

GRADO EN MARINA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO SOBRE DETECCIÓN DE
FALLOS EN MOTORES ELÉCTRICOS
DE INDUCCIÓN***

Alumno/Alumna: Cabrera, Bermúdez, Aitor

Director/Directora: Larrabe, Barrena, Juan Luis

Curso: 2017-2018

Fecha: 18 de junio de 2018

1957-19.05.2011



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Resumen trilingüe

Resumen del Trabajo de fin de Grado:

En este Trabajo de fin de Grado, se realiza un estudio experimental para implementar un sistema de mantenimiento predictivo, mediante técnicas estadísticas, a un motor eléctrico asíncrono trifásico. El objetivo es predecir algunos de los fallos característicos de este tipo de motores, mediante técnicas no invasivas. Para ello, se efectuaron una serie de experimentos, que reprodujeron fallos de derivación entre fases, desequilibrio de rotor y daños en rodamientos. Se monitorizaron y registraron más de cincuenta variables de proceso. Finalmente, con dichos datos, se realizó un estudio estadístico de correlación y un análisis multivariante, identificándose las variables más representativas del proceso y las ecuaciones que las relacionan para predecir las anomalías estudiadas.

Final Degree Project summary:

In this Final Degree Project, an experimental study is carried out to implement a predictive maintenance system, using statistical techniques, to a three-phase asynchronous electric motor. The objective is to predict some of the characteristic faults of this type of engines, by non-invasive techniques. For this, a series of experiments is carried out, which reproduced faults of derivation between phases, imbalance of rotor and damages in bearings. More than fifty process variables were monitored and recorded. Finally, with these data, a statistical study of correlation and multivariate analysis was carried out, identifying the most representative variables of the process and the equations that relate them to predict the anomalies studied.

Gradu Amaierako Lanaren Laburpena:

Gradu Amaierako Lan honetan, azterketa experimental bat egite da, mantentze prediktibo sistema bat aplikatzeko motor elektriko asinkrono trifasiko bateri, teknika estatistikoak erabiliz. Helburua, honelako motor baten gertatzen diren funtzionamendu akats batzuk aurreikustea da, teknika ez-inbaditzaileak erabiliz. Horretarako, hainbat esperimentu egin ziren, fasearen arteko korrante desbideratzeak, errotorraren desoreka eta errodamenduak eragindako kalteak. Berrogeita hamar prozesu aldagai baino gehiago kontrolatu eta grabatu ziren.

Datu hauekin, korrelazio estatistiko baten azterketa eta aldagai anitzeko analisisia egin ziren, prozesuaren aldagai adierazgarrienak zeintzuk ziren jakiteko eta hauek lotzen dituzten ekuazioak identifikatuz.

Palabras clave

Mantenimiento, predictivo, motor eléctrico, asíncrono, trifásico, desequilibrio, rotor, derivación fases, rodamientos, análisis multivariante, correlaciones, vibraciones, armónicos.

Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Grado está dedicado a mi familia especialmente a mis padres y a mi hermano, igualmente, agradezco a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en el desarrollo de mi etapa universitaria.

También agradezco la ayuda de mi tutor del proyecto Juan Luis Larrabe Barrena, Cayo Diaz Ibañez y Miguel Ángel Gomez Solaetxe, sin los cuales no hubiera sido posible llevar a cabo el proyecto. Con todos ellos he aprendido mucho y me han ayudado en todo momento.

Gracias a todos.

ÍNDICE

Resumen trilingüe	I
Palabras clave	II
Agradecimientos	III
Índice	IV-VI
Índice de figuras	VII-X
MEMORIA	1 - 63
1. Introducción	2
2. Contexto	2
3. Objetivos y alcance del trabajo	3
4. Beneficios que aporta el trabajo	3
5. Análisis del estado del arte	4-13
5.1. Técnicas y trabajos actuales	4-9
5.2. Tecnologías actuales para mantenimiento predictivo	10-13
6. Fundamentos teóricos	14-63
6.1. Evolución del mantenimiento	14-16
6.2. Tipos de mantenimiento	17-22
6.2.1. Mantenimiento correctivo	17-18
6.2.2. Mantenimiento preventivo	19-20
6.2.3. Mantenimiento predictivo	20-21
6.2.4. Mantenimiento proactivo	21-22

6.3. Tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo	23-28
6.3.1. Análisis de vibraciones	24-25
6.3.2. Análisis de aceites	25
6.3.3. Termografía infrarroja	26-27
6.3.4. Análisis espectral de intensidades de corriente	27
6.3.5. Detección ultrasónica de defectos	27
6.3.6. Descargas parciales	28
6.4. Armónicos	29-39
6.4.1. Definición de armónicos	29-32
6.4.2. El espectro de frecuencia	32-33
6.4.3. Parámetros característicos de los armónicos	33-34
6.4.4. Origen de los armónicos	35
6.4.5. Efectos de los armónicos	36-39
6.5. El motor de inducción	40-46
6.5.1. Definición y principio de funcionamiento	40-42
6.5.2. Características constructivas	42-44
6.5.3. Curvas características de comportamiento	45-46
6.6. Fallos característicos del motor de inducción	47-63
6.6.1. Fallos en el estator	47-54
6.6.2. Fallos en el rotor	54-59
6.6.3. Fallos en los rodamientos	59-62
6.6.4. Rotura de barras en motores de inducción	62-63

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	64-130
7. Descripción de las fases y equipos utilizados	65-72
7.1. Descripción de las fases	65
7.2. Equipos utilizados	66-72
8. Cronograma	73
9. Descripción de los resultados	74-130
9.1. Desarrollo de las pruebas	74-100
9.1.1. Calibración del equipo	74-77
9.1.2. Prueba de derivación entre líneas	78-83
9.1.3. Prueba de derivación entre fase y masa	84-88
9.1.4. Prueba de desequilibrio del rotor	89-93
9.1.5. Prueba con rodamiento dañado	94-100
9.2. Análisis estadístico y multivariante	101-129
9.2.1. Derivación entre líneas	102-108
9.2.2. Desequilibrio del rotor	109-115
9.2.3. Rodamiento dañado	116-129
9.3. Líneas futuras de trabajo	130
CONCLUSIONES	131-133
BIBLIOGRAFÍA	134-136

Índice de figuras

<i>Figura 5.2.1. – FAG SmartCheck.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5.2.2. – Isometer 685.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5.2.3. – Información anticipada a través del Isometer.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6.4.1. – Señal de intensidad descompuesta en sus componentes.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6.4.2. - Espectro de la señal que se compone de 50 Hz fundamental y los armónicos 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) y 9 (450 Hz).</i>	<i>33</i>
<i>Figura 6.4.3.– Diagrama equivalente del sistema con resonancia.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 6.4.4. - Evolución de la corriente eficaz y de las pérdidas Joule en función del valor de la THD.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 6.5.1. – Circuito equivalente de un motor de inducción.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 6.5.2. – Detalle del devanado estatórico de un motor de inducción.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 6.5.3. – Colocación del rotor en el estator de un motor de inducción.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 6.5.4. – Conexionado externo de los motores de inducción.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 6.5.5. – Curva Par-Velocidad de un motor de inducción.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 6.6.1. – Fallos en los rodamientos.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.2.1. - Grupo Motor-Alternador con elementos de control.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 7.2.2. - Registrador de potencia Fluke 1735.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 7.2.3. – Dibujo de sonda flexible.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7.2.4. – Ventana principal del software QualStat.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 7.2.5. - Cuadro eléctrico con Fluke 1735 conectado a barras.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 7.2.6. – Motor de prueba.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 8.1. Cronograma de tareas.</i>	<i>73</i>

<i>Figura 9.1.1. – Gráfica RMS 1º Prueba</i>	<u>75</u>
<i>Figura 9.1.2. - Evolución temporal 1º Prueba</i>	<u>76</u>
<i>Figura 9.1.3. – Histograma 1º Prueba</i>	<u>77</u>
<i>Figura 9.1.4. - THD ensayo inicial</i>	<u>77</u>
<i>Figura 9.1.5. – Esquema de conexión del equipo</i>	<u>78</u>
<i>Figura 9.1.6. – Gráfica RMS $I = 0,51$</i>	<u>79</u>
<i>Figura 9.1.7. - Evolución temporal $I = 0,51$</i>	<u>80</u>
<i>Figura 9.1.8. - Histograma $I = 0,51$</i>	<u>81</u>
<i>Figura 9.1.9. - THD Derivación entre líneas</i>	<u>81</u>
<i>Figura 9.1.10. – THD A A-B Derivación entre líneas</i>	<u>82</u>
<i>Figura 9.1.11. – THD A B-C Derivación entre líneas</i>	<u>82</u>
<i>Figura 9.1.12. – THD A C-A Derivación entre líneas</i>	<u>82</u>
<i>Figura 9.1.13. - Armónicos Derivación entre líneas</i>	<u>83</u>
<i>Figura 9.1.14. – Esquema de conexión del equipo</i>	<u>84</u>
<i>Figura 9.1.15.- RMS 97,1 Ohms</i>	<u>85</u>
<i>Figura 9.1.16. - Evolución temporal 97,1 Ohms</i>	<u>86</u>
<i>Figura 9.1.17. – Histograma 97,1 Ohms</i>	<u>87</u>
<i>Figura 9.1.18. - THD Derivación entre fase y masa</i>	<u>87</u>
<i>Figura 9.1.19. - Armónicos Derivación entre fase y masa</i>	<u>88</u>
<i>Figura 9.1.20. - Masa añadida en el ventilador</i>	<u>89</u>
<i>Figura 9.1.21. – RMS con 12,174 g</i>	<u>90</u>
<i>Figura 9.1.22. - Evolución temporal con 12,174 g</i>	<u>91</u>
<i>Figura 9.1.23. - Histograma con 12,174 g</i>	<u>92</u>
<i>Figura 9.1.24. - THD Desequilibrio</i>	<u>92</u>
<i>Figura 9.1.25.- Armónicos Desequilibrio</i>	<u>93</u>
<i>Figura 9.1.26. - Rodamiento con arena y jaula abierta</i>	<u>94</u>

