sistema de Telegestión de Minicentrales Hidráulicas en colaboración con la empresa Acotec Castilla S.L. para la empresa Iberdrola Producción.

El sistema se ha implementado en las siguientes Minicentrales que pertenecen a la producción del río Duero:

- Soto Alburez:
  - Un grupo de producción de 460 kW.
  - Salto: 12,12 m.
  - Caudal: 5 m<sup>3</sup>/s
  
- El Cabildo:
  - Dos grupos de producción de 360 kW cada uno.
  - Salto: 2,70 m.
  - Caudal: 26,716 m<sup>3</sup>/s
  
- Pesqueruela:
  - Dos grupos de producción de 935 kW cada uno.
  - Salto: 5,40 m.
  - Caudal: 40 m<sup>3</sup>/s
  
- Puente Congosto:
  - Un grupo de producción de 930 kVA.
  - Salto: 1,37 m.
  - Caudal: 10 m<sup>3</sup>/s
  
- Puerto Seguro:
  - Dos grupos de producción de 350 kW y 280 kW.
  - Salto: 88 m.
  - Caudal: 0,78 m<sup>3</sup>/s
  
- El Chorro:
  - Un grupo de producción de 1.280 kVA.
  - Salto: 212,1 m.
  - Caudal: 0,9 m<sup>3</sup>/s

- Zaburdon:
  - o Un grupo de producción de 1.280 kVA.
  - o Salto: 157,7 m.
  - o Caudal: 1,024 m<sup>3</sup>/s

El sistema permite la visualización desde despacho del estado de cada instalación (potencias y energías activas y reactivas producidas, nivel de aguas arriba y abajo, estados y alarmas), así como el control remoto de algunas funciones tales como Rearme de Alarmas, Paradas de Grupos de Producción y Puesta en Marcha de Grupos de Producción.

Se representa en la figura 250 un ejemplo de la pantalla del software de Telegestión correspondiente a una de las Minicentrales (El Cabildo, en Valladolid).

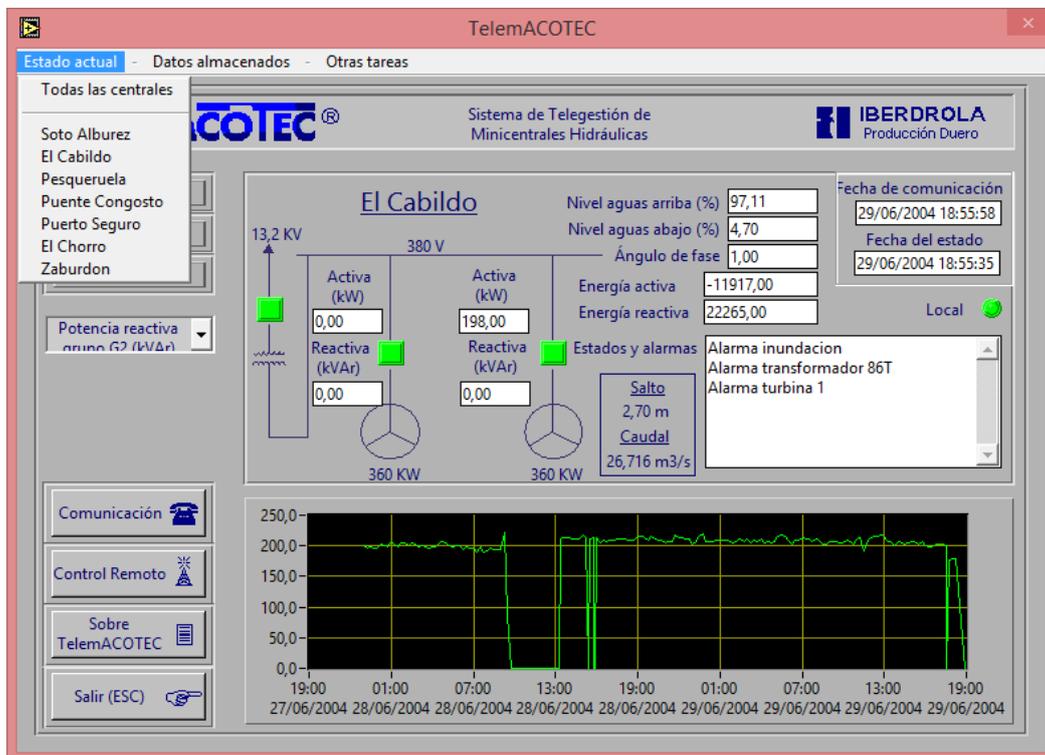


Figura 250.- Telegestión de Minicentral El Cabildo (Fuente: Elaboración propia)

El sistema desarrollado consiste en una serie de equipos de adquisición y control en las instalaciones de la central (autómata Siemens con módulo de comunicaciones GSM) y software de Telegestión para programas en Despachos de control.

El autor ha trabajado principalmente en la programación del software de Telegestión, en la elección de los equipos en el local de la Minicentral, y en las comunicaciones GSM entre Despacho y Autómata Siemens.

#### 4.8.3.- Gestión de alarmas de una planta de Cogeneración

El autor de esta Tesis ha trabajado en el desarrollo de un sistema de Gestión de alarmas de una Planta de Cogeneración de 4.400 KW en las instalaciones de S.A. La Cerámica, de Valladolid.

La Planta de Cogeneración dispone de un sistema propio de Supervisión desarrollado por la empresa Eurotherm con el Software Scada Wonderware InTouch HMI.

El trabajo desarrollado por el autor de esta Tesis consiste en gestionar las alarmas de la instalación de cogeneración y su envío a teléfono móvil. Este trabajo surge del siguiente problema que exponemos a continuación. Para realizar la explotación de la instalación (24 horas al día) era necesario que los operarios permanecieran junto a la pantalla del programa Scada de Supervisión ya que, en caso de producirse una alarma en la misma no se presentaba más que en la pantalla de este programa. Mediante nuestro trabajo, es posible configurar las alarmas que se desee, y recibirlas en teléfono móvil, liberando al operario de estar físicamente junto al sistema de supervisión.

El trabajo incluye distintos niveles de comunicaciones, presentes también en el sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis:

- Comunicaciones de Intercambio Dinámico de Datos DDE y COM entre aplicaciones Windows.
- Comunicaciones GSM entre ordenador y teléfono móvil.

Se relacionan a continuación el conjunto de alarmas y/o estados que se han gestionado en la Planta de Cogeneración S. A. La Cerámica, de Valladolid:

- Alarma 1: Sistema de supervisión parado
- Alarma 2: Problema comunicación con el programa instalación
- Alarma 3: Alarma Transformador
- Alarma 4: Temperatura Transformador fábrica
- Alarma 5: Neutro Transformador fábrica
- Alarma 6: Presostato Transformador fábrica
- Alarma 7: Disparo Transformador fábrica
- Alarma 8: Falta a tierra Transformador T1
- Alarma 9: Temperatura Transformador T1
- Alarma 10: Nivel alto Transformador T1
- Alarma 11: Nivel bajo Transformador T1
- Alarma 12: Bucholtz Transformador T1
- Alarma 13: Disparo Transformador T1

- Alarma 14: Falta a tierra 6 kV
- Alarma 15: Falta c.c. en bastidores relés
- Alarma 16: Relés térmicos en motores CSA
- Alarma 17: Alta Temperatura refrigeración motor
- Alarma 18: Baja Temperatura refrigeración motor
- Alarma 19: Avería compresor aire
- Alarma 20: Interruptor abierto G1
- Alarma 21: Interruptor abierto G2
- Alarma 22: Interruptor abierto G3
- Alarma 23: Interruptor abierto G4
- Alarma 24: Interruptor abierto S1
- Alarma 25: Interruptor abierto SA
- Alarma 26: Interruptor fabrica abierto
- Alarma 27: Funcionamiento en modo isla
- Alarma 28: Motor 1 parado
- Alarma 29: Motor 2 parado
- Alarma 30: Inicio programa telealarmas



Figura 251.- Gestión de alarmas en S. A. La Cerámica (Fuente: Elaboración propia)

Se representa en la figura 251 la pantalla del software de Telealarmas desarrollado.

El autor de esta Tesis ha realizado el desarrollo completo de esta aplicación.

#### **4.9.- Discusión de resultados: Aplicación de la herramienta.**

En los apartados anteriores se ha realizado una presentación exhaustiva de una serie de aplicaciones prácticas utilizando la herramienta desarrollada.

Para demostrar que la herramienta desarrollada cumple con los objetivos marcados en esta tesis se han elegido los diferentes tipos (cinco) de máquinas eléctricas más representativas y que con mayor frecuencia se utilizan en el entorno industrial (transformadores monofásicos, transformadores trifásicos, máquina asíncrona y máquina de corriente continua). No obstante, cualquier otra máquina eléctrica se podría haber elegido para este fin.

En la aplicación de la herramienta a los transformadores eléctricos se ha procedido a elegir un modelo para analizar su funcionamiento: el modelo de circuito equivalente, que constituye el modelo más simple y habitual utilizado para el estudio del transformador. Cualquier otro modelo se podría haber elegido para el estudio del transformador.

A continuación se ha configurado la herramienta (gestión) para que realice los ensayos característicos sobre el transformador (vacío y cortocircuito) que determinan los parámetros del modelo. Con objeto de validar el modelo, se han realizado diversos ensayos de funcionamiento normal (en carga) que serán contrastados con la resolución analítica del modelo.

Para la resolución analítica del modelo ante cualquier carga de funcionamiento se usó el simulador generado en la herramienta que permite, a partir del modelo de circuito equivalente, calcular las variables de entrada y salida ante cualquier carga.

En todos los casos, las diferencias entre el funcionamiento real y el simulado no superan el 2% por lo que consideramos pertinente validar el modelo elegido.

En esta aplicación de la herramienta hemos querido analizar otro modelo usado más frecuentemente en el ámbito de la Automática y Electrónica, buscando determinar la equivalencia entre estos dos modelos. A partir del simulador se ha establecido la relación entre los parámetros de un modelo y otro. Dado que en este último modelo no aparecen parámetros que sí aparecen en el modelo anterior, se ha propuesto un nuevo modelo incorporando algún parámetro más.

En la aplicación de la herramienta a la máquina asíncrona o de inducción se ha elegido como modelo el más simple y habitual, el modelo de circuito equivalente. Con la herramienta se ha configurado para proceder al arranque y funcionamiento normal que permite la determinación de los parámetros característicos del modelo.



Una vez determinado el modelo se han determinado todos los puntos de funcionamiento con el simulador creado al efecto. La validación del modelo se ha realizado comparando los datos reales con los datos calculados (simulados).

Otros modelos se podían haber elegido y otros ensayos que determinaran el modelo, habiéndose optado por este por su sencillez. De haberse utilizado otro modelo simplemente hubiera sido necesario configurar la herramienta para establecer los ensayos que determinen los parámetros del modelo.

En la aplicación de la herramienta a la máquina síncrona se ha configurado ésta para determinar una serie de curvas características habituales en el estudio de este tipo de máquinas (curva de vacío, característica reactiva, característica de cortocircuito, curvas en V y ensayo de deslizamiento).

Del simulador generado en la herramienta se han comparado las curvas en V simuladas con las determinadas en el ensayo con datos reales.

En la aplicación de la herramienta a la máquina de corriente continua se ha configurado la misma herramienta para determinar una serie de curvas características habituales en el estudio de este tipo de máquinas (curvas de velocidad frente a la variación de carga para todos los tipos de excitaciones).

Para demostrar algunas de las funcionalidades de la herramienta se han presentado, a modo de ejemplo, diversas aplicaciones WEB de la propia herramienta para el análisis, control y visualización de fenómenos eléctricos (transitorios eléctricos).

En una segunda fase se han presentado algunas de las aplicaciones industriales relacionadas con el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral. Se han escogido estas aplicaciones porque ilustran de manera clara la capacidad de implementación de la herramienta en el entorno industrial.

La primera aplicación industrial que se ha presentado ha sido la validación de simuladores externos (ECOSIMPRO) con los ficheros generados de manera sistemática con la herramienta desarrollada.

A continuación se ha presentado una aplicación industrial de Telegestión de Minicentrales Hidráulicas mediante el uso de diferentes elementos que constituyen el sistema de gestión y control desarrollado la herramienta: Software de gestión y control, Comunicaciones GSM, almacenamiento sistemático de datos.

Se ha presentado, finalmente, una aplicación industrial de Gestión de alarmas en planta de Cogeneración mediante el uso de diferentes elementos que constituyen el sistema de gestión y control desarrollado: Comunicaciones con Scada externo.



Dadas las características de la herramienta desarrollada, las aplicaciones presentadas son una pequeña muestra de las capacidades del sistema. La elección de las mismas ha sido debido a la disponibilidad de equipos y máquinas eléctricas por el autor de esta tesis en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Valladolid.



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas de futuro



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*

## Capítulo 5.- Conclusiones y líneas de futuro

### 5.1.- Conclusiones Generales

La herramienta desarrollada puede ser implementada en diferentes máquinas eléctricas (multimáquina) y permite analizar diferentes fenómenos eléctricos.

Se ha creado un sistema abierto y configurable que permite la utilización de distintos dispositivos de adquisición y control.

La herramienta incorpora elementos de simulación y adquisición, permitiendo la monitorización de las variables fundamentales.

La herramienta es capaz de determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento de las máquinas eléctricas, a partir de un determinado modelo que es validado por el propio sistema.

Hasta donde alcanza el conocimiento del autor, no se ha desarrollado una herramienta de estas características que permita el análisis y estudio de diferentes máquinas con una sola plataforma, el control vía WEB, el almacenamiento en la nube, la generación de simuladores, la incorporación de los diferentes niveles de comunicaciones, etc. y todas las características que el sistema de gestión y control desarrollado incorporan.

### 5.2.- Conclusiones Particulares

En la aplicación de la herramienta desarrollada a los transformadores eléctricos se ha comprobado la validez de los modelos habituales elegidos para caracterizar su funcionamiento obteniéndose diferencias entre el funcionamiento real y el simulado no superiores al 2%.

La aplicación de la herramienta a los transformadores eléctricos ha permitido trabajar con diferentes modelos y establecer la relación entre ellos.

La creación de simuladores de máquinas eléctricas validados por los propios datos adquiridos en el funcionamiento normal de las máquinas permite conocer el comportamiento de la máquina constituyendo nuevas herramientas de aprendizaje.