<i>Figura 9.1.27. - Gráfica del voltaje conectado al alternador</i>	<i>_____</i>	<i>95</i>
<i>Figura 9.1.28. - Gráfica de la intensidad conectado al alternador</i>	<i>_____</i>	<i>95</i>
<i>Figura 9.1.29. - Gráfica de la distorsión armónica conectado al alternador</i>	<i>_____</i>	<i>96</i>
<i>Figura 9.1.30. - Gráfica del voltaje conectado a la red a 220 V</i>	<i>_____</i>	<i>96</i>
<i>Figura 9.1.31. - Gráfica de intensidad conectado a la red a 220 V</i>	<i>_____</i>	<i>97</i>
<i>Figura 9.1.32. - Gráfica de la distorsión armónica conectado a la red a 220 V</i>	<i>_____</i>	<i>97</i>
<i>Figura 9.1.33. - Gráfica del voltaje conectado a la red a 380 V</i>	<i>_____</i>	<i>98</i>
<i>Figura 9.1.34. - Gráfica de intensidad conectado a la red a 380 V</i>	<i>_____</i>	<i>98</i>
<i>Figura 9.1.35. - Gráfica de la distorsión armónica conectado a la red a 380 V</i>	<i>_____</i>	<i>99</i>
<i>Figura 9.1.36. - Gráfica de la temperatura en las pruebas de rodamiento</i>	<i>_____</i>	<i>99</i>
<i>Figura 9.1.37. - Gráfica de la vibración en las pruebas con rodamiento</i>	<i>_____</i>	<i>100</i>
<i>Figura 9.2.1. – Matriz de correlación Derivación Var (1-10)</i>	<i>_____</i>	<i>102</i>
<i>Figura 9.2.2. – Matriz de correlación Derivación Var (11-21)</i>	<i>_____</i>	<i>103</i>
<i>Figura 9.2.3. – Matriz de correlación Derivación Var (22-32)</i>	<i>_____</i>	<i>104</i>
<i>Figura 9.2.4. – Matriz de correlación Derivación Var (33-43)</i>	<i>_____</i>	<i>105</i>
<i>Figura 9.2.5. – Matriz de correlación Derivación Var (44-50)</i>	<i>_____</i>	<i>106</i>
<i>Figura 9.2.6. – Análisis multivariante de Derivación entre líneas.</i>	<i>_____</i>	<i>107</i>
<i>Figura 9.2.7. – Comparativa entre los datos reales y el modelo de derivación</i>	<i>_____</i>	<i>108</i>
<i>Figura 9.2.8. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (1-10)</i>	<i>_____</i>	<i>109</i>
<i>Figura 9.2.9. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (11-21)</i>	<i>_____</i>	<i>110</i>
<i>Figura 9.2.10. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (22-32)</i>	<i>_____</i>	<i>111</i>
<i>Figura 9.2.11. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (33-43)</i>	<i>_____</i>	<i>112</i>
<i>Figura 9.2.12. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (44-50)</i>	<i>_____</i>	<i>113</i>
<i>Figura 9.2.13. – Análisis multivariante de Desequilibrio en el rotor.</i>	<i>_____</i>	<i>114</i>
<i>Figura 9.2.14. – Comparativa entre la masa real en el rotor y la predicha.</i>	<i>_____</i>	<i>115</i>
<i>Figura 9.2.15. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (1-10)</i>	<i>_____</i>	<i>116</i>

<i>Figura 9.2.16. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (11-20)</i>	117
<i>Figura 9.2.17. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (21-30)</i>	118
<i>Figura 9.2.18. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (31-34)</i>	119
<i>Figura 9.2.19. – Análisis multivariante de Daños en el rodamiento a 220 V.</i>	120
<i>Figura 9.2.20. – Comparativa entre daño y daño predicho a 220 V.</i>	121
<i>Figura 9.2.21. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (1-10)</i>	122
<i>Figura 9.2.22. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (11-21)</i>	123
<i>Figura 9.2.23. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (22-32)</i>	124
<i>Figura 9.2.24. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (33-43)</i>	125
<i>Figura 9.2.25. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (44-54)</i>	126
<i>Figura 9.2.26. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (55-59)</i>	127
<i>Figura 9.2.27. – Análisis multivariante de Daños en el rodamiento a 380 V.</i>	128
<i>Figura 9.2.28. – Comparativa entre daño y daño predicho.</i>	129



MEMORIA

1. Introducción

La motivación para la realización de este Trabajo de fin de Grado surge debido a que actualmente los motores eléctricos son unos de los mayores consumidores de energía eléctrica tanto en el sector industrial como en el comercial. Casi la mitad de la energía eléctrica usada y cerca de las dos terceras partes de la utilizada en la industria es consumida por motores eléctricos.

Es por ello que cada vez es más necesario controlar el funcionamiento interno de las máquinas, y así poder detectar cualquier posible indicio de fallo antes de que se produzca una avería.

2. Contexto

Los diferentes experimentos llevados a cabo para la realización de este Trabajo de fin de Grado, fueron realizados en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas Navales, que forma parte de la Escuela de Ingeniería de Bilbao perteneciente a la Universidad del País Vasco durante el curso académico 2017-2018.

Los trabajos realizados se efectuaron únicamente contando con los materiales y equipos disponibles en los laboratorios de la facultad. Para la realización de estos trabajos se contó con la inestimable ayuda del personal de Administración y servicios, en especial de Cayo Diez Ibáñez y de los profesores Juan Luis Larrabe y Miguel Ángel Gómez Solaetxe.

3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo general de este trabajo es predecir mediante técnicas no invasivas, algunos de los fallos característicos del motor eléctrico asíncrono trifásico. Para ello, solo se ha utilizado un registrador de parámetros eléctricos de uso general (Fluke 1735), evitando el uso de equipos específicos de alto coste.

Se pueden considerar como objetivos específicos los siguientes:

- Realizar una serie de experimentos que reproducen en laboratorio los fallos más comunes en motores eléctricos de inducción.
- Adquirir de estas pruebas los valores de los parámetros eléctricos y mecánicos que caracterizan el funcionamiento de estas máquinas.
- Determinar los parámetros que indican los síntomas previos al fallo en los motores de inducción y tomar medidas en el ámbito del mantenimiento predictivo.

4. Beneficios que aporta el trabajo

Dada la importancia de los motores asíncronos trifásicos en el ámbito de la ingeniería marina y de la industria en general, continuamente se están investigando nuevos métodos de diagnóstico y evaluación de condición. Este tipo de métodos del mantenimiento predictivo permiten monitorizar y detectar la evolución de fallos incipientes. Permitted con ello anticiparse a los efectos producidos por las averías. Con ello se pretende reducir costes de mantenimiento, pérdidas económicas debidas a paradas imprevistas de las instalaciones y sobre todo tratar de evitar fallos catastróficos que puedan acabar con vidas humanas.

5. Análisis del estado del arte

Actualmente, y desde hace más de tres décadas, el diagnóstico y monitorización de máquinas eléctricas rotativas ha supuesto un área de investigación de gran interés. Aunque tradicionalmente se ha considerado que las máquinas eléctricas son fiables, ha surgido una gran variedad de alternativas para la detección y diagnóstico de motores de inducción.

Algunos de estos nuevos métodos resultan de interés debido a su carácter no invasivo. Debido a que son capaces de detectar fallos mientras la máquina trabaja en condiciones normales y sin la necesidad de sensores situados en el propio motor. La principal diferencia de las técnicas tradicionales con respecto a las actuales es que necesitan que la máquina bajo análisis se encuentre fuera de servicio para poder efectuar el diagnóstico.

El arte del diagnóstico es minimalista, es decir, trata de tomar el mínimo número de mediciones de una máquina, de modo que una condición pueda inferirse rápidamente dando una indicación clara de los fallos incipientes.

5.1. Técnicas y trabajos actuales

A continuación, se realiza una breve exposición del estado actual de la técnica, clasificando los diferentes métodos de diagnóstico en función de la naturaleza de las variables físicas analizadas:

Diagnóstico mediante el análisis de temperaturas.

Los límites de la calificación de las máquinas eléctricas son establecidos por la temperatura máxima permisible para su correspondiente aislamiento. La medición de la temperatura es por lo tanto importante en el monitoreo de máquinas eléctricas, existen tres enfoques:

1. Medición de la temperatura de un punto local utilizando termopares o detectores de temperatura embebidos (ETD);
2. Uso de imágenes térmicas para monitorear la temperatura de los puntos calientes de la máquina;
3. Medición de la temperatura del fluido refrigerante.

Esto pone de manifiesto la dificultad fundamental del control de la temperatura; las mediciones puntuales, aunque ofrecen información más precisa son locales, y las medidas más generales tienen el riesgo de pasar por alto puntos calientes.

Se ha demostrado repetidamente que la detección de la temperatura es una técnica de monitoreo global efectiva para máquinas eléctricas, usando sensores simples y ancho de banda estrecho (1 Hz). Sin embargo, se ha descuidado como método de monitorización. Debería de emplearse más ampliamente, haciendo uso imágenes térmicas y tecnologías modernas como los sensores de fibra óptica. [1]

Diagnóstico mediante el análisis químico.

Las técnicas de diagnóstico químico han demostrado ser técnicas efectivas de monitorización global para máquinas eléctricas. Este tipo de técnicas puede clasificarse en tres categorías:

1. Detección de la degradación del aislamiento mediante el análisis de partículas y gases;
2. Monitorización del estado del aceite de la máquina;
3. Detección del desgaste sufrido por los rodamientos.

Si bien, es un tipo de método que ha demostrado ser efectivo, el coste del equipo y la cantidad de datos generados por el análisis químico, limitan su aplicación solo a las máquinas más grandes.

Diagnóstico mediante el análisis de vibraciones.

El análisis de vibraciones ha sido utilizado ampliamente, y ha mostrado ser especialmente efectivo en la detección del deterioro de los rodamientos. El monitoreo de vibraciones no resulta invasivo, pero requiere el uso de una serie de sensores especializados y un análisis complejo. La selección precisa y la ubicación de los sensores es muy importante. Sin embargo, debido a su amplia aplicación en otras máquinas rotativas, el análisis de vibraciones se ha establecido como una técnica ampliamente aceptada para máquinas eléctricas.

Las principales fuentes de vibración son los fallos mecánicos y eléctricos, que excitan la estructura de la máquina de diferentes formas, por ejemplo:

- Respuesta del núcleo del estator a fuerzas atractivas desarrolladas entre rotor y estator;
- Comportamiento dinámico del rotor en los rodamientos al girar la máquina;
- Respuesta de los cojinetes del eje y las fundaciones, a vibraciones transmitidas desde el rotor;
- Respuesta de las cabezas de bobinas del estator a las fuerzas electromagnéticas en la estructura.

La vibración puede ser detectada por los acelerómetros y velocímetros montados en cojinetes. Los acelerómetros son más apropiados a frecuencias más altas, mientras que los velocímetros lo son a bajas frecuencias. [1]

Diagnóstico mediante el análisis de variables eléctricas.

El diagnóstico de una máquina eléctrica se puede lograr midiendo el flujo axial de dispersión, la corriente, la potencia y la actividad de descarga eléctrica. Estas son señales de amplio ancho de banda (generalmente, 50 kHz) que requieren un análisis complejo. Las señales de flujo axial, corriente y potencia son capaces de detectar averías tanto en la parte eléctrica como mecánica de un tren de transmisión. [1]

- El monitoreo de flujo axial no es invasivo y utiliza un solo sensor, pero es complejo de analizar y de momento no es utilizado en la industria.
- La técnica conocida como MCSA (Motor Current Signature Analysis) es una de las más importantes actualmente. Esta técnica tiene ventajas como ser no invasiva y fácil de implementar, arrojando buenos resultados. Además de utilizar sensores previamente existentes, por lo que ha sido ampliamente aceptada para el monitoreo de máquinas.

Esta técnica utiliza un sensor de efecto Hall para medir las señales de corriente del estator y un sistema de adquisición de datos. Esta señal se analiza para observar su huella y sus componentes que están asociados con fallos diferentes que pueden ser de mayor magnitud en el momento de arranque.

- El monitoreo de energía tampoco es invasivo, utiliza sensores existentes, pero requiere menos ancho de banda (10 kHz) y una interpretación espectral menos

compleja para detectar fallos, pero aún no es ampliamente aceptado y, por lo tanto, merece investigación para el desarrollo futuro.

- La actividad de descarga eléctrica requiere sensores especiales, ancho de banda amplio (.100 kHz) y un análisis muy complejo para la detección de fallos, y solo se puede recomendar cuando se busca un modo específico de fallo de alta tensión en una ubicación conocida en una máquina grande. [1]

A continuación, se refieren una serie de artículos, trabajos y tesis doctorales que demuestran la vigencia actual e interés del diagnóstico y monitorización de máquinas eléctricas rotativas:

- Durante el año 2018 se publicó el trabajo *“Experience with Stator/Insulation Testing and Turn/Phase Insulation Failures in the Power Generation Industry”*. En este documento se presentan los más de diecisiete años de experiencia del Instituto de Investigación de la corporación KEPCO en el mantenimiento predictivo del aislamiento del estator para motores de media tensión. El análisis de los fallos de aislamiento “turn or phase” y los registros de prueba de aislamiento realizados en los motores averiados muestran que es difícil predecir fallas de aislamiento “turn or phase” con las pruebas de aislamiento que se realizan actualmente. Los métodos de ensayo de aislamiento “turn or phase” se resumen y evalúan en función de los resultados de la investigación para ayudar a orientar los esfuerzos de investigación futuros hacia las necesidades industriales. [2]

- Durante el año 2017 se publicó el trabajo *“Two Stage Data Fusion of Acoustic, Electric and Vibration Signals for Diagnosing Faults in Induction Motors”*. En este documento se expone la necesidad de desarrollar mejores algoritmos de diagnóstico para el mantenimiento predictivo. Para ello proponen aplicar una combinación de tecnologías y sistemas de monitorización de condiciones múltiples y diversas. Las señales acústicas, eléctricas y de vibración se midieron a partir de motores de inducción sanos y defectuosos, que funcionan en condiciones de trabajo normales y ruidosas. El método propuesto demostró aumentar la confiabilidad de la evaluación de la salud de los motores de inducción, reduciendo el riesgo de falsas alarmas. [3]

- En junio de 2017 se publicó el trabajo “*Redundancy-Based Predictive Fault Detection on Electric Motors by Stationary Wavelet Transform*”. En él sus autores desarrollan un método predictivo de detección de fallos basado en señales para identificar fallas potenciales dentro de un motor eléctrico. Con el fin de evaluar el rendimiento del enfoque propuesto, se producen datos artificiales de vibración del motor y utilizan como una línea base para el análisis y la evaluación de la metodología. Después de confirmar con éxito la prueba de concepto detectando todas las frecuencias de fallos ocultos dentro de los datos artificiales, el enfoque se aplica luego a los datos experimentales para ver si puede aceptarse como una herramienta adecuada de detección de fallos para motores eléctricos sanos. [4]

- Durante el año 2013 se presentó la tesis doctoral “*Aportaciones al mantenimiento predictivo de motores de inducción mediante una metodología de diagnóstico basada en el uso combinado de técnicas estadísticas y redes neuronales artificiales*”. Su autordesarrolla y valida una metodología de diagnóstico de fallos en motores de inducción mediante el uso combinado de técnicas estadísticas y Redes Neuronales Artificiales. Se utilizó la corriente estatística como señal indicativa de fallo. La avería considerada fue la rotura de barras, realizándose exhaustivas pruebas en dos motores distintos, con tres variadores de frecuencia diferentes y a niveles de carga del motor que van desde vacío a plena carga. Se emplearon características estadísticas del dominio del tiempo y características del dominio de la frecuencia obtenidas mediante las transformadas de Fourier y Hilbert (módulo de la señal analítica). Para reducir la dimensionalidad de los datos de entrada se empleó un análisis de correlación simple y Análisis Discriminante. Para validar la metodología propuesta se comparó con técnicas de clasificación clásicas como el Análisis Discriminante y la Regresión Logística, comprobándose el mejor rendimiento de la metodología propuesta. [5]

- Durante el año 2010 se presenta el trabajo “*Aproximación al mantenimiento eléctrico predictivo de un motor impulsor de una bomba centrífuga utilizando inteligencia artificial.*” En él su autor presenta los resultados preliminares obtenidos a partir de la medición de algunas de las variables de funcionamiento más importantes de un motor trifásico de inducción que acciona una bomba centrífuga (grupo motor-bomba), mediante las cuales fue posible establecer acciones que indican que es factible relacionar diferentes regímenes de operación del grupo bajo estudio con algunas técnicas de mantenimiento predictivo aplicando a su vez herramientas de inteligencia artificial que permitirán establecer fechas de mantenimiento en función de la eficiencia del motor y otros aspectos técnico-constructivos como por ejemplo, la temperatura máxima de operación según el fabricante, conformando así un conjunto de estrategias que permitirán en última instancia “construir una curva inteligente de información aplicable a la gestión del mantenimiento antes que suceda la falla”. [6]

5.2. Tecnologías actuales para mantenimiento predictivo

Actualmente la industria está dedicada al desarrollo de productos innovadores que garanticen una mayor disponibilidad de los equipos en el tiempo, así como el mínimo coste de mantenimiento. Este tipo de equipos se diseñan con el objetivo de reducir las paradas no programadas y maximizar la duración de la vida útil de las máquinas. A continuación, se presentan dos tecnologías de última generación utilizadas tanto en el ámbito naval como en el industrial.