En las diferentes aplicaciones de la herramienta se han demostrado las siguientes tendencias extraídas del análisis del estado de la técnica:

- La herramienta incorpora características de simulación.
- Herramienta abierta para la introducción de nuevos modelos, y que permite la comunicación con otros software de simulación.
- Permite implementar la simulación en tiempo real.
- Incorpora diferentes niveles de comunicaciones.
- Permite la monitorización de variables eléctricas.
- Constituye una nueva herramienta de aprendizaje online.

Aparte de las tendencias marcadas por el estado de la técnica, en la aplicación de la herramienta desarrollada se ha demostrado que incorpora las siguientes características:

- Multimáquina, que permite ser implementado en transformadores eléctricos, máquinas eléctricas de inducción, máquinas eléctricas síncronas y máquinas de corriente continua.
- Multidispositivo, que posibilita la utilización de diferentes dispositivos físicos de adquisición y control.
- Realiza un tratamiento sistemáticos de los datos con lo que se obtiene una base de información de la máquina objeto de análisis.
- Capaz de crear y validar simuladores, a partir de ficheros de los datos adquiridos.
- Abierto y configurable para adaptar el sistema al estudio de nuevos fenómenos eléctricos.

### 5.3.- Líneas Futuras

Las líneas de futuro que se destacan como continuación de esta Tesis serían las siguientes:

- Estudio e implementación de simulación en Tiempo Real.
- Interconexión del sistema desarrollado con otras herramientas de simulación.
- Aplicación del sistema desarrollado para la monitorización de una determinada máquina eléctrica con el fin de realizar una detección temprana de fallas y elaboración de sistema de mantenimiento predictivo.
- Aplicación del sistema desarrollado para la monitorización de la red de energía eléctrica.
- Aplicación del sistema desarrollado para la monitorización de un determinado fenómeno eléctrico.

## 5.4.- Publicación de Resultados

En torno a esta tesis se han generado las siguientes publicaciones científicas:

- M. San Martín, E. P. Parra, M. Blanco, A. Sánchez, J. A. Serrano, M. I. Jiménez, M. García, «ICT platform for support AC circuits study. Plataforma TIC de apoyo al estudio de circuitos eléctricos de corriente alterna» *Modelling in Science Education and Learning*, vol. 7, pp. 123-130, 2014.
- A. Sánchez, M. García, M. Blanco, M. Herraéz, M. San Martín «Hydraulic Industrial Filter Product-Process development Applying Knowledge Based Engineering» *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference*, Zaragoza, June 2013.
- M San Martín, E. Parra, M. I. Jiménez, M. Blanco, A. Sánchez, J. A. Serrano, M. García, «ICT tools for the study of alternating current machines» *8th International Technology, Education and Development Conference*, pp. 3687-3694, 2014.
- M San Martín, E. Parra, M. I. Jiménez, M. Blanco, A. Sánchez, J. A. Serrano, M. García, «Herramientas TIC de apoyo al estudio de Circuitos de Corriente Alterna» *XXI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*, Ponencia, 2013.
- M San Martín, E. Parra, M. I. Jiménez, M. Blanco, A. Sánchez, J. A. Serrano, M. García, «Plataforma educativa Online para Ingeniería» *XXI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*, Ponencia, 2013.
- M. I. Jiménez, M. Blanco, A. Sánchez, M San Martín, E. Parra, J. A. Serrano, «Methodology for projects subject in Engineering based on real cases» *8th International Technology, Education and Development Conference*, pp. 2866-2873, 2014.



- J. I. Lobo Salgado, M. San Martín Ojeda y J. A. Serrano Sanz, «Monitorización de medidas eléctricas en prácticas de laboratorio y su reproducción por el profesor en el aula y por el alumno vía Internet» Redinet - Red de Información Educativa, Valladolid, 2004.
- E. Parra, M San Martín, J. A. Serrano, M. Blanco, R. Prádanos, A. Zorita, «Essay's monitoring, an improvement in engineers learnign» *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW METHODS AND CURRICULA IN ENGINEERING EDUCATION IN A NEW EUROPE*, Ponencia, 2004.
- E. Parra, M San Martín, J. A. Serrano, M. Blanco, R. Prádanos, «Electrical Machinery Laboratory, a new teaching experience» *International Seminar organized by SEFI (Société Européenne pour la Formation des Ingénieurs): "New Teaching and learning methods: how efficient are they?"*, Ponencia, 2003.

Como consecuencia del trabajo desarrollado en esta tesis y con objeto de su publicación, se están elaborando (en proceso de redacción) los siguientes artículos:

- «Open and flexible pattform for monitoring different electrical machine»
- «Virtual and remote laboratory for learning AC circuits»
- «Equivalence between models of electrical transformers»
- «Virtual and remote laboratory for learning electric trasient»

*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



**Universidad de Valladolid**

---





# Anexo: Otras aplicaciones prácticas



## **Anexo.- Otras aplicaciones prácticas**

### **A.1- Aplicación del sistema a transformadores monofásicos**

#### **A.1.1.- Transformador monofásico ensayado**

Se presenta, a continuación la figura 252 con el transformador ensayado, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 1,5 KVA
- Tensión nominal primario: 220 V.
- Tensión nominal secundario: 192 V.



**Figura 252.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)**

Una vez conectado el transformador monofásico al sistema de gestión y control se procederá a la realización de una serie de ensayos que se detallan a continuación. La propia plataforma va a permitir la conexión y desconexión de los diferentes ensayos sin necesidad de intervención en los montajes de los esquemas, mediante los controles habilitados en la misma (véase señalados en la figura 253).

La representación de los distintos montajes se hará a partir de los datos almacenados por el sistema de gestión y control.

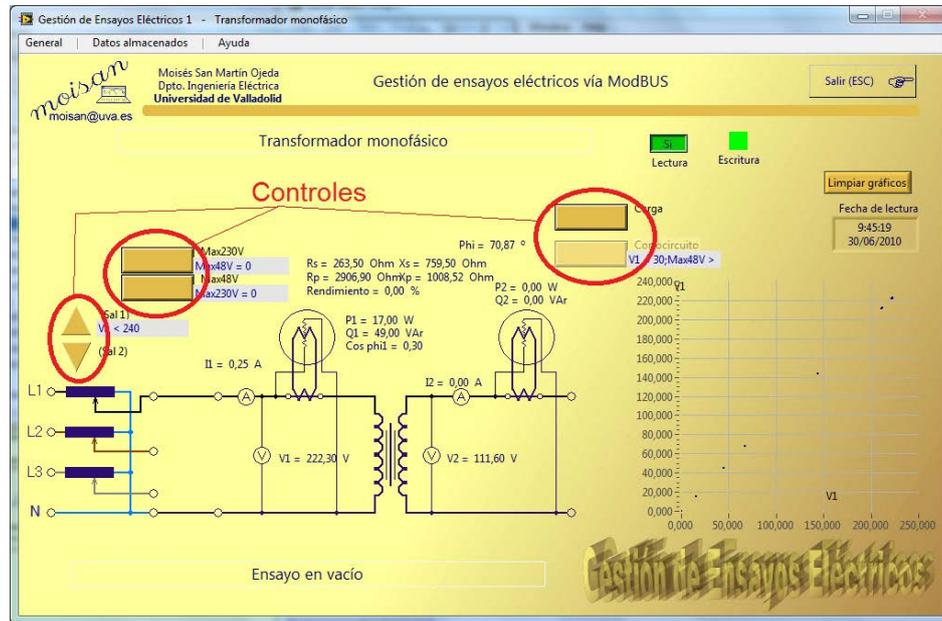


Figura 253.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)

### A.1.2.- Ensayos y determinación del modelo

#### Ensayo en vacío del transformador monofásico

Este ensayo consiste en dejar abierto el secundario del transformador (sin conectar carga alguna). Se determinará la relación de transformación así como los parámetros del circuito equivalente de la rama paralelo ( $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ ). La figura 254 representa el ensayo de vacío (un solo punto de funcionamiento):

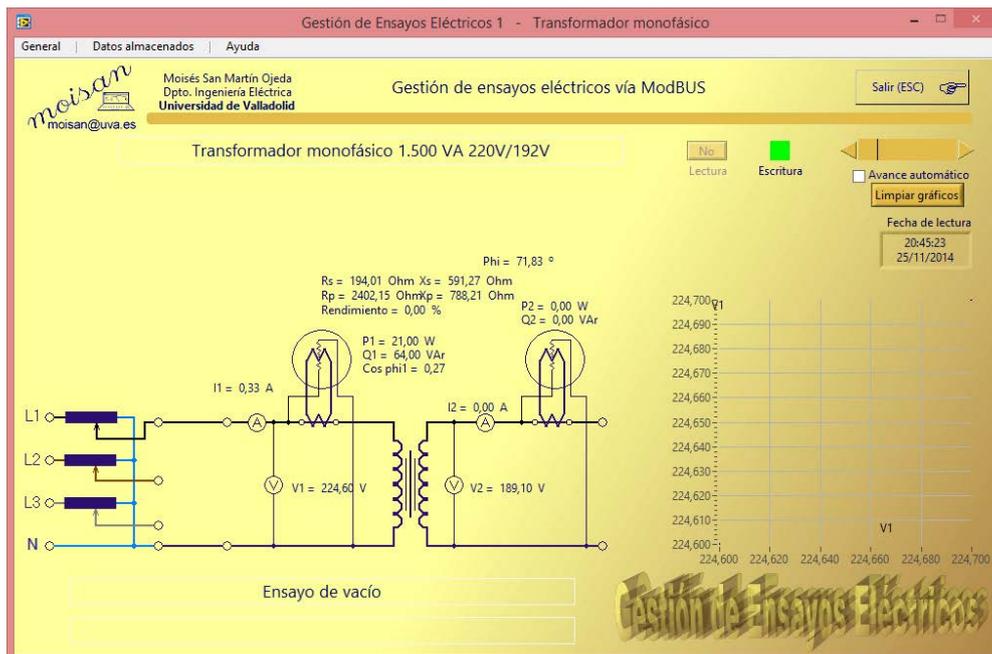


Figura 254.- Ensayo en vacío del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

El propio sistema de gestión y control permite la realización de diferentes cálculos permitiendo obtener diferentes variables que denominamos virtuales. Para este ensayo, el propio sistema determina los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama paralelo (véase la figura 255).

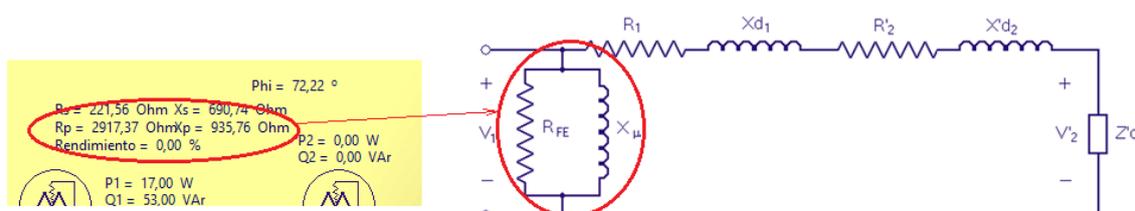


Figura 255.- Cálculo de los parámetros de la rama paralelo (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en vacío, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de tensión aplicada.

Se representa en la tabla 26 los valores obtenidos del ensayo en vacío. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ .

#	V1	I1	P1	Q1	cos phi1	V2	I2	P2	Q2	Fecha	Hora	Rfe	Xn
1	224,7	0,327	21	64	0,28	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:44:52	2404,29	788,91
2	224,7	0,326	21	63	0,28	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:44:53	2404,29	801,43
3	224,6	0,325	21	63	0,28	189	0	0	0	25/11/2014	20:44:55	2402,15	800,72
4	224,7	0,327	21	64	0,28	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:44:56	2404,29	788,91
5	224,8	0,328	21	64	0,28	189,2	0	0	0	25/11/2014	20:44:57	2406,43	789,61
6	224,7	0,328	21	64	0,28	189,2	0	0	0	25/11/2014	20:44:58	2404,29	788,91
7	224,7	0,328	21	64	0,27	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:44:59	2404,29	788,91
8	224,7	0,328	21	64	0,27	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:45:00	2404,29	788,91
9	224,8	0,329	21	64	0,27	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:45:01	2406,43	789,61
10	224,7	0,328	21	64	0,28	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:45:02	2404,29	788,91
11	224,6	0,328	21	64	0,28	189	0	0	0	25/11/2014	20:45:03	2402,15	788,21
...													
...													
...													
160	224,5	0,331	21	65	0,27	189	0	0	0	25/11/2014	20:47:35	2400,01	775,39
161	224,5	0,331	21	65	0,27	189	0	0	0	25/11/2014	20:47:36	2400,01	775,39
162	224,5	0,331	21	65	0,27	189	0	0	0	25/11/2014	20:47:37	2400,01	775,39
163	224,7	0,332	21	65	0,27	189,1	0	0	0	25/11/2014	20:47:38	2404,29	776,77

Tabla 26.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador

Con estos puntos es posible calcular el valor medio de la resistencia de pérdidas en el hierro de  $R_{FE} = 2402,02 \Omega$  y el valor medio de la reactancia magnetizante característica del flujo útil de  $X_{\mu} = 784,08 \Omega$ .

### Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico

Este ensayo consiste en cortocircuitar el secundario del transformador aplicando una tensión inferior en el primario de tal manera que circule por sus devanados la corriente nominal. Se determinará la tensión de cortocircuito, así como los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie. La figura 256 representa el ensayo de cortocircuito (un solo punto de funcionamiento):

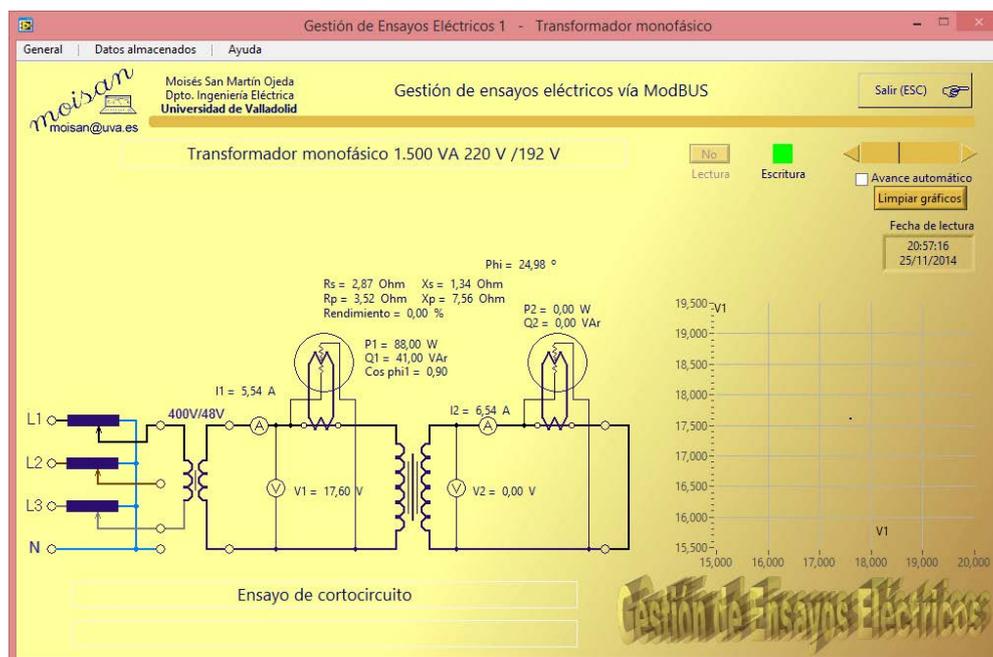


Figura 256.- Ensayo en cortocircuito del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

El propio sistema de gestión y control permite la realización de diferentes cálculos permitiendo obtener diferentes variables que denominamos virtuales. Para este ensayo, el propio sistema determina los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie (véase la figura 257).

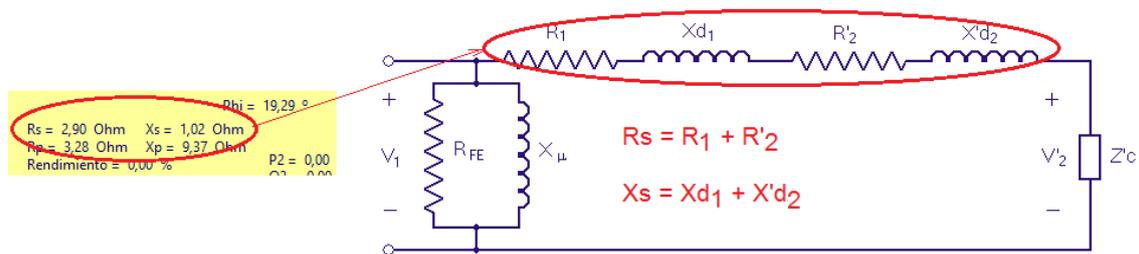


Figura 257.- Cálculo de los parámetros de la rama serie (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en cortocircuito, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de corriente establecida en los devanados.

Se representa en la tabla 27 los valores obtenidos en el ensayo de cortocircuito. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Para ello se deberá tener en cuenta que las potencias activa absorbida corresponde a tres veces las consumidas por las resistencias ( $R_{cc} = R_1 + R'_2$ ) y la potencia reactiva absorbida a las reactancias ( $X_{cc} = X_{d1} + X'd_2$ ).

#	V1	I1	P1	Q1	cos phi1	V2	I2	P2	Q2	Fecha	Hora	Rcc	Xcc
1	17,6	5,582	89	42	0,9	0	6,59	0	0	25/11/2014	20:55:53	2,856	1,348
2	17,6	5,575	89	42	0,9	0	6,597	0	0	25/11/2014	20:55:54	2,864	1,351
3	17,6	5,573	89	41	0,9	0	6,591	0	0	25/11/2014	20:55:55	2,866	1,320
4	17,6	5,574	89	42	0,9	0	6,587	0	0	25/11/2014	20:55:56	2,865	1,352
5	17,6	5,57	89	41	0,9	0	6,587	0	0	25/11/2014	20:55:57	2,869	1,322
6	17,6	5,572	89	41	0,9	0	6,587	0	0	25/11/2014	20:55:58	2,867	1,321
7	17,6	5,569	88	41	0,9	0	6,585	0	0	25/11/2014	20:55:59	2,837	1,322
8	17,6	5,571	88	41	0,9	0	6,584	0	0	25/11/2014	20:56:00	2,835	1,321
9	17,6	5,572	89	41	0,9	0	6,583	0	0	25/11/2014	20:56:01	2,867	1,321
10	17,6	5,57	89	42	0,9	0	6,584	0	0	25/11/2014	20:56:02	2,869	1,354
11	17,6	5,569	89	41	0,9	0	6,585	0	0	25/11/2014	20:56:03	2,870	1,322
12	17,6	5,57	89	41	0,9	0	6,58	0	0	25/11/2014	20:56:04	2,869	1,322
13	17,6	5,578	89	42	0,9	0	6,582	0	0	25/11/2014	20:56:05	2,860	1,350
...													
...													
...													
209	17,6	5,45	87	40	0,9	0	6,423	0	0	25/11/2014	20:59:30	2,929	1,347
210	17,6	5,445	87	40	0,9	0	6,436	0	0	25/11/2014	20:59:31	2,934	1,349
211	17,6	5,447	87	40	0,9	0	6,432	0	0	25/11/2014	20:59:32	2,932	1,348

Tabla 27.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito

Con estos puntos es posible calcular el valor medio de  $R_{cc} = 2,882 \Omega$  y  $X_{cc} = 1,339 \Omega$ .

Para el análisis se puede dividir la resistencia  $R_{cc}$  a la mitad obteniendo unos valores de  $R_1 = R'_2 = 1,441 \Omega$ .

Las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'_{d2}$  correspondientes al modelo de dispersión de flujo en los devanados del estator y rotor respectivamente se divide  $X_{cc}$  a la mitad, dado que en el modelo de circuito equivalente con la reducción del rotor al estator se considera igual número de espiras en estator y rotor. Por lo tanto, se obtiene que  $X_{d1} = X'_{d2} = 0,6695 \Omega$ .

### Ensayo en carga del transformador monofásico

Este ensayo analiza en funcionamiento normal del transformador cuando se le conectan diversas cargas eléctricas en su secundario. La figura 258 representa el ensayo de carga (un solo punto de funcionamiento):

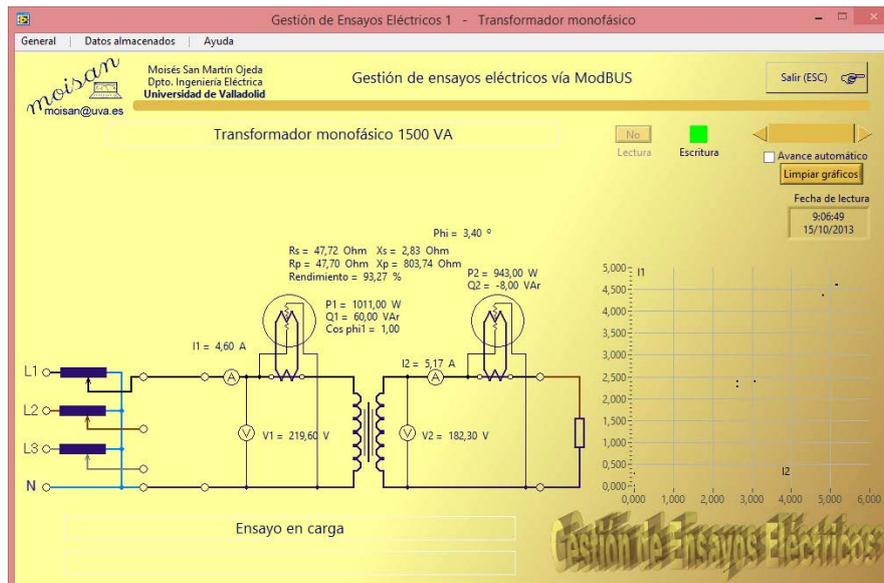


Figura 258.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en carga, el sistema nos permite la conexión de diversas cargas, como se puede ver en los datos de la gráfica en la figura anterior.

### A.1.3.- Validación del modelo

Los datos procedentes de los ensayos de vacío y cortocircuito permitieron calcular todos los parámetros del circuito equivalente, con lo que es posible analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga conectada (figura 259).

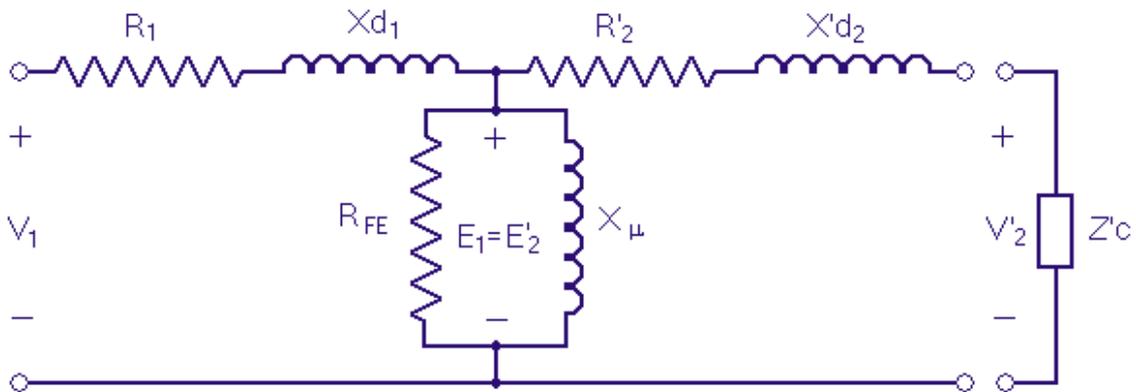


Figura 259.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Se realiza la validación del modelo comparando los datos medidos en el ensayo en carga con los datos mediante la resolución analítica del circuito. La resolución analítica del circuito se hará con la ayuda del simulador desarrollado al efecto, en el que se introducirán los datos del modelo (circuito equivalente) y, en cada caso, los datos de la carga correspondiente.

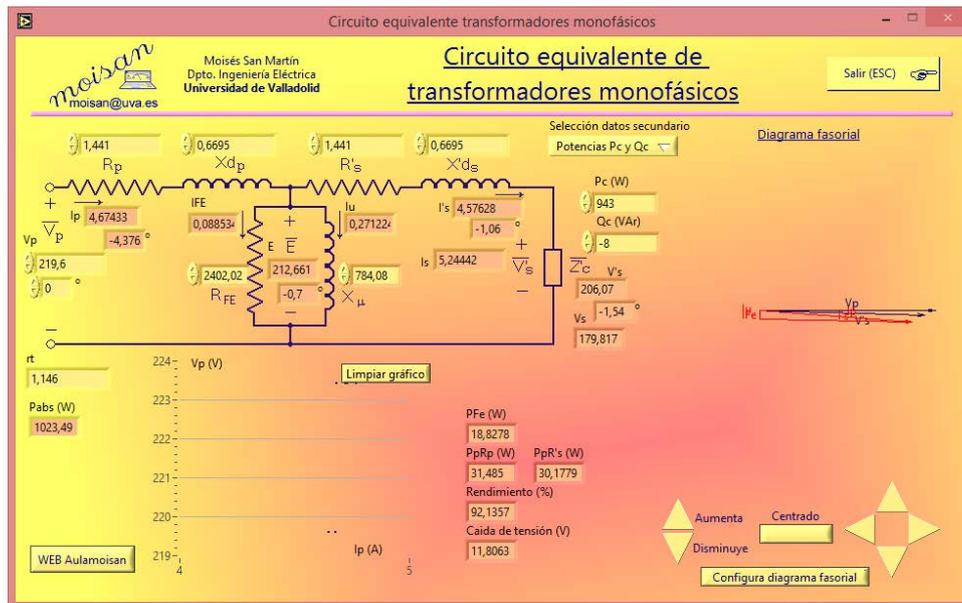


Figura 260.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)

Se acompaña la figura 261 correspondiente al ensayo en carga para que se puedan contrastar los resultados del simulador.

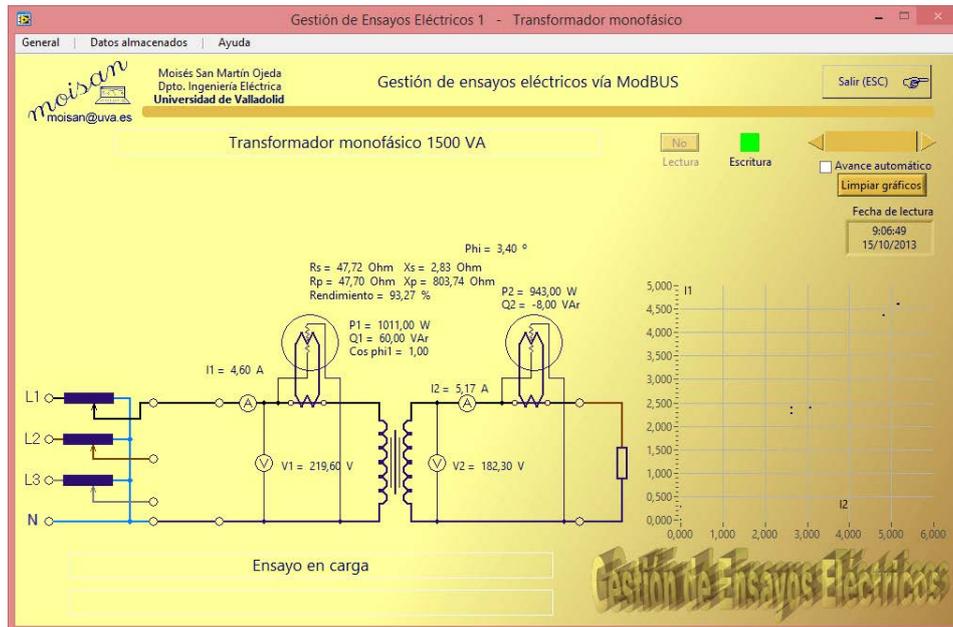


Figura 261.- Ensayo en carga del transformador monofásico (Fuente: Elaboración propia)

Se acompaña la tabla correspondiente al ensayo en carga de 943 W en el secundario para la que se detallan los valores calculados con el simulador, los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos -figura 261) y la variación entre unos y otros.