FAG SmartCheck

El dispositivo FAG SmartCheck, fabricado por la empresa FAG, es un sistema de medición online innovador que resulta especialmente adecuado para la monitorización permanente de parámetros de maquinaria y procesos de forma descentralizada. Ofrece las características de rendimiento de otros sistemas más costosos pero su diseño es compacto, fácil de montar y de utilizar. [7]

El sistema es ampliable con una base modular y puede por tanto adaptarse en cualquier momento para alcanzar los cambiantes requisitos de las diferentes aplicaciones.

Las principales ventajas del FAG SmartCheck son su tamaño, pequeño y robusto y su funcionamiento intuitivo. Permite almacenar información sobre el desarrollo del estado de la máquina a largo plazo teniendo en cuenta parámetros de proceso como la carga, la presión o el caudal. [7]



Figura 5.2.1. – FAG SmartCheck. [7]

FAG SmartCheck está listo para ser utilizado inmediatamente después del suministro. El conjunto de valores característicos integrados permite una monitorización general y fiable. Para una monitorización más precisa, puede seleccionarse una plantilla almacenada en el dispositivo por ejemplo para ventiladores y bombas. La plantilla de los componentes se cumplimenta con los datos de los componentes. El dispositivo cuenta con una base de datos de rodamientos integrada que contiene datos de rodamientos estándar FAG e INA. El usuario puede añadir más rodamientos a la base de datos en cualquier momento. [7]

Dependiendo de la plantilla de componentes seleccionada, se pueden ajustar ciertos parámetros como el tipo de rodamiento, el número de aspas del ventilador o la longitud de la correa. El valor característico generado permite una monitorización muy precisa de la máquina.

FAG SmartCheck ofrece amplias posibilidades para analizar los datos medidos y para evaluar el estado de la máquina monitorizada.

Los siguientes valores característicos generales se determinan desde la señal de aceleración y de aceleración envolvente:

- RMS, ancho de banda
- RMS, frecuencia selectiva
- Valor pico-a-pico
- Factor de cresta
- Valor periódico
- Contador W
- La temperatura.

FAG SmartCheck no sólo calcula los valores característicos. Además, las plantillas de componentes integradas en el dispositivo ofrecen la monitorización de frecuencias selectivas de diversos componentes.

Los patrones característicos en componentes como ejes, correas o ventiladores indican daños incipientes en etapas tempranas. Junto con los parámetros de proceso como el par, la carga o la velocidad, es posible realizar afirmaciones precisas relativas al progreso del daño.

Isometer 685

El vigilante de aislamiento Isometer 685 de Bender para sistemas eléctricos aislados de tierra (IT), asegura de forma eficiente y duradera la seguridad de las personas y máquinas. Bender ofrece vigilantes de aislamiento para todos los ámbitos de la industria. Estos se emplean especialmente en aquellas instalaciones donde se antepone un suministro eléctrico seguro, que evite interrupciones del servicio, daños con elevados costes y riesgo para las personas. [8][9]



Figura 5.2.2. – Isometer 685. [9]

Los Isometer ofrecen múltiples funciones para el reconocimiento temprano y el aseguramiento de la calidad, con un manejo intuitivo y sencillo, información fiable y comunicación sencilla. La localización y reparación rápida de los fallos de aislamiento es posible incluso durante el servicio normal, no es necesaria la parada de la instalación. Las soluciones portátiles de Bender simplifican el trabajo en grandes instalaciones muy ramificadas.

Teniendo en cuenta todos los tipos de estructuras de sistema y cargas conectadas, los Isometer usando el principio de medida patentado por Bender garantiza una correcta medida de aislamiento en:

- Sistemas con tensiones AC, DC or AC/DC hasta 12 kV
- Configuraciones monofásicas, trifásicas, Sistemas desconectados
- Capacidades a tierra hasta 2000 μF
- Valores de respuesta desde 0.2 k Ω a 10 M Ω



Figura 5.2.3. – Información anticipada a través del Isometer. [8]

El vigilante de aislamiento iso685-D vigila constantemente toda la resistencia de aislamiento de un sistema IT durante el funcionamiento y emite una alarma cuando no se alcanza un valor de respuesta ajustado. Para realizar la medición, el aparato se conecta entre el sistema IT (redes aisladas de tierra) y el conductor de protección (PE), superponiendo a la red una corriente de medida dentro del rango de μA , que es registrada y evaluada por un microcontrolador.

6. Fundamentos teóricos

A lo largo del siguiente capítulo se exponen los fundamentos teóricos que sustentan este Trabajo de fin de Grado. Para ello se comienza realizando un breve repaso de la historia del mantenimiento, los distintos tipos de mantenimiento y tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo. Tras ello se presenta una definición de los armónicos eléctricos, su origen y efectos. Finalmente se describe el motor de inducción, detallando algunos de los fallos más relevantes que les afectan.

6.1. Evolución del mantenimiento

Desde la aparición del hombre primitivo, capaz de fabricar y utilizar herramientas, surgió la necesidad de mantener en buen estado los utensilios fabricados por este. En esta primera época las herramientas y máquinas simples eran llevadas al límite de su capacidad, hasta que se producía el fallo y ya no era posible hacer uso de ellas. Al igual que la sociedad, el mantenimiento ha sufrido una evolución empujada en gran parte por el desarrollo tecnológico.

Su concepción ha ido modificándose desde la simple función de arreglar y reparar los equipos para asegurar la producción, hasta la actual con funciones de prevenir, corregir y revisar los equipos a fin de optimizar los costes globales.

Actualmente, se puede definir el mantenimiento como el conjunto de técnicas ó trabajos de reparación y revisión cuyo objeto es asegurar el correcto y continuo uso de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios. Reduciendo los efectos negativos de los fallos aparecidos y sus consecuencias. Además de prolongar la vida útil de los equipos y mantener un rendimiento aceptable durante la mayor cantidad de tiempo posible.

Históricamente se pueden diferenciar cuatro etapas en la evolución del mantenimiento industrial, diferenciadas principalmente por su metodología:

1º Etapa: Es el periodo desde la revolución industrial hasta la II Guerra Mundial. Debido a la escasa mecanización de la industria los periodos de paradas no tenían gran importancia. La maquinaria era más sencilla, fiable y fácil de reparar. Como resultado, no se necesitaban sistemas de mantenimiento

complicados, y la necesidad de personal cualificado era menor que en la actualidad.

El mantenimiento, de carácter correctivo, únicamente consistía en tareas de limpieza y lubricación de las máquinas además de arreglar las averías en el momento de su aparición. La presión ejercida por las empresas aseguradoras, debido a las pérdidas de vidas humanas y económicas, ocasionadas por averías en las calderas de vapor, forzó la búsqueda de mejores técnicas de mantenimiento.

2º Etapa: Durante la Segunda Guerra Mundial aumentó la necesidad de productos de toda clase mientras que la mano de obra industrial se redujo considerablemente. Esta situación llevó al aumento de la mecanización de la industria, que se hizo más sensible a la disponibilidad de las máquinas. Lo que puso de manifiesto esta dependencia fue que los fallos de la maquinaria se podían y debían de prevenir. Esto dio como resultado el nacimiento del concepto del mantenimiento preventivo, que se basa primordialmente en la revisión completa del material a intervalos fijos, reparando los equipos antes de que se produzca el desgaste o la rotura y así evitar interrupciones en el proceso productivo.

El costo del mantenimiento comenzó también a elevarse mucho en relación con los otros costes de funcionamiento. Como resultado se comenzaron a implantar sistemas de control y planificación del mantenimiento.

3º Etapa: Tras Segunda Guerra Mundial, con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáutica surge el mantenimiento predictivo. A diferencia del preventivo, las tareas de mantenimiento no dependen de intervalos de tiempo fijo, sino del estado efectivo del equipo o sus elementos, y cuyo objetivo es la detección precoz de síntomas incipientes que permitan actuar antes de que las consecuencias del fallo sean inadmisibles. Contando para ello con equipos electrónicos de inspección y monitorización, que permiten conocer el estado real de los equipos, mediante mediciones periódicas o continuas de distintos parámetros como las vibraciones, ruidos o temperaturas.

Esto cobra mayor importancia a principios de los años 80, debido al continuo crecimiento de la mecanización, los periodos improductivos tienen un efecto más importante en la producción, costo total y servicio al cliente. Sobre todo con la tendencia global a reducir el stock disponible y producir “just in time”, lo que causa que pequeñas averías puedan causar el paro de toda una planta. Es por ello que se comienza a realizar estudios causa-efecto, que demuestran que la relación entre el número de horas de funcionamiento y la probabilidad de fallo no siempre es directa, como se creía previamente.