	<b>Ip (A)</b>	<b>Pp (W)</b>	<b>Vs (V)</b>	<b>Is (A)</b>
<b>Simulador</b>	4,674	1023,49	179,82	5,244
<b>Ensayo</b>	4,60	1011,00	182,30	5,17
<b>Variación (%)</b>	1,61%	1,24%	-1,36%	1,43%

Tabla 28.- Resultados del ensayo en carga de 1023,49 W

De los resultados obtenidos podemos validar el modelo y, por tanto, conocer el funcionamiento del transformador monofásico elegido para cualquier régimen de carga.

## A.2- Aplicación del sistema a transformadores trifásicos

### A.2.1.- Transformador trifásico ensayado

Se presenta, a continuación la figura 262 con el transformador ensayado, cuyos datos nominales son los siguientes:

- Potencia nominal: 3 KVA
- Tensión nominal de línea en primario: 220 V.
- Tensión nominal de línea en secundario: 410 V.
- Conexión Triángulo/Estrella



Figura 262.- Transformador ensayado (Fuente: Elaboración propia)

Una vez conectado el transformador trifásico al sistema de gestión y control se procederá a la realización de una serie de ensayos que se detallan a continuación. La propia plataforma va a permitir la conexión y desconexión de los diferentes ensayos sin necesidad de intervención en los montajes de los esquemas, mediante los controles habilitados en la misma (véase señalados en la figura 263).

La representación de los distintos montajes se hará a partir de los datos almacenados por el sistema de gestión y control.

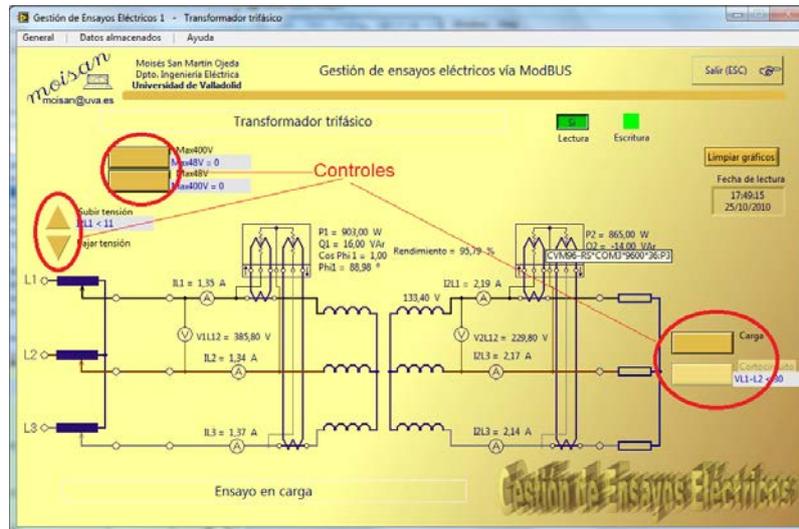


Figura 263.- Detalle controles señalados (Fuente: Elaboración propia)

## A.2.2.- Ensayos y determinación del modelo

### Ensayo en vacío del transformador trifásico

Este ensayo consiste en dejar abierto el secundario del transformador (sin conectar carga alguna). Se determinará la relación de transformación así como los parámetros del circuito equivalente de la rama paralelo. La figura 264 representa el ensayo de vacío (un solo punto de funcionamiento):

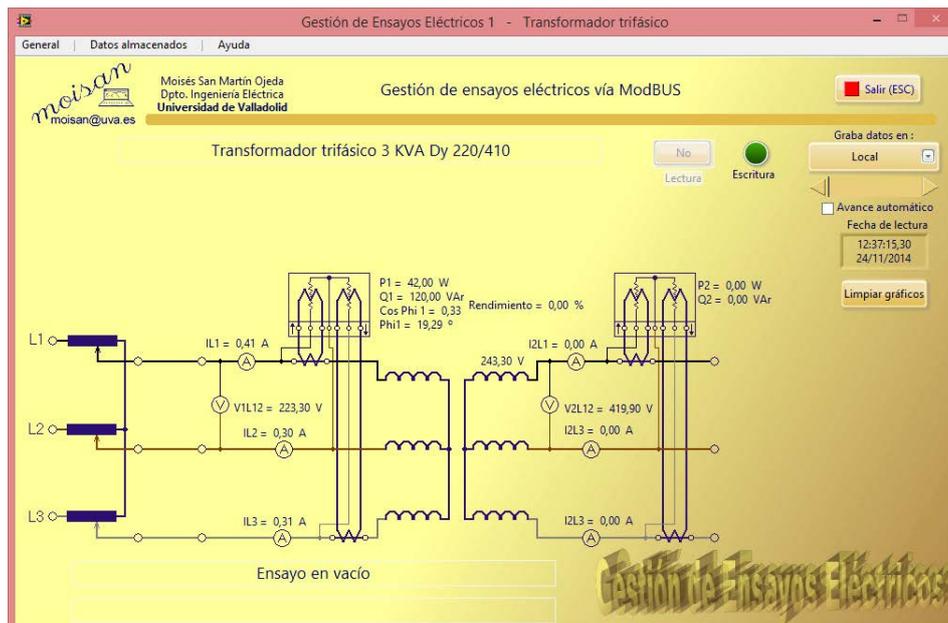


Figura 264.- Ensayo en vacío del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en vacío, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de tensión aplicada.

Se representa en la tabla 29 los valores obtenidos del ensayo en vacío para la tensión nominal de 220 V. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{FE}$  y  $X_{\mu}$ .

#	VL1-L2	IL1	IL2	IL3	P1	Q1	Cos Phi1	V2L1-L2	P2	Q2	V2L1	Hora	Rfe	Xn
1	220,7	0,35	0,252	0,253	41	98	0,38	413,1	0	0	240,5	18:03:24	1188,01	497,03
2	220,7	0,35	0,253	0,254	41	98	0,38	413	0	0	240,5	18:03:25	1188,01	497,03
3	220,7	0,351	0,254	0,255	41	98	0,38	412,9	0	0	240,5	18:03:26	1188,01	497,03
4	220,7	0,351	0,255	0,255	41	98	0,38	413,1	0	0	240,7	18:03:27	1188,01	497,03
5	220,7	0,351	0,255	0,255	41	98	0,38	412,8	0	0	240,6	18:03:28	1188,01	497,03
6	220,8	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	413	0	0	240,6	18:03:29	1189,09	492,45
7	220,7	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	413	0	0	240,6	18:03:30	1188,01	492,00
8	220,8	0,353	0,257	0,256	41	99	0,38	413,2	0	0	240,7	18:03:31	1189,09	492,45
9	220,7	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	413,1	0	0	240,6	18:03:32	1188,01	492,00
10	220,8	0,353	0,256	0,256	41	99	0,38	413,2	0	0	240,6	18:03:33	1189,09	492,45
11	220,7	0,353	0,257	0,256	41	100	0,37	413,2	0	0	240,6	18:03:34	1188,01	487,08
12	220,5	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	412,8	0	0	240,5	18:03:35	1185,86	491,11
13	220,4	0,351	0,256	0,255	41	98	0,38	412,5	0	0	240,4	18:03:36	1184,78	495,68
14	220,5	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	412,5	0	0	240,4	18:03:37	1185,86	491,11
15	220,5	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,8	0	0	240,5	18:03:38	1185,86	491,11
16	220,5	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	412,6	0	0	240,3	18:03:39	1185,86	491,11
17	220,5	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,8	0	0	240,4	18:03:40	1185,86	491,11
18	220,4	0,351	0,256	0,255	41	99	0,38	412,5	0	0	240,3	18:03:41	1184,78	490,67
19	220,5	0,352	0,256	0,256	41	99	0,38	412,4	0	0	240,3	18:03:42	1185,86	491,11
20	220,5	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,5	0	0	240,4	18:03:43	1185,86	491,11
21	220,4	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,7	0	0	240,4	18:03:44	1184,78	490,67
22	220,5	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,5	0	0	240,4	18:03:45	1185,86	491,11
23	220,5	0,352	0,257	0,256	41	99	0,38	412,7	0	0	240,4	18:03:46	1185,86	491,11
...														
...														
...														
531	220,1	0,35	0,256	0,255	41	97	0,39	411,8	0	0	239,7	18:12:17	1181,56	499,42
532	220	0,349	0,255	0,255	41	97	0,39	411,7	0	0	239,6	18:12:18	1180,49	498,97
533	220	0,349	0,255	0,255	41	97	0,39	411,7	0	0	239,6	18:12:19	1180,49	498,97
534	220	0,349	0,255	0,255	41	97	0,39	411,7	0	0	239,5	18:12:20	1180,49	498,97

Tabla 29.- Valores obtenidos del ensayo en vacío del transformador

Con estos puntos es posible calcular el valor medio de la resistencia de pérdidas en el hierro  $R_{FE} = 1183,26 \Omega$  y el valor medio de la reactancia magnetizante característica del flujo útil  $X_{\mu} = 494,00 \Omega$ .

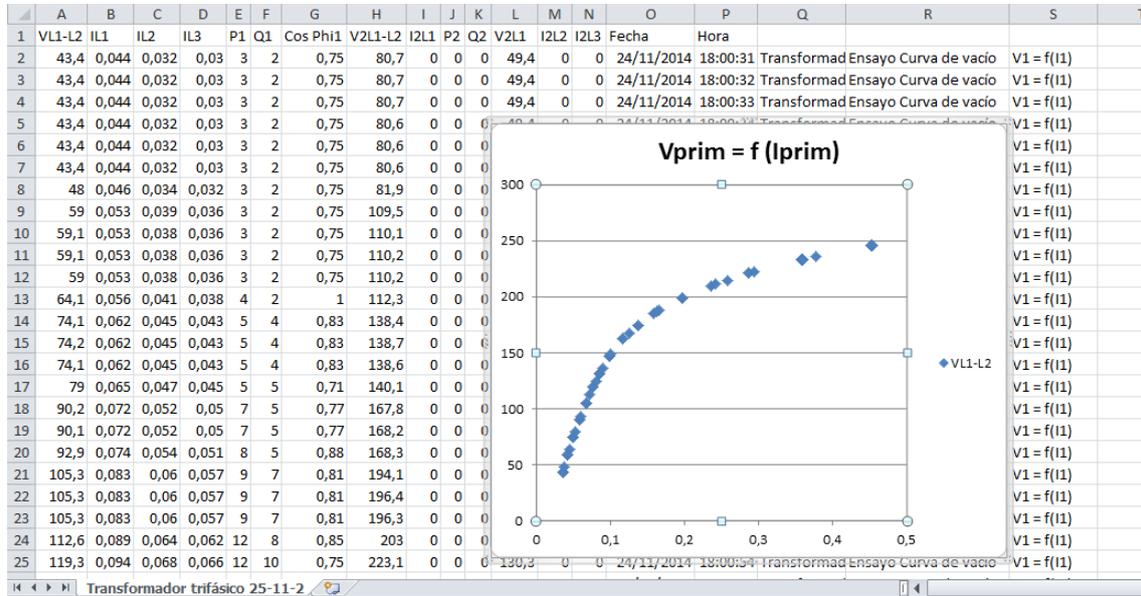


Figura 265.- Curva de vacío del transformador (Fuente: Elaboración propia)

Se ha realizado también un ensayo para la determinación de la curva de vacío que representa la tensión en el primario frente a la corriente en el primario, estando el secundario en vacío (véase la figura 265).

Obsérvese que esta curva tiene una zona lineal, el codo de saturación y la zona de saturación. De aquí se puede observar que los valores para la rama paralelo del circuito equivalente (resistencia  $R_{FE}$  y de la reactancia  $X_{\mu}$ ) varían según el punto de funcionamiento. Es por esto que, en nuestro caso, se han determinado estos valores para su funcionamiento en la tensión nominal de 220 V, que será la zona normal de trabajo de esta máquina.

### Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico

Este ensayo consiste en cortocircuitar el secundario del transformador aplicando una tensión inferior en el primario de tal manera que circule por sus devanados la corriente nominal. Se determinará la tensión de cortocircuito, así como los parámetros del circuito equivalente correspondientes a la rama serie. La figura 266 representa el ensayo de cortocircuito (un solo punto de funcionamiento):

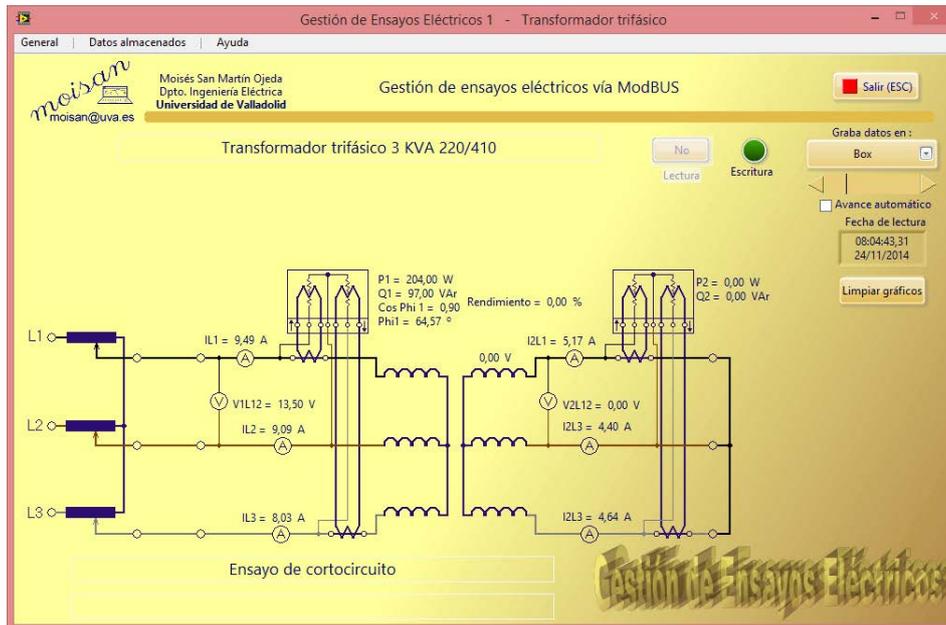


Figura 266.- Ensayo en cortocircuito del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en cortocircuito, al disponer la planta objeto de ensayo de una fuente variable de tensión, ha permitido al sistema de gestión y control desarrollado en esta Tesis realización de este ensayo para múltiples valores de corriente establecida en los devanados.