4º Etapa: A partir de los años 90 el mantenimiento se caracteriza por la aplicación de sistemas de información basados en ordenadores que permiten la acumulación de experiencia empírica y el desarrollo de los sistemas de tratamiento de datos. Estos avances en informática han permitido una mayor sistematización de los procedimientos, tareas y estrategias. La aparición de herramientas informáticas cada vez más potentes ha permitido la automatización de muchos de estos procesos.

El desarrollo tecnológico actual, llevará al mantenimiento al uso de los sistemas expertos y de la inteligencia artificial, lo que tendrá un gran impacto en el diagnóstico de averías y en facilitar las actuaciones de mantenimiento en condiciones difíciles.

Finalmente, el coste del mantenimiento se encuentra todavía en aumento, en términos absolutos y en proporción a los gastos totales. En algunas industrias supone el segundo gasto operativo más alto y en algunos casos incluso el primero. Como resultado de esto, en las últimas décadas los costes de mantenimiento se han convertido en la prioridad de control de costes más importante.

6.2. Tipos de mantenimiento

Hoy en día existen diversas estrategias de mantenimiento destinadas a aumentar la disponibilidad y productividad de las máquinas, equipos y plantas industriales. Estas estrategias se diferencian entre sí tanto por el enfoque a la hora de abordar el problema del mantenimiento, como por la tecnología y sofisticación involucradas. Su complejidad varía desde la simple corrección de las averías producidas, hasta la monitorización de múltiples variables indicativas de fallo, con el objetivo de actuar antes de la aparición de estos.

Los tipos de mantenimiento que se van a estudiar son los siguientes:

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento predictivo.
- Mantenimiento proactivo.

6.2.1. Mantenimiento correctivo

Se conoce como mantenimiento correctivo, al conjunto de actividades dedicadas a la reparación y sustitución de elementos dañados por repuestos, en el momento de producirse la avería. No se toman acciones para prevenir el fallo, lo que supone que el mantenimiento queda relegado a intervenciones como consecuencia de las averías. Con los consiguientes costes de reparación, mano de obra, piezas de repuesto y los relativos a los costes por las paradas de producción.

Este sistema resulta aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que es imposible predecir los fallos y en los procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento y durante cualquier tiempo, sin afectar la seguridad.[10]

Estudios del invierno de 2000 indican que este sigue siendo el modo predominante de mantenimiento en los Estados Unidos. El estudio señalado analiza la proporción de los tipos de mantenimiento aplicados de la siguiente manera:

- >55% Correctivo.
- 31% Preventivo.
- 12% Predictivo.
- 2% Otros.

Si únicamente se realiza un mantenimiento correctivo, el término “mantenimiento” equivale a “reparación”. Si bien el objetivo de todo tipo de mantenimiento es reparar o sustituir componentes dañados, con la finalidad de alargar la vida útil de la máquina, supone un error centrar todas las tareas de mantenimiento con este procedimiento. Aunque el coste de la inversión inicial sea prácticamente nulo, presenta desventajas muy serias frente a otros tipos de mantenimiento:

- Las averías pueden suceder en cualquier momento, muchas veces al someter al equipo a una mayor exigencia, cuando la producción debe ser mayor, es decir, en el peor momento.
- Este tipo de paradas suelen tener resultados catastróficos, ya que fallos no detectados a tiempo, ocurridos en partes cuyo cambio hubiera resultado de bajo coste, pueden causar daños importantes en otros elementos o piezas conexos que se encontraban en buen estado de uso y conservación.
- Los costes de reparación de las mismas llegan a ser muy elevados.
- Se debe disponer de una gran cantidad de capital invertido en tener piezas de repuesto en el almacén ante la incertidumbre de qué pudiera fallar.
- Al desconocer el estado de las máquinas los riesgos de accidentes se incrementan.

6.2.2. Mantenimiento preventivo

Se puede definir el mantenimiento preventivo, como el conjunto de acciones encaminadas a reducir la frecuencia e impacto de los fallos de un sistema, basándose en la sustitución de componentes cuando suponemos que se ha agotado la vida útil de los mismos.

La necesidad de reducir los costes asociados a la baja disponibilidad de las máquinas y las paradas de producción consiguientes, llevaron a los ingenieros de mantenimiento a programar revisiones periódicas con el objetivo de mantener las máquinas en el mejor estado posible reduciendo la probabilidad de sufrir averías.

El diseñador del equipo suministra a menudo indicaciones de actividades de mantenimiento previstas, con indicación de sustitución de componentes y cambios en la lubricación. Gracias a ello la vida del equipo se amplía, lo que supone un ahorro económico promedio de un 12% a un 18% frente a un programa de mantenimiento basado exclusivamente en el mantenimiento correctivo.

Las ventajas que presenta este sistema se pueden resumir en las siguientes:

- Rentable en muchos procesos intensivos en capital.
- La flexibilidad permite el ajuste de la periodicidad del mantenimiento.
- Mayor ciclo de vida de los componentes.
- Ahorros de energía.
- Ahorros estimados del 12% al 18% sobre un programa de mantenimiento correctivo.

Las desventajas que presenta este sistema son:

- Es probable que ocurran fallos catastróficos al intervenir en una máquina que está funcionando correctamente, simplemente porque le toca una revisión. Las máquinas adquieren con su funcionamiento un equilibrio que es difícil de restablecer una vez que intervenimos en las mismas y con las actuaciones preventivas estamos modificando constantemente este equilibrio de funcionamiento.

- Posibilidad de daños incidentales a los componentes al realizar un mantenimiento innecesario, dado que cuando los desmontamos desconocemos la condición real de los mismos, pudiendo estar en buen estado.
- Podemos cambiar componentes que han agotado su vida teórica y no ver otros que se encuentran en mal estado. No tenemos control sobre los daños ocultos.
- En cuanto a su coste, puede dispararse como consecuencia de las frecuentes intervenciones en las máquinas, muchas de ellas innecesarias. Además, se necesitará contar con mano de obra intensiva y especial para períodos cortos, a efectos de liberar el equipo para el servicio lo más rápidamente posible.

6.2.3. Mantenimiento predictivo

Se conoce como mantenimiento predictivo al conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo (monitorización) de un sistema, que permiten una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de fallo.

Este tipo de mantenimiento surge a partir de las incertidumbres que presenta el mantenimiento preventivo y con el apoyo del desarrollo tecnológico. Este nuevo concepto de mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina supone toda una revolución, al anticipar el fallo por medio del conocimiento del comportamiento de la máquina y de cómo debería comportarse, conociendo de este modo previamente qué elemento puede fallar y cuándo. De esta forma se puede programar una acción de mantenimiento sin afectar al proceso productivo, con las consiguientes mejoras en costes de producción, mano de obra y repuestos. Se evitan de este modo grandes y costosas averías agilizando las intervenciones.

Un modelo de mantenimiento predictivo supone una inversión de capital inicial muy importante, tanto en tecnología como formación, con una rentabilidad de la misma a medio y largo plazo. Pero las ventajas son evidentes:

- Se conoce el estado de la máquina en todo momento.
- Se eliminan prácticamente todas las averías.
- Solo se detiene o interviene en la máquina cuando realmente es necesario.

- Al intervenir en la máquina conocemos el problema, reduciendo el tiempo de la reparación.
- Podemos identificar los fallos ocultos, así como la causa de fallos crónicos.
- Reducimos las piezas del almacén, adquiriéndolas cuando detectamos el problema en una fase primaria.
- Conseguimos bonificaciones en primas de seguros.
- Incrementamos la seguridad de la planta.
- Este método permite contar con un registro de la característica en análisis, sumamente útil ante fallos repetitivos; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada programada del equipo y se reducen las intervenciones de la mano de obra.

6.2.4. Mantenimiento proactivo

Se ha desarrollado como complemento a la evolución del mantenimiento predictivo. Este concepto engloba los tipos de mantenimiento detallados anteriormente elevándolos a otra dimensión; el análisis de causas. El mantenimiento predictivo puede determinar si algún elemento de la máquina puede fallar, pero no estudia la causa raíz del fallo. El mantenimiento predictivo no responde a la causa por la cual un rodamiento falla repetidamente, aunque si nos indique cuando puede fallar. Para cubrir esta incertidumbre, el mantenimiento proactivo o también conocido como fiabilidad de máquina analiza la causa raíz de la frecuencia de la avería, resolviendo aspectos técnicos de las mismas.

El mantenimiento proactivo está basado en los métodos predictivos, pero, para identificar y corregir las causas de los fallos en las máquinas, es necesaria una implicación del personal de mantenimiento.

Estos sistemas sólo son viables si existe detrás una organización adecuada de los recursos disponibles, una planificación de las tareas a realizar durante un periodo de tiempo, un control exhaustivo del funcionamiento de los equipos que permita acotar sus paradas programadas y el coste a él inherente, y una motivación de los recursos humanos destinados a esta función, acordes al sostenimiento de la actividad industrial actual.

6.3. Tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo

En este apartado se realiza una descripción más detallada del mantenimiento predictivo y las técnicas comúnmente aplicadas a este.