Con los datos medidos de las variables se pueden calcular los parámetros de la rama serie del circuito equivalente sabiendo que la potencia activa medida en el primario corresponde a tres veces la consumida por las resistencias  $R_1$  y  $R'_2$  en el circuito equivalente y la potencia reactiva medida en el primario corresponde a tres veces la consumida por las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'd_2$  en el circuito equivalente.

Se representa en la tabla 30 los valores obtenidos en el ensayo de cortocircuito. Se ha calculado en la misma hoja de cálculo Excel los valores de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Para ello se deberá tener en cuenta que las potencias activa absorbida corresponde a tres veces las consumidas por las resistencias ( $R_{cc} = R_1 + R'_2$ ) y la potencia reactiva absorbida a las reactancias ( $X_{cc} = X_{d1} + X'd_2$ ).

Con estos puntos es posible calcular el valor medio de  $R_{cc} = 0,8693 \Omega$  y de  $X_{cc} = 0,41113 \Omega$ .

Para el análisis se puede dividir la resistencia  $R_{cc}$  a la mitad obteniendo unos valores de  $R_1 = R'_2 = 0,434653 \Omega$ .

Las reactancias  $X_{d1}$  y  $X'd_2$  correspondientes al modelo de dispersión de flujo en los devanados del estator y rotor respectivamente se divide  $X_{cc}$  a la mitad, dado que



en el modelo de circuito equivalente con la reducción del rotor al estator se considera igual número de espiras en estator y rotor. Por lo tanto, se obtiene que  $X_{d1} = X'_{d2} = 0,2056 \Omega$ .

#	VL1-L2	IL1	IL2	IL3	P1	Q1	Cos Phi1	V2	I2L1	P2	Q2	I2L2	I2L3	Hora	Rcc	Xcc
1	13,5	9,517	9,11	8,048	204	98	0,9	0	5,178	0	0	4,41	4,641	20:03:33	0,860	0,413
2	13,5	9,51	9,107	8,036	203	98	0,9	0	5,179	0	0	4,408	4,65	20:03:34	0,857	0,414
3	13,5	9,513	9,106	8,038	204	98	0,9	0	5,187	0	0	4,401	4,646	20:03:35	0,861	0,414
4	13,5	9,513	9,104	8,043	204	98	0,9	0	5,187	0	0	4,403	4,647	20:03:36	0,861	0,414
5	13,5	9,514	9,108	8,042	204	98	0,9	0	5,185	0	0	4,405	4,644	20:03:37	0,861	0,414
6	13,4	9,517	9,103	8,029	204	97	0,9	0	5,184	0	0	4,401	4,645	20:03:40	0,862	0,410
7	13,5	9,518	9,106	8,038	204	97	0,9	0	5,19	0	0	4,393	4,647	20:03:41	0,861	0,409
8	13,5	9,521	9,107	8,036	204	98	0,9	0	5,19	0	0	4,398	4,647	20:03:42	0,861	0,414
9	13,5	9,512	9,099	8,029	204	98	0,9	0	5,178	0	0	4,407	4,642	20:03:43	0,862	0,414
10	13,5	9,511	9,103	8,028	204	98	0,9	0	5,178	0	0	4,4	4,639	20:03:44	0,862	0,414
11	13,4	9,51	9,098	8,027	204	97	0,9	0	5,181	0	0	4,401	4,644	20:03:45	0,863	0,410
12	13,5	9,513	9,105	8,031	204	98	0,9	0	5,185	0	0	4,394	4,647	20:03:46	0,862	0,414
13	13,5	9,506	9,103	8,031	203	97	0,9	0	5,186	0	0	4,396	4,645	20:03:47	0,858	0,410
14	13,4	9,504	9,093	8,024	203	97	0,9	0	5,177	0	0	4,404	4,638	20:03:48	0,859	0,411
15	13,4	9,506	9,091	8,025	203	97	0,9	0	5,173	0	0	4,399	4,636	20:03:49	0,859	0,411
16	13,5	9,513	9,1	8,035	204	97	0,9	0	5,181	0	0	4,399	4,641	20:03:50	0,862	0,410
17	13,5	9,508	9,099	8,031	203	97	0,9	0	5,182	0	0	4,399	4,65	20:03:51	0,858	0,410
18	13,5	9,506	9,098	8,034	203	97	0,9	0	5,185	0	0	4,395	4,644	20:03:52	0,858	0,410
19	13,5	9,509	9,097	8,038	204	98	0,9	0	5,181	0	0	4,401	4,641	20:03:53	0,862	0,414
20	13,5	9,509	9,101	8,035	204	98	0,9	0	5,176	0	0	4,404	4,641	20:03:54	0,862	0,414
21	13,5	9,508	9,105	8,038	204	98	0,9	0	5,177	0	0	4,407	4,641	20:03:55	0,862	0,414
22	13,5	9,505	9,096	8,025	204	97	0,9	0	5,177	0	0	4,402	4,646	20:03:56	0,863	0,410
23	13,4	9,504	9,093	8,015	202	97	0,9	0	5,184	0	0	4,394	4,643	20:03:57	0,856	0,411
...																
...																
...																
287	13,5	9,354	8,981	7,914	202	95	0,9	0	5,109	0	0	4,351	4,57	20:08:40	0,880	0,414
288	13,5	9,35	8,983	7,917	202	95	0,9	0	5,104	0	0	4,346	4,565	20:08:41	0,879	0,414
289	13,5	9,351	8,981	7,917	202	95	0,9	0	5,106	0	0	4,343	4,565	20:08:42	0,880	0,414
290	13,5	9,355	8,98	7,913	202	95	0,9	0	5,104	0	0	4,347	4,566	20:08:43	0,880	0,414
291	13,5	9,358	8,984	7,917	202	95	0,9	0	5,107	0	0	4,343	4,565	20:08:44	0,879	0,413
292	13,5	9,353	8,984	7,914	202	95	0,9	0	5,105	0	0	4,348	4,569	20:08:45	0,879	0,414

Tabla 30.- Valores obtenido del ensayo en cortocircuito

## Ensayo en carga del transformador trifásico

Este ensayo analiza en funcionamiento normal del transformador cuando se le conectan diversas cargas eléctricas en su secundario. La figura 267 representa el ensayo de carga (un solo punto de funcionamiento):

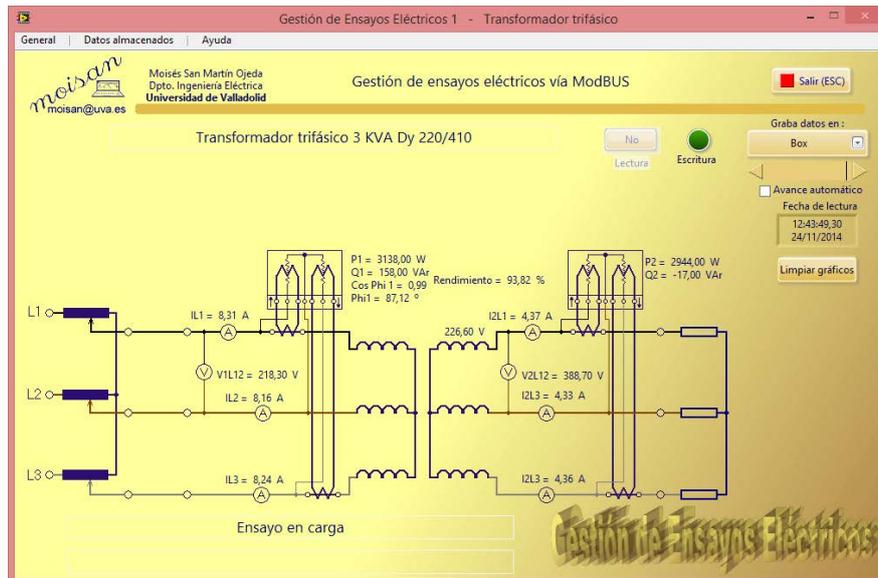


Figura 267.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Si bien se ha representado un solo punto de funcionamiento correspondiente al ensayo en carga, el sistema nos permite la conexión de diversas cargas, como se puede ver en los datos de la gráfica en la figura anterior.

### A.2.3.- Validación del modelo

Los datos procedentes de los ensayos de vacío y cortocircuito permitieron calcular todos los parámetros del circuito equivalente, con lo que es posible analizar el comportamiento del transformador para cualquier carga conectada (figura 268).

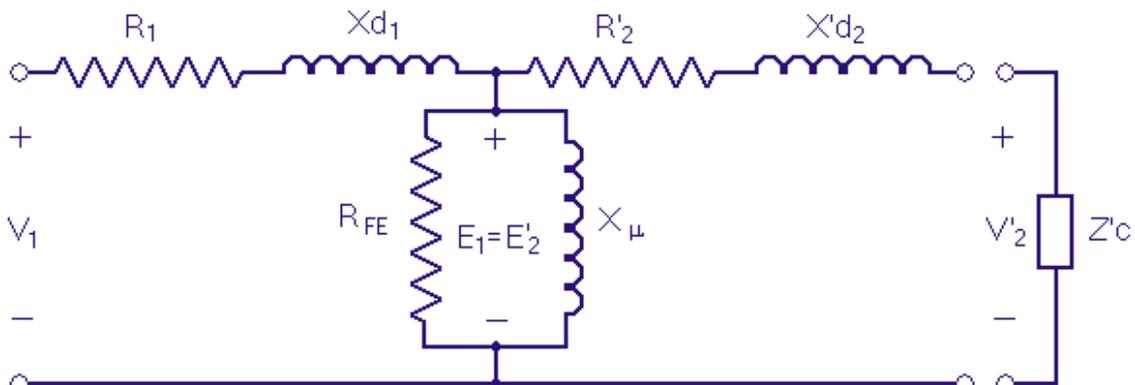


Figura 268.- Modelo de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia)

Se realiza la validación del modelo comparando los datos medidos en el ensayo en carga con los datos mediante la resolución analítica del circuito. La resolución analítica del circuito se hará con la ayuda del simulador desarrollado al efecto, en el que se introducirán los datos del modelo (circuito equivalente) y, en cada caso, los datos de la carga correspondiente (se han transferido los valores por fase).

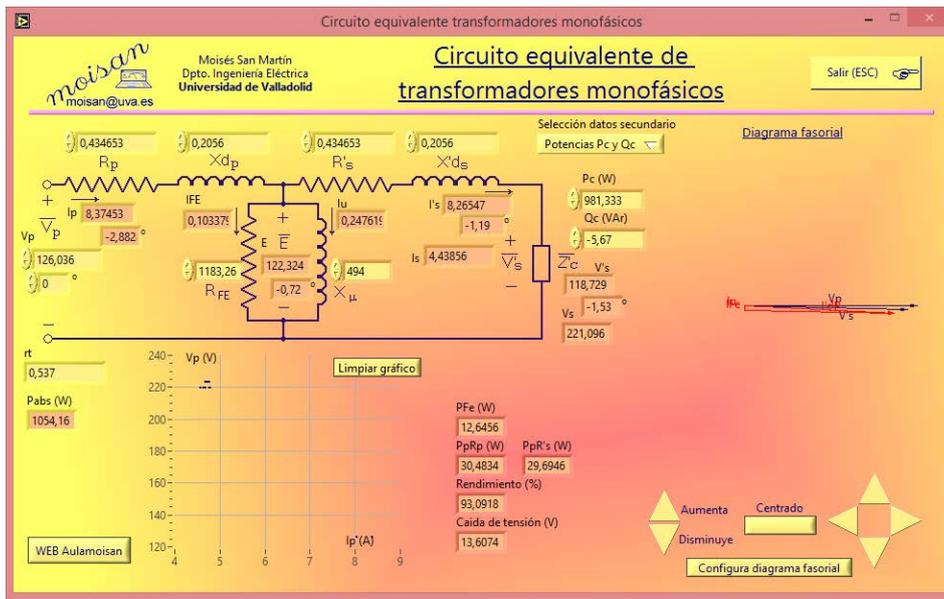


Figura 269.- Comprobación ensayo en carga con simulador (Fuente: Elaboración propia)

Se acompaña la figura 270 correspondiente al ensayo en carga para que se puedan contrastar los resultados del simulador (en el simulador se exponen los valores por fase).

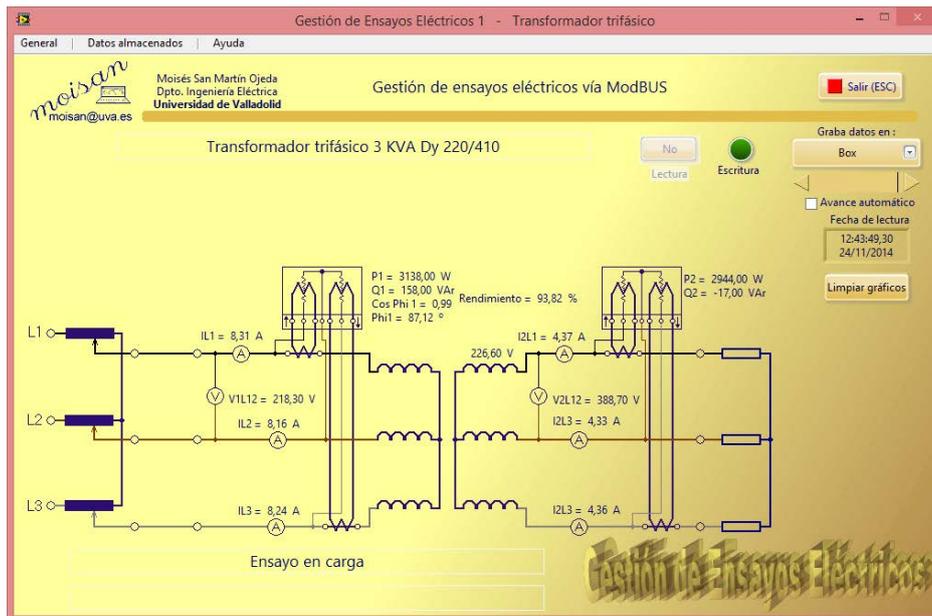


Figura 270.- Ensayo en carga del transformador trifásico (Fuente: Elaboración propia)

Se acompaña la tabla correspondiente al ensayo en carga de 2944 W (981,33 W por cada fase) en el secundario para la que se detallan los valores calculados con el simulador, los valores medidos en el ensayo (se realiza una media de entre todos los valores medidos) y la variación entre unos y otros.

	<b>Ip (A)</b>	<b>Pp (W)</b>	<b>Vs (V)</b>	<b>Is (A)</b>
<b>Simulador (p/fase)</b>	8,375	1054,16	221,10	4,439
<b>Ensayo (total)</b>	8,232	3135,33	388,60	4,355
<b>Ensayo (p/fase)</b>	8,232	1045,11	224,35	4,355
<b>Variación (%)</b>	1,74%	0,87%	-1,45%	1,93%

De los resultados obtenidos podemos validar el modelo y, por tanto, conocer el funcionamiento del transformador monofásico elegido para cualquier régimen de carga.



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



# Capítulo 6

## Referencias Bibliográficas



## Capítulo 6.- Referencias Bibliográficas

1. KESHARI, ANUPAM. *Advanced Techniques for Monitoring, Simulation and Optimization of Machining Processes*. Tesis doctoral. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II, 2011.
2. ONG, Chee-Mun. *Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/Simulink*. Prentice Hall, sept 1997, 1997. ISBN 978-0137237852.
3. ZHANG, Zhan; GAO, CaiXia; WANG, YuMei. Research on Calculation of Transformer's Parameters with Modern Information Technology. En *Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 148-153.
4. MENGHAL, P. M.; and LAXMI, A. J. Real time simulation: A novel approach in engineering education. *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on*. 2011, vol. 1, pp. 215-219.
5. MENGHAL, P. M.; and LAXMI, A. J. Real time simulation: Recent progress & challenges. *Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1 - 6.
6. BERTOLISSI, Edy. *An Application of an Ethernet Based Protocol for Communication and Control in Automated Manufacturing*. Tesis doctoral. Durham University, 1997.
7. SAN MARTÍN OJEDA, Moisés Luis, et al. *Herramientas TIC De Apoyo Al Estudio De Circuitos De Corriente Alterna*. Valencia ed. Ponencia. XXI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas., Julio 2013, 2013.
8. ARRIBAS, J. R., et al. Computer-Based Simulation and Scaled Laboratory Bench System for the Teaching and Training of Engineers on the Control of Doubly Fed Induction Wind Generators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2011, vol. 26, no. 3. pp. 1534-1543. ISSN 0885-8950.
9. RAMIREZ, Dionisio, et al. Educational Tool for the Implementation of Electric Drives Control System with Real Time Data Exchange. *International Journal of Engineering Education*, 2009, vol. 25, no. 1. pp. 24-32.



10. WAMKEUE, R.; and LALAMI, A. Development of interactive tutorial tool for simulation and identification of electrical machines and transformers. *e-Learning in Industrial Electronics (ICELIE), 2012 6th IEEE International Conference on.* 2012, pp. 40 - 46.
11. DE OLIVEIRA RODRIGUES, Antonio-Wendell. *A Methodology to Develop High Performance Applications on GPGPU Architectures : Application to Simulation of Electrical Machines.* Tesis doctoral. Université des Sciences et Technologie de Lille, 2012.
12. MOUSAVI TAKAMI, Kourosh. *Process Control and Simulation of Ferromagnetic Strip in the Power Transformers and Electrical Machines Applications : Electric Power Systems.* Tesis doctoral. Mälardalen University, Sweden, 2009.
13. BLAS DEL HOYO, Alfredo de. *Modelización De La Histéresis Magnética y Su Aplicación Al Cálculo Numérico En Máquinas Eléctricas.* Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2006. ISBN 84-690-2136-2.
14. LIU, Cheng-Tsung, et al. A module-based iron loss evaluation scheme for electric machinery products. En *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE.* IEEE, 2011. p. 1-6.
15. SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, José Á. *Simulación Del Funcionamiento De La Máquina De Inducción En Régimen Transitorio: Comparación De Modelos.* Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1995.
16. VODYAKHO, O., et al. An Induction Machine Emulator for High-Power Applications Utilizing Advanced Simulation Tools with Graphical User Interfaces. *Energy Conversion, IEEE Transactions on,* 2012, vol. 27, no. 1. pp. 160-172. ISSN 0885-8969.
17. FAIZ, J.; and SHAHGHOLIAN, G. Simulation of induction motor using small perturbation around operating point of motor *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on.* 2005, vol. 3, pp. 2395 - 2400.
18. FISER, R., et al. Induction motor parameters in case of rotor electrical asymmetry *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on.* 2013, pp. 271 - 278.
19. EITAN, S.; and RABINOVICI, R. On line simulation models of electric drives *Electrical Machines, 2008. ICM 2008. 18th International Conference on.* 2008, pp. 1-6.

20. CALVANO, F., et al. A novel technique based on integral formulation to treat the motion in the analysis of electric machinery. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, vol. 39, no 1, p. 637-643.
21. SUNI, J. C. P.; RUPPERT, E. and FAJONI, F. A guide for synchronous generator parameters determination using dynamic simulations based on IEEE standards *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*. 2010, pp. 1 - 6.
22. CHANG, G. W., et al. On Real-Time Simulation for Harmonic and Flicker Assessment of an Industrial System with Bulk Nonlinear Loads. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, vol. 57, no. 9. pp. 2998-3009. ISSN 0278-0046.
23. FUCHS, E. F.; and YOU, Y. Measurement of  $\lambda$ -i characteristics of asymmetric three-phase transformers and their applications *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*. 2000, vol. 1, pp. 91 - 96.
24. THEOCHARIS, A. D.; OLIVARES-GALVAN, J. C. and ZACHARIAS, T. Eddy-currents modelling in transformers magnetic cores using ohmic resistances *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*. 2012, pp. 549 - 554.
25. MOSES, P. S.; MASOUM, M. A. S. and TOLIYAT, H. A. Dynamic Modeling of Three-Phase Asymmetric Power Transformers with Magnetic Hysteresis: No-Load and Inrush Conditions. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2010, vol. 25, no. 4. pp. 1040-1047. ISSN 0885-8969.
26. LINDENMEYER, D., et al. An Induction Motor Parameter Estimation Method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 5, 2001, vol. 23, no. 4. pp. 251-262. ISSN 0142-0615.
27. ZUBIA, I., et al. In Situ Electrical Parameter Identification Method for Induction Wind Generators. *Electric Power Applications, IET*, 2011, vol. 5, no. 7. pp. 549-557. ISSN 1751-8660.
28. MORAES, R. M., et al. Parameter estimation of induction machines by using its steady-state model and transfer function. *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*. 2003, vol. 3, pp. 1965 - 1971.
29. RONG-CHING WU, et al. *Complete Parameter Estimation of Induction Machines by Time-Variied Parameters*. , 2011. ISBN pending.



30. TELFORD, D.; DUNNIGAN, M. W. and WILLIAMS, B. W. Online Identification of Induction Machine Electrical Parameters for Vector Control Loop Tuning. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2003, vol. 50, no. 2. pp. 253-261. ISSN 0278-0046.
31. WHEI-MIN LIN; TZU-JUNG SUAND and RONG-CHING WU. Parameter Identification of Induction Machine with a Starting no-Load Low-Voltage Test. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 59, no. 1. pp. 352-360. ISSN 0278-0046.
32. YEPES, A. G., et al. Parameter Identification of Multiphase Induction Machines with Distributed Windings—Part 1: Sinusoidal Excitation Methods. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 27, no. 4. pp. 1056-1066. ISSN 0885-8969.
33. HUYNH, D. C.; DUNNIGAN, M. W. and FINNEY, S. J. On-line parameter estimation of an induction machine using a recursive least-squares algorithm with multiple time-varying forgetting factors. *Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 444 - 449, 2010.
34. BLANQUEZ, F. R., et al. Validation study of the use of MATLAB/Simulink synchronous-machine block for accurate power-plant stability studies. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on*, pp. 122 - 126, 2014.
35. SANG-BIN LEE, et al. An Evaluation of Model-Based Stator Resistance Estimation for Induction Motor Stator Winding Temperature Monitoring. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2002, vol. 17, no. 1. pp. 7-15. ISSN 0885-8969.
36. ERGENE, L. T.; and SALON, S. J. Determining the Equivalent Circuit Parameters of Canned Solid-Rotor Induction Motors. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 41, no. 7. pp. 2281-2286. ISSN 0018-9464.
37. FAHIMI, B.; and PEKAREK, S. Design and control of electric machines utilizing a field reconstruction method. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010. pp. 1-2,.
38. STERMECKI, A., et al. Numerical Analysis of Steady-State Operation of Three-Phase Induction Machines by an Approximate Frequency Domain Technique. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 2011, vol. 128, no. 3. pp. 81-85. ISSN - 0932-383X.
39. LI, Liyi, et al. Direct and quadrature inductances measurement of the permanent magnetic linear synchronous machines. *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, no 5, p. 2282-2287.

40. MORENO EGUILAZ, Juan M. *Aportaciones a La Optimización De Energía En Accionamientos Eléctricos De Motores De Inducción Mediante Lógica Difusa*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004. ISBN 84-688-8949-0.
41. BARGALLÓ PERPIÑÁ, Ramón. *Aportación a La Determinación De Parámetros De Los Modelos En La Máquina Asíncrona Para Una Mejor Estimación y/o Observación De Variables no Medibles Para El Control De La Misma*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2001. ISBN 84-699-6945-5.
42. GHAFOURI, Reza; MOHAMMADI, Aliakbar and KEIVANI, Hamid. Power System Analysis and Controller Design using System Identification Techniques. *Trends in Applied Sciences Research*, 2012, vol. 7, no. 7. pp. 483-493 ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 18193579.
43. GHATE, V. N.; DUDUL, S. V. and DHOLE, G. M. Generalized model of three-phase induction motor for fault analysis. *Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering*, 2008. *SIBIRCON 2008. IEEE Region 8 International Conference on*, 2008, pp. 232 - 237.
44. PEDRA, J., et al. PSPICE Computer Model of a Nonlinear Three-Phase Three-Legged Transformer. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, no. 1. pp. 200-207. ISSN 0885-8977.
45. LI XIAOPING et al. The study of nonlinear characteristic curve for the core of transformer with magnetic coupling. *Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th International Zurich Symposium on*, 2006, pp. 235 - 238.
46. OJAGHI, Mansour, et al. Performance analysis of saturated induction motors by virtual tests. *Education, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 55, no 3, p. 370-377
47. MASOUM, M. A. S.; MOSES, P. S. and MASOUM, A. S. Derating of Asymmetric Three-Phase Transformers Serving Unbalanced Nonlinear Loads. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2008, vol. 23, no. 4. pp. 2033-2041. ISSN 0885-8977.
48. BAUER, P.; and VAN DUIJSEN, P. J. Challenges and Advances in Simulation. *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, 2005, pp. 1030-1036.
49. KAMPISIOS, Konstantinos T. *Electrical Machines Parameter Identification using Genetic Algorithms*. Tesis doctoral. University of Nottingham, 2010.



50. ZAIPING CHEN, et al. Neural network electrical machine faults diagnosis based on multi-population GA. *Neural Networks, 2008. IJCNN 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Joint Conference on*, 2008, pp. 3795 - 3799.
51. KANERVA, Sami. *Simulation of Electrical Machines, Circuits and Control Systems using Finite Element Method and System Simulator*. Tesis doctoral. Helsinki University of Technology, 2005.
52. KANERVA, Sami , Data transfer methodology between a FEM program and a system simulator. *Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on*, 2001, vol. 2, pp. 1121 - 1124.
53. DÒRIA-CEREZO, Arnau. *Modeling, Simulation and Control of Doubly-Fed Induction Machine Controlled by Back-to-Back Converter*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
54. PÉREZ-GUERRERO, Ignacio. *Estimación De Los Parámetros De La Máquina De Inducción Mediante Técnicas Metaheurísticas*. Tesis doctoral. Universidad de Jaén, 2013.
55. JASIM, O., et al. Investigation of induction machine phase open circuit faults using a simplified equivalent circuit model. *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 2008, pp. 1 - 6.
56. PERHO, Jarmo. *Reluctance Network for Analysing Induction Machines*. Tesis doctoral. Helsinki University of Technology, 2002.
57. STIFTER, M., et al. Co-simulation of components, controls and power systems based on open source software. *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, 2013, pp. 1 - 5.
58. MOSAYYEBI, S. R.; and JALILIAN, A. A Comparison Between Different Methods of Modeling Hysteresis Loop in Three-Phase Three-Legged Transformers. *Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International*, 2006, pp. 287 - 292.
59. ABOURIDA, S., et al. Real-time PC-based simulator of electric systems and drives. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, 2002, vol. 1, pp. 433 - 438.

60. DANA, P. -. G.; and ION, P. -. Proposal to use the method of ‘teaching through project’ as a pedagogical model to put the bases of an ‘educational modeling language’ in the activity of training the students/adults in field of designing the synchronous generator. *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1 - 9.
61. GUASCH, D. *Modelado y Análisis De Sistemas Fotovoltaicos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2003.
62. XIA CHEN and ZHONGCHAO WEI. A new modeling and simulation platform-Mworks for electrical machine based on modelica. *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 4065 - 4067.
63. DOMNISORU, C. Using MATHCAD in Teaching Power Engineering. *Education, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 48, no. 1. pp. 157-161. ISSN 0018-9359.
64. CASALS-TORRENS, P. Virtual Laboratory for Learning Asynchronous Motors in Engineering Degrees. *Tecnologías Del Aprendizaje, IEEE Revista Iberoamericana De*, 2013, vol. 8, no. 2. pp. 71-76. ISSN 1932-8540.
65. YAZIDI, A., et al. A Web-Based Remote Laboratory for Monitoring and Diagnosis of AC Electrical Machines. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2011, vol. 58, no. 10. pp. 4950-4959. ISSN 0278-0046.
66. ARTIOLI, M., et al. A general purpose software for signal processing oriented to the diagnosis of electrical machines. *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, 2004, vol. 2, pp. 809 - 814.
67. DUFOUR, C.; and BELANGER, J. A PC-based hardware-in-the-loop simulator for the integration testing of modern train and ship propulsion systems. *Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 444 - 449.
68. JAYALAKSHMI, K.; and RAMANARAYANAN, V. Real-time simulation of electrical machines on FPGA platform. *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*, 2006, pp. 259 - 263.
69. BAUER, P.; FEDAK, V. and ROMPELMAN, O. PEMCWebLab - Distance and virtual laboratories in electrical engineering: Development and trends. *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 2354 - 2359.