En el mantenimiento predictivo o bajo condición, evaluamos el estado de los componentes mecánicos o eléctricos mediante técnicas de seguimiento y análisis, permitiéndonos programar las operaciones de mantenimiento solamente cuando son necesarias. Consiste esencialmente en el estudio de ciertas variables o parámetros relacionados con el estado o condición del medio que mantenemos, como por ejemplo la vibración, temperatura, aceites, aislamientos, etc. El estudio de estos parámetros nos suministra información del estado de sus componentes y, algo también muy importante, del modo en que está funcionando dicho equipo, permitiéndonos no sólo detectar problemas de componentes sino también de diseño y de instalación. El objetivo del mantenimiento predictivo es la reducción de los costes de operación y de mantenimiento incrementando la fiabilidad del equipo. [18]

La base del mantenimiento predictivo radica en la monitorización de los equipos, ya que debemos evaluar los parámetros antes comentados con la instalación en funcionamiento normal. No es, por tanto, necesario hacer una parada para poder evaluar la condición de los mismos, conocemos el estado de nuestras máquinas mientras están trabajando.

Con las diferentes técnicas disponibles podemos evaluar los fallos en los componentes y seguir su evolución durante largos períodos de tiempo (a veces meses) antes de decidir nuestra intervención, de esta manera podemos coordinar con producción el momento más adecuado para la intervención de mantenimiento.

Para conseguir el éxito en la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo es necesario seguir una estrategia.

El fracaso lo tendremos asegurado si pretendemos hacer una implantación del mismo en todos nuestros equipos y más aún cuando queramos implantar varias tecnologías simultáneamente. Si además no tenemos un sistema de gestión de la información adecuado, que nos permita tratar los datos correctamente, conseguiremos tirar a la basura una importante inversión económica y lo que es peor perderemos los beneficios de una buena implantación con una alta rentabilidad económica. Además, perderemos la confianza en unas tecnologías que terminarán siendo de uso habitual.[18]

Será necesario en primer lugar hacer una selección de los equipos que vamos a monitorizar, ésta vendrá condicionada por una serie de factores entre los que se encuentran la criticidad o responsabilidad del equipo, la accesibilidad al mismo y la información técnica que podamos disponer de él. Nos centraremos en un pequeño número de ellos, analizando que técnica podremos aplicar en un primer momento, normalmente el análisis de vibraciones es la de más amplia utilización. Se realizará un programa piloto con los mismos, localizando defectos, analizando causas y retroalimentando el sistema una vez hayan sido erradicados los defectos.[18]

Una vez hayamos obtenido una valoración positiva de nuestra experiencia piloto, pasaremos a realizar una extensión de la aplicación a un mayor número de equipos y así sucesivamente hasta conseguir una implantación total con la integración de distintas tecnologías y una gestión adecuada de los datos obtenidos. Si el proceso se realiza de forma progresiva y sin prisas los resultados económicos no tardarán en ser evidentes y en muchas ocasiones sorprendentes.

Actualmente existen gran variedad de tecnologías que se pueden aplicar al campo del mantenimiento predictivo. Cada una de ellas tiene un campo de aplicación más o menos concreto, existiendo complementariedad, prácticamente entre todas. A continuación, se exponen las técnicas más importantes.

6.3.1. Análisis de vibraciones

De las distintas tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo, el análisis de vibraciones es la más popular. La razón la encontramos en la posibilidad de determinar una gran cantidad de defectos, en una amplia gama de máquinas con una inversión económica inicial razonable. La vibración es uno de los indicadores más claros del estado de una máquina. Bajos niveles de vibración indican equipo en buen estado, cuando estos niveles se elevan está claro que algo comienza a ir mal.

Los equipos utilizados para la adquisición de datos de vibraciones en las máquinas van desde los portátiles o de campo hasta la monitorización en continuo u online. Proceso y mantenimiento son las dos áreas de actividad más vinculadas a la productividad en la explotación. El control de los parámetros de proceso (presión, temperatura, caudal, etc.) de los equipos ha sido objeto de automatización desde hace más de una década en base a sistemas de control distribuido y redes de autómatas programables con interfaces Scada. [18]

El control de los parámetros de mantenimiento (vibración, temperatura, etc.) de los mismos equipos tiene todavía un largo camino por recorrer antes de lograr una implantación generalizada y una integración dentro del proceso de planta.

El análisis espectral de vibraciones consiste simplemente en realizar una transformación de una señal en el tiempo al dominio de la frecuencia, donde podemos identificar la vibración característica de cada uno de los componentes o defectos que puede presentar nuestro equipo.

6.3.2. Análisis de aceites

El análisis de aceites consiste en la realización de tests físico-químicos en el aceite con el fin de determinar si el lubricante se encuentra en condiciones de ser empleado, o si debe ser cambiado. La Ferrografía, o Análisis de partículas de desgaste, sin embargo, utiliza el lubricante como un medio para determinar el estado de la máquina lubricada. El análisis de aceites en nuestras instalaciones tiene dos objetivos claros: conocer el estado del aceite y conocer el estado de la máquina. Tradicionalmente éste último se obviaba, centrándonos siempre en determinar únicamente el estado del lubricante, para lo cual se realizan una serie de ensayos rutinarios de viscosidad, acidez, basicidad, análisis de aditivos, inspecciones visuales, etc. No es este el objetivo de la analítica del aceite como técnica de mantenimiento predictivo.[18]

Las espectrometrías, ferrografías y contenidos de partículas aportan valiosa información del estado de los componentes de las máquinas que bañamos con nuestros lubricantes. Podemos detectar defectos con una antelación mucho mayor que con otras técnicas como podría ser el análisis de vibraciones, la dificultad estriba en el alto costo de la tecnología implicada en ello. En casos de alta responsabilidad podría emplearse como técnica complementaria para verificar un diagnóstico realizado, por ejemplo, con un análisis vibracional. Por ejemplo, defectos en rodamientos, cojinetes o transmisiones pueden corroborarse al encontrar partículas de los mismos en un ferrograma.

6.3.3. Termografía infrarroja

La termografía infrarroja se podría definir brevemente como una técnica que permite, a través de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, la medida superficial de temperatura. El instrumento que se usa en termografía para medir, es la cámara de infrarrojos. La principal ventaja de la medida de temperatura mediante termografía, es que es una técnica de medida sin contacto, por lo que no afectará a las condiciones de los objetos observados. Esta cualidad la hace especialmente interesante en el control y mantenimiento de elementos en tensión. Entre las principales aplicaciones de la termografía podríamos citar:

- Medidas de espesores y detección de discontinuidades en productos aislantes térmicos y refractarios.
- Inspección de tubos y tuberías.
- Inspección en soldaduras.
- Posicionamiento de componentes y fallos en circuitos eléctricos.
- Aplicaciones en seguridad y defensa.
- Aplicaciones médicas.
- Aplicaciones de prevención y detección de incendios.
- Medición en tanques de almacenamiento.
- Control de calidad en procesos de producción.

De todas las aplicaciones, las instalaciones eléctricas son candidatas naturales a la aplicación de la termografía infrarroja. Podremos detectar puntos calientes en los termogramas realizados a las mismas. Las causas de estos puntos calientes pueden ser varias:

- Reflexiones
- Radiación aportada por el sol
- Carga
- Variaciones de emisividad
- Calor inducido por corrientes de Eddy

- Aumento de resistencia, ocasionado por conexiones flojas, con suciedad, corrosión, ajuste deteriorado, componentes incorrectos o instalaciones incorrectas.

6.3.4. Análisis espectral de intensidades de corrientes

El análisis de motores eléctricos puede realizarse mediante termografías o mediante análisis de vibraciones, pero otra de las técnicas que podemos emplear para detectar problemas en barras es el análisis espectral de corriente, consistente en tomar el espectro de intensidades en las fases de alimentación del motor. Esta tecnología puede realizarse en paralelo con el análisis de vibraciones, usando los mismos colectores de datos, cambiando los sensores de vibración por una pinza amperimétrica.

6.3.5. Detección ultrasónica de defectos

Existen numerosos fenómenos que van acompañados de emisión acústica por encima de las frecuencias del rango audible. Las características de estos fenómenos ultrasónicos hacen posible la utilización de detectores de ultrasonidos en infinidad de aplicaciones industriales dentro del mantenimiento como, por ejemplo:

- Detección de grietas y medición de espesores (por impulso eco).
- Detección de fugas en conducciones, válvulas, etc.
- Verificación de purgadores de vapor.
- Inspección de rodamientos.
- Control de descargas eléctricas.

Estas son algunas de las aplicaciones no habituales de los ultrasonidos, además de las normalmente usadas como ensayo no destructivo para la determinación de defectos internos en piezas, en este caso, somos nosotros los que realizamos la emisión acústica para poder detectar el defecto.

6.3.6. Descargas parciales

Los sistemas dieléctricos usados en máquinas rotativas se caracterizan por la posibilidad de presentar descargas parciales debidas a problemas a lo largo de su vida útil.

Las descargas parciales son pequeñas descargas que aparecen en el interior de los dieléctricos como manifestación de la degeneración de los mismos. Una vez iniciado este proceso, se mantendrá constante en el tiempo y será origen de la degeneración del sistema aislante: el calor y compuestos químicos corrosivos atacarán al aislamiento conduciéndolo lentamente a la destrucción y cortocircuito a tierra por perforación.