70. BLANQUEZ, F. R., et al. Real Time Power Plant Simulation Platform for Training on Electrical Protections and Automatic Voltage Regulators. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on, 2014*, pp. 122-126.
71. DA COSTA, J. P.; CAMARA, H. T. and CARATI, E. G. A microprocessor based prototype for electrical machines control using PWM modulation. *Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003 IEEE International Symposium on, 2003*, vol. 2, pp. 1083 - 1088,.
72. LOK-FU PAK, et al. Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. *Power Delivery, IEEE Transactions on, 2007*, vol. 22, no. 2. pp. 1218-1227. ISSN 0885-8977.
73. JALILI-MARANDI, V.; Lok-Fu Pak and DINA VAHI, V. Real-Time Simulation of Grid-Connected Wind Farms using Physical Aggregation. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2010*, vol. 57, no. 9. pp. 3010-3021. ISSN 0278-0046.
74. USENMEZ, S., et al. Real-time hardware-in-the-loop simulation of electrical machine systems using FPGAs. *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on, 2009*, pp. 1 - 6.
75. CAMARENA-MARTINEZ, David, et al. Empirical Mode Decomposition and Neural Networks on FPGA for Fault Diagnosis in Induction Motors. *The Scientific World Journal, 2014*. pp. n/a ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals.
76. CHOQUEUSE, V., et al. Diagnosis of Three-Phase Electrical Machines using Multidimensional Demodulation Techniques. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2012*, vol. 59, no. 4. pp. 2014-2023. ISSN 0278-0046.
77. RODRIGUEZ-DONATE, C., et al. FPGA based embedded system for induction motor failure monitoring at the start-up transient vibrations with wavelets. *Industrial Embedded Systems, 2008. SIES 2008. International Symposium on, 2008*, pp. 208 - 214.
78. ABOURIDA, S., et al. Hardware-In-the-Loop Simulation of Finite-Element Based Motor Drives with RT-LAB and JMAG. *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on, 2006*, pp. 2462 - 2466.
79. MCNEAL, R. and BELKHAYAT, M. Standard Tools for Hardware-in-the-Loop (HIL) Modeling and Simulation. *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE, 2007*, pp. 130 - 137.

80. BAUER, P.; and VAN DUIJSEN, PJ. Integrated Simulation of Embedded Controls in Power Electronics, PCIM 2002, Nurnberg. *Proceedings Intelligent Motion*, 2002, pp. 295 - 301.
81. MOHAMMED, O. A.; ABED, N. Y. and GANU, S. C. Real-Time Simulations of Electrical Machine Drives with Hardware-in-the-Loop. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, pp. 1-6.
82. LIU, Y.; STEURER, M. and RIBEIRO, P. A Novel Approach to Power Quality Assessment: Real Time Hardware-in-the-Loop Test Bed. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 20, no. 2. pp. 1200-1201. ISSN 0885-8977.
83. PAQUIN, J. et al. Real-Time and Off-Line Simulation of a Detailed Wind Farm Model Connected to a Multi-Bus Network. *Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada*, 2007, pp. 145 - 152.
84. Hui Li, et al. Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems Based on Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2006, vol. 53, no. 4. pp. 1144-1151. ISSN 0278-0046.
85. WEI LI; JOOS, G. and BELANGER, J. Real-Time Simulation of a Wind Turbine Generator Coupled with a Battery Supercapacitor Energy Storage System. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, vol. 57, no. 4. pp. 1137-1145. ISSN 0278-0046.
86. REN, W.; STEURER, M. and WOODRUFF, S. Progress and challenges in real time hardware-in-the loop simulations of integrated ship power systems. *Power Engineering Society General Meeting*, 2005, vol. 1, pp. 534 - 537.
87. LOK-FU PAK; and DINAVAHI, V. Real-Time Simulation of a Wind Energy System Based on the Doubly-Fed Induction Generator. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 24, no. 3. pp. 1301-1309. ISSN 0885-8950.
88. SEUNG TAE CHA, et al. Real-Time Hardware-In-The-Loop (HIL) Testing for Power Electronics Controllers. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2012, pp. 1 - 6.
89. DUFOUR, C.; and BELANGER, J. A PC-Based Real-Time Parallel Simulator of Electric Systems and Drives. *Parallel Computing in Electrical Engineering, 2004. PARELEC 2004. International Conference on*, 2004, pp. 105 - 113.



90. CHAMPAGNE, R., et al. Analysis and Validation of a Real-Time AC Drive Simulator. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, no. 2. pp. 336-345. ISSN 0885-8993.
91. ZHOU, YJ; and MEI, TX. FPGA based real time simulation for electrical machines. *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, 2005, vol. 16, nº 1, pp. 1770-1775.
92. LOK-FU PAK, et al. A Versatile Cluster-Based Real-Time Digital Simulator for Power Engineering Research. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2006, vol. 21, no. 2. pp. 455-465. ISSN 0885-8950.
93. ROMERO-TRONCOSO, R. J., et al. Reconfigurable instrument for power quality monitoring in 3-phase power systems. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 186 - 191.
94. MCARTHUR, S. D. J., et al. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 22, no. 4. pp. 1743-1752. ISSN 0885-8950.
95. MCARTHUR, S. D. J., et al. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-Agent Systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 22, no. 4. pp. 1753-1759. ISSN 0885-8950.
96. MARTINEZ, J. A., et al. Tools for Analysis and Design of Distributed Resources—Part IV: Future Trends. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2011, vol. 26, no. 3. pp. 1671-1680. ISSN 0885-8977.
97. CHASSIN, D. P.; SCHNEIDER, K. and GERKENSMEYER, C. GridLAB-D: An open-source power systems modeling and simulation environment. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, pp. 1 - 5.
98. TOUHAMI, O., et al. Remote monitoring system of electrical machines via INTERNET. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2013 9th IEEE International Symposium on*, 2013, pp. 23 - 27.
99. MUNTEANU, R., et al. Diagnosis of industrial systems driven by electrical machines with a low cost platform. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 535 - 541.

100. PRADYUMNA, P. R.; TARUN, C. K. S. and BHANOT, S. Remote experimentation of “No-load tests on a transformer” in electrical engineering. *Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA)*, 2012 IEEE International Conference on, pp. 1 - 6.
101. SENGODAN, Boopathi C., et al. WEB-ENABLED GENERALIZED ARCHITECTURAL MODEL FOR ONLINE POWER SYSTEM ANALYSIS. *American Journal of Applied Sciences*, 2013, vol. 10, no. 9. pp. 1093-1101 ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 15469239.
102. DECNER, A. Telemetry Diagnostic Capabilities for Asynchronous Motors. *Electrical Machines (ICEM)*, 2012 XXth International Conference on, pp. 1841-1845.
103. ARRUE RECONDO, Myriam. *Avances En Automatización De Actividades Relacionadas Con La Accesibilidad En El Proceso De Desarrollo De Interfaces Web*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco, 2008.
104. LOPEZ GIL, Juan M. *Una Metodología Para La Automatización De Experimentos Con Usuarios En Entornos Web*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco, 2007.
105. DROFENIK, U., et al. New web-based interactive e-learning in power electronics and electrical machines. *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, 2001, vol. 3, pp. 1858 - 1865.
106. MUHURY, L.; and HABIB, A. H. M. A. Device control by using GSM network. *Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2012 15th International Conference on, pp. 271 - 274.
107. PING-HUANG WU, et al. Design and Implementation of the PLC Control Lab Using GSM System. *Advanced Learning Technologies*, 2006. Sixth International Conference on, pp. 393 - 395.
108. FELIX, C.; and RAGLEND, I. J. Home automation using GSM. *Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN)*, 2011 International Conference on, pp. 15 - 19.
109. TIPSUWANPORN, V., et al. Software developments for modbus SCADA to extend distance to 2x for controlled devices. *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2013 13th International Conference on, pp. 605 - 609.
110. XIAO YANJUN, et al. Modbus communication used in the machine of spark plug. *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011 International Conference on, pp. 516 - 519.



111. LI DONGJIANG; and SUN RUIQI. Implement of communication between configuration software and OPC server based on Modbus/TC. *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2011 10th International Conference on, pp. 218 - 221.
112. LIQUN HOU; and BERGMANN, N. W. Induction Motor Condition Monitoring using Industrial Wireless Sensor Networks. *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 2010 Sixth International Conference on, pp. 49-54.
113. LI HUI; ZHANG HAO and PENG DAOGANG. Research and Application of Communication Gateway of EPA and MODBUS/TCP. *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 2013 5th International Conference on, pp. 166 - 170.
114. FU JINGQI, et al. The design and implementation of wireless sensor network monitoring and control system based on modbus/tcp. *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2013 25th Chinese, pp. 3319 - 3323.
115. QUING LIU; and YINGMEI LI. Modbus/TCP based Network Control System for Water Process in the Firepower Plant. *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, pp. 432 - 435.
116. MAI, Son; VU, Van T. and MYEONG-JAE YI. An OPC UA client development for monitoring and control applications. *Strategic Technology (IFOST)*, 2011 6th International Forum on, pp. 700 - 705.
117. YACHUAN YAO; YI YAO and HONG SONG. The Remote Monitoring System Based on the OPC Technology. *Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on*, pp. 1 - 3.
118. PEREZ, F., et al. Access to process data with OPC-DA using IEC61499 Service Interface Function Blocks. *Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*, pp. 1 - 4.
119. WANG JIE; and ZENG YU. Laboratory equipment management and failure prediction system based on Web Service. *Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 2012 IEEE 3rd International Conference on, pp. 469 - 471.
120. GIBSON, J. C. Developing a requirements specification for a Web service application. *Requirements Engineering Conference, 2004. Proceedings. 12th IEEE International*, pp. 340 - 344.
121. DRIDI, F.; and NEUMANN, G. How to implement Web-based groupware systems based on WebDAV. *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 1999. (WET ICE '99) Proceedings. IEEE 8th International Workshops on*, pp. 114 - 119.

122. HONG-CHANG LEE; BO-HYEON KIM and MYUNG-JOON LEE. *CoLib: CoLib: Client Library for Effective Development of WebDAV-based Collaborative Application. Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, 2011 Fifth International Conference on, pp. 361 - 365.
123. TOLVANEN, J., et al. Remote Storage for Mobile Devices. *Communication System Software and Middleware*, 2006. Comsware 2006. First International Conference on, pp. 1 - 9.
124. ASSUNÇÃO, R., et al. A new teaching tool for fault detection in the induction machine. *Industrial Electronics (ISIE)*, 2014 IEEE 23rd International Symposium on, pp. 2190 - 2195.
125. RAMOS GAETE, Felipe T. *Diseño e Implementación De Sistema De Monitoreo En Línea Para Máquina Síncrona*. Tesis doctoral. Universidad de Chile, 2009.
126. CARRILLO LEMA, Omar G.; and DÍAZ IZA, Henry P. *Diseño y Construcción De Un Sistema Para El Monitoreo De Condición De Generadores Síncronos y Motores Trifásicos De Inducción*. Tesis doctoral. QUITO/EPN/2011, 2011.
127. ZAIDI, S. S. H.; and STRANGAS, E. G. Non intrusive operational health identification of in-service electrical machine. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 5120 - 5125.
128. VEDREÑO SANTOS, Francisco J. *Diagnosis of Electric Induction Machines in Non-Stationary Regimes Working in Randomly Changing Conditions*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. 2013.
129. MARTINEZ REGO, David. *On-Line Learning and Anomaly Detection Methods: Applications to Fault Assessment*. Tesis doctoral. Universidade da Coruña, 2013.
130. ELDER, Stewart. *The Monitoring of Induction Motor Starting Transients with a View to Early Fault Detection*. Tesis doctoral. The Robert Gordon University, 1992.
131. CASTELLI LÉMEZ, Marcelo J. *Metodología de monitorización y diagnóstico de máquinas eléctricas de inducción*. Tesis doctoral. Universidad de Navarra, 2010.
132. DUQUE-PEREZ, O., et al. Non intrusive operational health identification of in-service electrical machine. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 5120 - 5125.



133. DAVIU, José A. A.; and GUASP, Martin R. *Diagnóstico De Roturas De Barra y Otras Averías Electromecánicas En Máquinas De Inducción Mediante El Estudio Del Transitorio De Arranque Con La Transformada Wavelet*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
134. GUO-SHENG HU; ZHEN REN and YONG-JUN TOU. Symmetrical Wavelet Construction and Its Application for Electrical Machine Fault Signal Reconstruction. *Machine Learning and Cybernetics*, 2006 International Conference on, pp. 3734 - 3737.
135. HABETLER, T. G. Current-based condition monitoring of electrical machines in safety critical applications. *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008. EPE-PEMC 2008. , vol. 13th, pp. 21 - 26.
136. SOUALHI, A.; CLERC, G. and RAZIK, H. Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor using an Improved Artificial Ant Clustering Technique. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 60, no. 9. pp. 4053-4062. ISSN 0278-0046.
137. PUCHE, R. *Nuevos Métodos De Diagnosis De Excentricidad y Otras Asimetrías Rotóricas En Máquinas Eléctricas De Inducción a Través Del Análisis De La Corriente Estatórica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2008., 2008.
138. PAZ PARRA, A., et al. Stator fault diagnosis on squirrel cage induction motors by ESA and EPVA. *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013 Workshop on, pp. 1 - 6.
139. COENEN, I.; MBO'O, C. P. and HAMEYER, K. Statistical evaluation of manufacturing tolerances in electrical machines by simulation and measurement. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2013 Fourth International Conference on, pp. 506 - 510.
140. PICOT, A., et al. Bearing fault detection in synchronous machine based on the statistical analysis of stator current. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 3862 - 3867.
141. GUASCH PESQUER, Luis. *Efectos De Los Huecos De Tensión En Las Máquinas De Inducción y En Los Transformadores Trifásicos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
142. KARIM, B. A., et al. Investigation on the Diagnosis of Simple and Combines Mechanical Faults in Asynchronous Motor Based Electric Drives. *American Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 11, no. 6. pp. 994-1004.