La monitorización on-line de los niveles de descargas parciales en el tiempo, va a ser por tanto un buen sistema para conseguir evaluar el proceso de degradación del dieléctrico en la máquina. Existen varios sistemas de medida on-line: sondas inductivas, sensores tipo antena y sensores capacitivos. Los de uso más extendido son los captadores capacitivos. Las señales, se recogerán con un analizador de descargas parciales (PDA).[18]

Tras el análisis de las gráficas, niveles de descargas, polaridad, variación con la temperatura, humedad y carga, se obtienen datos que permiten discernir el tipo de degradación que se produce en la máquina e incluso la zona de aparición de las mismas.

6.4. Armónicos

El objetivo de este capítulo es presentar las definiciones, orígenes y efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.

En la actualidad los sistemas eléctricos presentes en todas las instalaciones industriales, comerciales y residenciales cuentan, cada vez con más frecuencia con equipos de electrónica de potencia. Estos elementos, llamados no lineales, producen a partir de onda sinusoidales con la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias generando el fenómeno conocido como armónicos. Una carga es considerada no lineal cuando la intensidad que circula por ella no tiene la misma forma sinusoidal que la tensión que la alimenta.

Dado que este tipo de cargas son cada vez más comunes, y a que los armónicos son un fenómeno que genera problemas a los usuarios y a las entidades suministradoras, surge la necesidad de comprender su origen y efectos perjudiciales producidos a los equipos conectados a la red.

6.4.1. Definición de armónicos

Se define como armónico a una componente sinusoidal de una señal periódica que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Se dice que una onda periódica tiene contenido armónico en los casos en los que no adopta una forma sinusoidal. Esto puede modificar su valor pico y/o valor RMS produciendo alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que se encuentren sometidos a esta tensión.

Mediante el teorema de Fourier se puede demostrar que cualquier función periódica no sinusoidal puede ser representada como suma de varios términos, compuesta por:

- Un término sinusoidal de frecuencia fundamental.
- Armónicos cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental.
- En algunos casos una componente de C.C.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(nx + \varphi_n) \quad (1)$$

Donde $f(x)$ es la función genérica de la forma de onda y los demás coeficientes se calculan de la forma siguiente:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad (4)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (6)$$

Los armónicos se pueden clasificar mediante tres parámetros que describen perfectamente su función correspondiente, estos son el orden, la frecuencia y la secuencia.

- El orden (n) determina el número de veces que la frecuencia de un armónico es mayor que la fundamental, esto es, la relación que hay entre la frecuencia del armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_{50}), en el caso de España su valor es de 50 Hz:

$$n = \frac{f_n}{f_{50}} \quad (7)$$

- La frecuencia del armónico es el resultado de multiplicar la frecuencia fundamental por el número de orden correspondiente, por ejemplo:

$$3^{\circ} \text{ Armónico } 3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$$

$$5^{\circ} \text{ Armónico } 5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$$

$$7^{\circ} \text{ Armónico } 7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz}$$

Normalmente en las instalaciones industriales y domésticas únicamente aparecen armónicos de orden impar, ya que los de orden par son producto de asimetrías en la red eléctrica.

- Los armónicos tienen diferentes secuencias de fase, estas pueden ser positivas, negativas o de secuencia cero u homopolar en función de su relación con la secuencia fundamental.

Las componentes homopolares, al ser su frecuencia múltiplo de la fundamental, circulan por el neutro, aumentando la intensidad respecto a las fases, con el consiguiente calentamiento.

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0
...
n	50·n	...

Tabla 1 - Secuencias de los armónicos.

En la siguiente figura puede observarse la descomposición de una señal de intensidad afectada por armónicos en sus respectivas componentes:

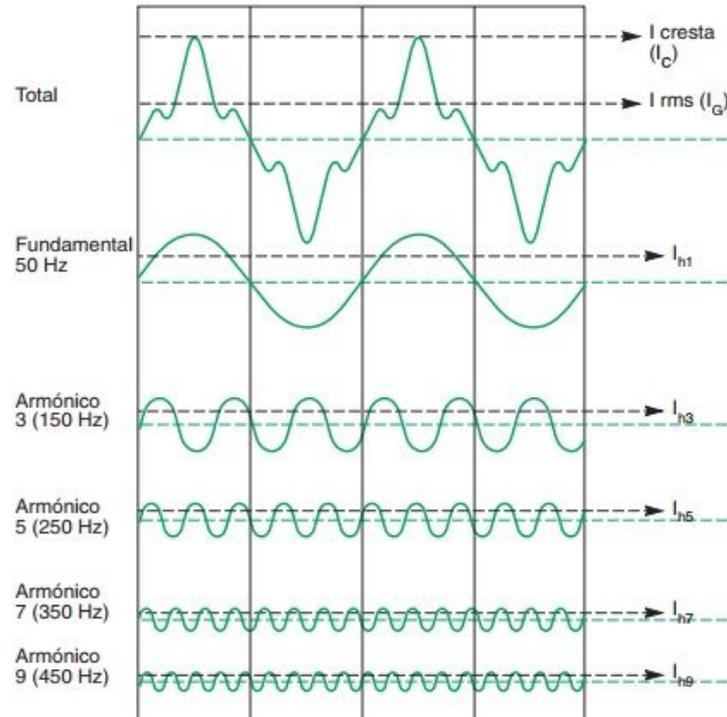


Figura 6.4.1. – Señal de intensidad descompuesta en sus componentes.[11]

6.4.2. El espectro de frecuencia

El espectro de frecuencia es un histograma muy práctico que muestra la representación de los armónicos que componen una señal periódica en el dominio de la frecuencia. El espectro muestra los armónicos presentes en la señal, así como su importancia relativa en porcentaje.

La figura siguiente muestra el espectro en frecuencia de la señal representada en la figura 6.4.1.

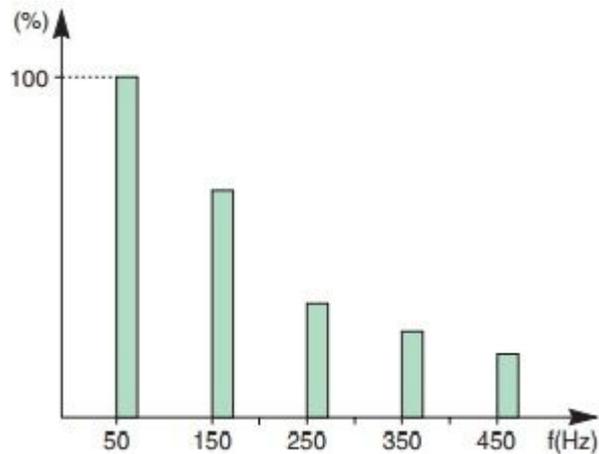


Figura 6.4.2. - Espectro de la señal que se compone de 50 Hz fundamental y los armónicos 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) y 9 (450 Hz). [11]

6.4.3. Parámetros característicos de los armónicos

A continuación, se detallan algunos de los parámetros característicos y relaciones fundamentales que se utilizan en el análisis de armónicos.

- Frecuencia fundamental (f_1): Frecuencia de onda de la red eléctrica (50Hz).
- Orden del armónico (n): Relación de la frecuencia del armónico entre la frecuencia fundamental.
- Componente fundamental (U_1 o I_1): Componente sinusoidal de orden uno, del desarrollo en serie de Fourier, de frecuencia fundamental.
- Componente armónica (U_n o I_n): Componente sinusoidal de orden superior a la fundamental de la serie de Fourier.
- Tasa de distorsión individual ($HD(U)$ o $HD(I)\%$): Relación en tanto por ciento de la componente armónica entre la componente fundamental.

$$HD(U)\% = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \quad (8)$$

$$HD(I)\% = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \quad (9)$$

- Valor eficaz total (TRMS): Raíz cuadrada de la suma de todas las componentes de la onda.

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^n U_h^2} \quad (10)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (11)$$

- Factor de pico: Relación del valor máximo de la onda entre el valor eficaz.

$$f_p = \frac{X_{max}}{X_{rms}} \quad (12)$$

- Tasa de distorsión armónica (THD): Relación del valor eficaz total del residuo armónico entre el valor de la componente fundamental.

$$THD(U)\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (13)$$

$$THD(I)\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (14)$$

La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa, se expresa generalmente en porcentaje y su valor puede ser superior a uno. Proporciona un valor que indica la distorsión de tensión o intensidad que se tiene en un punto de la red. Según la norma CEI 61000-2-2, h se puede limitar a 50.

6.4.4. Origen de los armónicos

El origen de los armónicos se encuentra en su mayor parte en las cargas no lineales, que son aquellas en las que la intensidad que circula por ellas no tiene la misma forma sinusoidal que la tensión que las alimenta. Estas cargas no lineales son típicamente elementos de electrónica de potencia. Sin embargo, otros elementos que son cargas lineales también pueden ser fuente de armónicos.