143. NEMEC, M., et al. Detection of broken bars in induction motor using voltage pattern analysis. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2009. SDEMPED 2009. IEEE International Symposium on, pp. 1 - 6.
144. ORMAN, M., et al. On the detection of missing magnetic wedges using impedance analysis. *Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 2013 IEEE 1st International Conference on, pp. 325 - 330.
145. CIANDRINI, C., et al. Fault detection and prognosis methods for a monitoring system of rotating electrical machines. *Industrial Electronics (ISIE)*, 2010 IEEE International Symposium on, pp. 2085 - 2090.
146. AKIN, Bilal, et al. A simple real-time fault signature monitoring tool for motor-drive-embedded fault diagnosis systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2011, vol. 58, no 5, p. 1990-2001.
147. WU, Chuan Hui; GAO, Yan; GUO, Yu. Study on Remote Condition Monitoring and Fault Diagnosis System for Rotating Machinery Based on LabVIEW. En *Advanced Materials Research*. 2012. p. 1939-1942.
148. GOPINATH, R., et al. Fault injection capable synchronous generator for condition based maintenance. *Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2013 7th International Conference on, pp. 60 - 64.
149. FIŠER, R., et al. Modeling, analysis and detection of rotor field winding faults in synchronous generators. *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on, pp. 1 - 6.
150. RODRIGUEZ, P., et al. Stator circulating currents as media of fault detection in synchronous motors. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013 9th IEEE International Symposium on, pp. 207 - 214.
151. EFTEKHARI, M., et al. Review of induction motor testing and monitoring methods for inter-turn stator winding faults. *Electrical Engineering (ICEE)*, 2013 21st Iranian Conference on, pp. 1 - 6.
152. JICHAO YANG; YANZHEN ZHAO and XIKUI MA. An online detection system for inter-turn short circuit faults in dry-type air-core reactor based on LabVIEW. *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011 International Conference on, pp. 1 - 5.



153. WANG, Pei; WANG, Zhengand XIAO, Zhaoxia. Fault Diagnosis Based on Internet of Things Technology for Electricity Supply Network. *Journal of Applied Sciences*, 2013, vol. 13, no. 21. pp. 4851-4856 ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 18125654.
154. LASKAR, Shahedul H.; and MUHAMMAD, Mohibullah. Power Quality Monitoring by Virtual Instrumentation using LabVIEW. *Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International*, 2011, pp. 1 - 6.
155. MARTÍN COSTA RIAL, Ángel. *Investigación De Nuevas Técnicas De Mantenimiento De Parques Eólicos*. Tesis doctoral. Universidade da Coruña, 2012.
156. LEMMA, Tamiru Alemu; and HASHIM, Fakhrudin Mohd. IFDD: Intelligent Fault Detection and Diagnosis-Application to a Cogeneration and Cooling Plant. *Asian Journal of Scientific Research*, 2013, vol. 6, no. 3. pp. 478-487 ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 19921454.
157. SRIKANT, Kamalina. *Improving Your Maintenance Strategy with Online Condition Monitoring*. [www.ni.com](http://www.ni.com): National Instruments. 01 Sept. 2014, 2014. Available from: <<http://www.ni.com/newsletter/52418/en/>>.
158. TAVNER, P. J. Review of Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. *Electric Power Applications, IET*, 2008, vol. 2, no. 4. pp. 215-247. ISSN 1751-8660.
159. FILIPPETTI, F.; BELLINI, A.and CAPOLINO, G. Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives. *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2013 IEEE Workshop on, pp. 196 - 209.
160. PRIETO, M. D., et al. Bearing Fault Detection by a Novel Condition-Monitoring Scheme Based on Statistical-Time Features and Neural Networks. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 60, no. 8. pp. 3398-3407. ISSN 0278-0046.
161. JONES, Martin, et al. A dual five-phase space-vector modulation algorithm based on the decomposition method. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 48, no 6, p. 2110-2120.
162. GOH, H. H., et al. POWER QUALITY DIAGNOSIS IN DISTRIBUTION NETWORK USING WAVELET TRANSFORM. *American Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 11, no. 2. pp. 291-300 ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 15469239.

163. PONS-LLINARES, J., et al. Eccentricity diagnosis in Inverter - Fed Induction Motors via the Analytic Wavelet Transform of transient currents. *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on, pp. 1 - 6.
164. RIERA-GUASP, M., et al. A General Approach for the Transient Detection of Slip-Dependent Fault Components Based on the Discrete Wavelet Transform. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2008, vol. 55, no. 12. pp. 4167-4180. ISSN 0278-0046.
165. ANTONINO-DAVIU, J. A., et al. Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures Via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2006, vol. 42, no. 4. pp. 990-996. ISSN 0093-9994.
166. POYHONEN, S., et al. Fault diagnostics of an electrical machine with multiple support vector classifiers. *Intelligent Control, 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on*, 2002, pp. 373 - 378.
167. VEGANZONES, Carlos, et al. New Platform for Experimental Education in Electrical Generation Based on Wind Energy Systems. *International Journal of Engineering Education*, 2009, vol. 25, no. 4. pp. 841-848.
168. SAN MARTÍN OJEDA, Moisés Luis, et al. ITC Platform for Support AC Circuits Study. Plataforma TIC De Apoyo Al Estudio De Circuitos Eléctricos De Corriente Alterna. *Modelling in Science Education and Learning*, 2014, vol. 7. pp. 123-130.
169. SAN MARTÍN, M., et al. ICT TOOLS FOR THE STUDY OF ALTERNATING CURRENT ELECTRIC MACHINES. *INTED2014 Proceedings*, 2014. pp. 3687-3694.
170. SAN MARTÍN OJEDA, Moisés Luis, et al. *Plataforma Educativa Online Para Ingeniería*. Valencia ed. Ponencia. XXI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas., Julio 2013, 2013.
171. PARRA GONZALO, Eduardo P., et al. *Essay's Monitoring, an Improvement in Engineers Learning*. Valladolid: Ponencia Congreso. International Symposium on New Methods and Curricula in Engineering Education in a New Europe, 2004.
172. PARRA GONZALO, Eduardo P., et al. *Electrical Machinery Laboratory, a New Teaching Experience*. Valladolid ed. Ponencia Congreso. International Seminar: "New Teaching and Learning methods: how efficient are they?", 2003.
173. SANCRISTOBAL, E., et al. *Challenges of Applying Online Learning Tools in Distance Learning Courses*. , 2012. ISBN 2165-9559.



174. GAO, Caixia; WANG, Fuzhong. Engineering-Oriented Electric Machinery and Electric Drives Curriculum Teaching Reform and Exploration Based on Scientific Teaching Materials. En *Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 175-180.
175. JIEFAN, Cui; HUI, Wu; HONG, Yan; et al. Design and Implementation of “Electric Machinery” Course Network Software. *2nd International Conference on Education and Sport Education*. ESE 2011, Vol II, p. 61-64.
176. FARDANESH, B. Computer Aided Instruction of Rotating Electric Machines Via Animated Graphics. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 1992, vol. 7, no. 4. pp. 1579-1583. ISSN 0885-8950.
177. GENCER, Cetin; and GEDIKPINAR, Mehmet. A Computer-Aided Educational Tool for Induction Motors. *Computer Applications in Engineering Education*, 2012, vol. 20, no. 3. pp. 503-509. ISSN 1099-0542.
178. MCGRATH, M. B.; and BROWN, J. R. Visual Learning for Science and Engineering. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 2005, vol. 25, no. 5. pp. 56-63. ISSN 0272-1716.
179. UBELL, R. Engineers Turn to e-Learning. *Spectrum, IEEE*, 2000, vol. 37, no. 10. pp. 59-63. ISSN 0018-9235.
180. COLAK, I., et al. A Novel Integrated Web Based Learning System for Electrical Machines Education. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2007. POWERENG 2007. International Conference on, pp. 265 - 269.
181. MARTIN-VILLALBA, Carla, et al. Development of Virtual-Labs Based on Complex Modelica Models using VirtualLabBuilder. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2010, vol. 9, no. 1. pp. 98-107.
182. JARA, Carlos A., et al. Synchronous Collaboration of Virtual and Remote Laboratories. *Computer Applications in Engineering Education*, 2012, vol. 20, no. 1. pp. 124-136.
183. BALAMURALITHARA, B.; and WOODS, P. C. Virtual Laboratories in Engineering Education: The Simulation Lab and Remote Lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 2009, vol. 17, no. 1. pp. 108-118. ISSN 1099-0542.
184. SANCRISTOBAL, E., et al. Challenges of applying online learning tools in distance learning courses. *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2012 IEEE, pp. 1 - 7.

185. GARCÍA-ZUBIA, J., et al. Towards an extensible weblab architecture. *E-Learning in Industrial Electronics*, 2009. ICELIE '09. 3rd IEEE International Conference on, pp. 115 - 120.
186. MOLINA BONILLA, A., et al. Virtual Lab platform for distance learning courses in engineering technologies for the use of renewable energies. *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2012 IEEE, pp. 1 - 7.
187. PATI, B.; MISRA, S. and MOHANTY, A. A model for evaluating the effectiveness of software engineering virtual labs. *Technology Enhanced Education (ICTEE)*, 2012 IEEE International Conference on , pp. 1 - 5.
188. KAZMIERKOWSKI, M. P.; and LISERRE, M. Advances on Remote Laboratories and e-Learning Experiences (Gomes, L. and Garcia-Zubia, J., Eds.) [Book News]. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 2008, vol. 2, no. 2. pp. 45-46. ISSN 1932-4529.
189. SELL, Raivo; and SEILER, Sven. Learning Situations and Remote Labs in Embedded System Education. *14th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, 2013, pp. 1 - 5.
190. TAWFIK, M., et al. Special session: Remote-labs access in internet and performance learning environment projects. *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2013 IEEE, pp. 1098 - 1102.
191. ORDUÑA, P., et al. Generic integration of remote laboratories in learning and content management systems through federation protocols. *Frontiers in Education Conference*, 2013 IEEE, pp. 1372 - 1378.
192. SAN CRISTOBAL RUIZ, E., et al. Design, development and implementation of remote laboratories in distance electronics, control and computer subjects. *Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2013 10th International Conference on, pp. 1 - 5.
193. LOBO SALGADO, Juan I.; SAN MARTÍN OJEDA, Moisés and SERRANO SANZ, José A. Monitorización De Medidas Eléctricas En Prácticas De Laboratorio y Su Reproducción Por El Profesor En El Aula y Por El Alumno Vía Internet. *REDINET. Red De Información Educativa*, 2004. Available from: <<http://hdl.handle.net/11162/25808>>.
194. WILHELM BRUNS, F.; and ERBE, Heinz-H. Mixed Reality with Hyper-bonds—A Means for Remote Labs. *Control Engineering Practice*, 11, 2007, vol. 15, no. 11. pp. 1435-1444. ISSN 0967-0661.



195. BARROS, B.; READ, T. and VERDEJO, M. F. Virtual Collaborative Experimentation: An Approach Combining Remote and Local Labs. *Education, IEEE Transactions on*, 2008, vol. 51, no. 2. pp. 242-250. ISSN 0018-9359.
196. FRERICH, S., et al. Virtual Labs and Remote Labs: Practical experience for everyone. *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2014 IEEE, pp. 312 - 314.
197. SANCRISTOBAL, E., et al. State of Art, Initiatives and New Challenges for Virtual and Remote Labs. *Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 2012 IEEE 12th International Conference on , pp. 714 - 715.
198. GUSTAVSSON, I., et al. On Objectives of Instructional Laboratories, Individual Assessment, and use of Collaborative Remote Laboratories. *Learning Technologies, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 2, no. 4. pp. 263-274. ISSN 1939-1382.
199. KLOOS, C. D., et al. Open learning: Advances in the eMadrid excellence network. *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2011 IEEE , pp. 1166 - 1170.
200. *LabVIEW*. National Instruments; Programa informático. ed., 2014.
201. WHON HO; LE VIET BANH and KWANG YOUNG JEONG. Developing Java applets for electrical machine using Beans technology. *Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on, vol. 2, pp. 947 - 950.
202. AL-ALI, A. R.; and AL-ROUSAN, M. Java-Based Home Automation System. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 50, no. 2. pp. 498-504. ISSN 0098-3063.
203. TURAN, J., et al. Design Web-controlled multimedia laboratory. *Electronics in Marine, 2004. Proceedings Elmar 2004. 46th International Symposium*, 2004, pp. 154 - 159.
204. LANGCAI CAO; JIAN LUO and YANQING PENG. B/S structure research of real-time process control and monitoring system based on ajax. *Control and Automation (ICCA)*, 2010 8th IEEE International Conference on, pp. 563 - 567.
205. XIAOFENG WANG. AJAX technology applications in the network test system. *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011 International Conference on , pp. 1954 - 1956.
206. NUNES, R. J. C.; and DELGADO, J. C. M. An Internet application for home automation. *Electrotechnical Conference*, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean, vol. 1, pp. 298 - 301.

207. GARCIA-ZUBIA, J., et al. Addressing Software Impact in the Design of Remote Laboratories. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 56, no. 12. pp. 4757-4767. ISSN 0278-0046.
208. MASEDA, F. J.; MARTIJA, I. and MARTIJA, I. A Training Tool and Methodology to Allow Concurrent Multidisciplinary Experimental Projects in Engineering Education. *Education, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 55, no. 3. pp. 357-364. ISSN 0018-9359.
209. SÁNCHEZ, A.; GARCÍA, M.; BLANCO, M.; HERRAEZ, M.; SAN MARTÍN, M. Hydraulic Industrial Filter Product-Process development Applying Knowledge Based Engineering. *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference*, Zaragoza, June 2013.
210. GOLNARAGHI, Farid; and KUO, Benjamin C. *Automatic Control Systems*. Wiley Publishing, 2009.
211. OMER, Abdu Idris; and TALEB, M. M. Architecture of Industrial Automation Systems. *European Scientific Journal*, Jan 2014, 2014, vol. 10, no. 3. pp. n/a ProQuest Agricultural Science Collection, ProQuest Agriculture Journals. ISSN 18577881.
212. SMITH, Carlos A.; and CORRIPIO, Armando B. *Principles and Practices of Automatic Process Control, 3rd Edition*. Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-43190-9.
213. *UNE EN 60076-1 Transformadores De Potencia. Parte 1: Generalidades*. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 2013.
214. *STATGRAPHICS Centurion XVII.*. Statpoint Technologies, Inc., Programa informático. Ed. 2014.
215. *UNE EN 60034-2-1 Máquinas Eléctricas Rotativas. Parte 2-1: Métodos Normalizados Para La Determinación De Las Pérdidas y Del Rendimiento a Partir De Ensayos*. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 2009.
216. HINES, Willian W. and MONTGOMERY, Douglas C. *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración*. CECSA, 1987. ISBN 968-26-0655-1.



*“Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial”*



**Universidad de Valladolid**

---