Los motores y generadores eléctricos, así como los transformadores no suelen causar grandes distorsiones, salvo cuando se producen sobretensiones o durante transitorios. Las principales fuentes de armónicos son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º, ...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de: 20% del 3er armónico, 10% del 5º, 6% del 7º y 3% del 9º.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.
- La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

6.4.5. Efectos de los armónicos

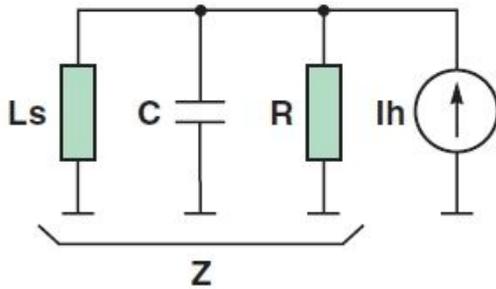
Una vez explicado el origen de los armónicos, es conveniente realizar una breve exposición de los principales efectos que producen en el sistema eléctrico. Aunque puede resultar difícil cuantificar los efectos producidos, debido a que dependen de muchos factores, algunos de los más notables pueden ser observados al producirse un aumento en el número de fusibles fundidos que protegen condensadores, sobrecalentamiento y vibraciones en transformadores y motores eléctricos, mayor intensidad circulando por el neutro y operación incorrecta de contactores y relés. Se pueden resumir los efectos causados por los armónicos en los siguientes:

- La resonancia armónica genera una amplificación de los armónicos, lo que produce un deterioro de los equipos del sistema de potencia y su fiabilidad.

La utilización de dispositivos tanto capacitivos como inductivos en sistemas de distribución provoca el fenómeno de la resonancia, teniendo como resultado valores extremadamente altos o bajos de impedancia. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en el sistema de distribución.

Se considera el diagrama simplificado de abajo, donde se muestra una instalación constituida por:

- Un transformador que suministra potencia,
- Cargas lineales,
- Cargas no-lineales generadoras de corrientes armónicas,
- Condensadores de compensación.



L_s: inductancia suministrada (sistema de distribución + transformador + línea)
C: capacidad corrección factor de potencia
R: resistencia de las cargas lineales
I_h: corriente armónica

Figura 6.4.3. – Diagrama equivalente del sistema con resonancia. [11]

$$Z = \frac{jL_s\omega}{1 - L_sC\omega^2} \quad (15)$$

La resonancia se produce cuando el denominador $1 - L_sC\omega^2$ se aproxima a cero. La frecuencia correspondiente se denomina frecuencia de resonancia del circuito. A esta frecuencia, la impedancia tiene su valor máximo, teniendo como resultado un aumento considerable de la tensión de los armónicos y consecuentemente una mayor distorsión en la tensión. Esta distorsión en la tensión está acompañada por la circulación de corrientes armónicas en el circuito $L_s + C$ que son mayores que las corrientes armónicas inyectadas. [11]

El sistema de distribución y los condensadores de compensación están expuestos a corrientes armónicas considerables, teniendo como resultado el riesgo de sobrecargas.

- La existencia de armónicos en el sistema eléctrico genera sobrecalentamiento de los equipos, lo que produce una reducción del rendimiento al aumentar las pérdidas, principalmente en máquinas rotativas, transformadores y conductores eléctricos.

La potencia activa transmitida a una carga depende de la corriente fundamental. Cuando la corriente absorbida por la carga contiene armónicos, el valor eficaz de la corriente, I_{rms} , es superior al fundamental I_1 .

Con THD definida como:

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (16)$$

se puede deducir:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (17)$$

En la figura 4 se muestra, en función de la tasa de distorsión armónica:

- El aumento de la corriente eficaz I_{eff} para una carga que absorbe una corriente fundamental dada,
- El aumento de pérdidas Joule (P_{Joules}), sin tener en cuenta el efecto pelicular.

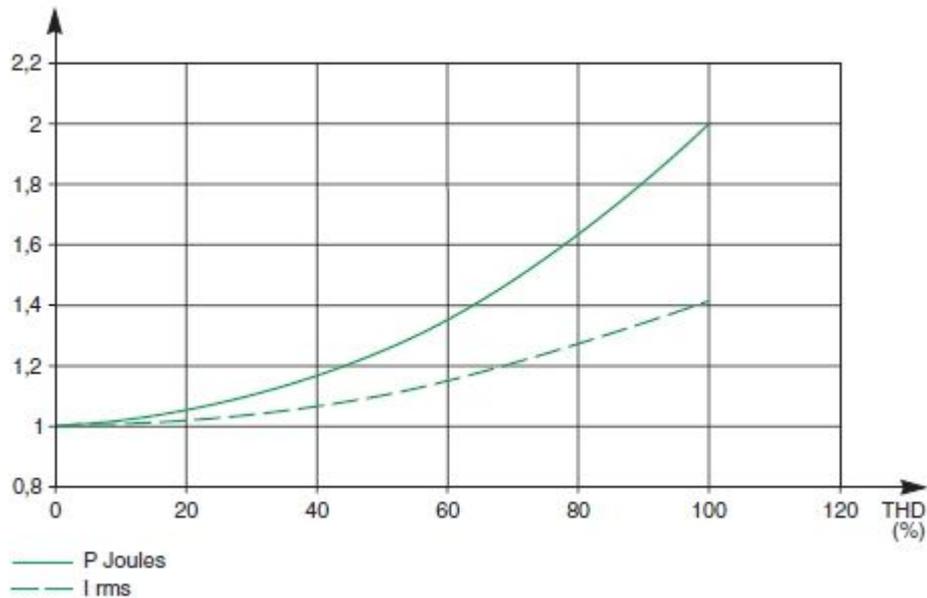


Figura 6.4.4. - Evolución de la corriente eficaz y de las pérdidas Joule en función del valor de la THD. [11]

Las corrientes armónicas provocan un aumento de las pérdidas Joule en todos los conductores por los que circulan y un aumento adicional en la temperatura de transformadores, equipos, cables, etc. Además de las pérdidas por efecto Joule en las bobinas de los transformadores también se producen pérdidas del hierro debidas a las corrientes de Foucault.

Las tensiones armónicas aplicadas sobre máquinas asíncronas provocan la circulación de corrientes de frecuencias superiores a 50 Hz en el rotor. Estas corrientes provocan pérdidas adicionales proporcionales a

$$\frac{U_h^2}{h} \quad (18)$$

En el caso de los condensadores provocan la circulación de corrientes proporcionales a la frecuencia de los armónicos. Estas corrientes causan pérdidas suplementarias.

- La sobreintensidad resultado de los armónicos produce un envejecimiento prematuro del aislamiento de los equipos, reduciendo su vida útil. Tal es así que un aumento de 10 °C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor por más de una hora, disminuye a la mitad su vida útil.[11]

Cuando la distorsión de la tensión de alimentación es de aproximadamente el 10%, el tiempo de vida de los equipos se reduce significativamente. Dependiendo del tipo de aparato, la reducción en el tiempo de vida se puede estimar como:

- 32.5% para las máquinas monofásicas,
- 18% para las máquinas trifásicas,
- 5% para los transformadores.

Para mantener el tiempo de vida que corresponde a una tensión de alimentación normal, los aparatos deben ser sobredimensionados. [11]

- Se producen fallos de los componentes del sistema como la operación prematura de dispositivos de protección, dificultad en los arranques o fallos de sincronización en variadores de velocidad.

Los interruptores de una instalación están sometidos a picos de corrientes causados por armónicos. Estos picos de corriente causan desconexiones indeseadas que implican pérdidas en la producción, así como los costes correspondientes al tiempo requerido para volver a poner en marcha la instalación. [11]

6.5. El motor de inducción

En este apartado se describe brevemente al motor de inducción, explicando tanto sus características constructivas como sus principios de funcionamiento. Los motores asíncronos o de inducción son ampliamente utilizados en las instalaciones industriales, suponiendo aproximadamente el 85 % del total de los motores eléctricos.

Son utilizados para proporcionar potencia mecánica en el accionamiento de todo tipo de máquinas rotativas: bombas, ventiladores, soplantes, máquinas-herramienta, molinos, etc. Su uso generalizado se debe a su simplicidad constructiva que las hace más simples, económicas y robustas que otros tipos de máquinas eléctricas rotativas.

6.5.1. Definición y principio de funcionamiento

Las máquinas asíncronas o de inducción presentan en el estator un devanado polifásico alimentado mediante un sistema polifásico de tensiones, el cual genera un campo giratorio. El rotor, parte móvil de la máquina, está formado por un conjunto de espiras en cortocircuito. Puesto que el estator crea un campo giratorio, el flujo abarcado por las espiras del rotor será variable y, por tanto, en él se inducirá fuerza electromotriz tal y como indica la ley de Lenz.[12]

Al estar las espiras del rotor en cortocircuito, la fuerza electromotriz inducida provocará la circulación de corriente por ellas. Entonces, la presencia de conductores atravesados por corriente eléctrica en el seno de un campo magnético dará lugar a la aparición de una fuerza tangencial sobre cada espira del rotor que responderá a la ley de Biot y Savart:

$$d\vec{F} = i \cdot [d\vec{l} \wedge \vec{B}] \quad (19)$$

Puesto que según la ley de Lenz la fuerza electromotriz inducida debe oponerse a las variaciones del flujo que la crea, la circulación de las corrientes será tal que trate de hacer girar al rotor en el mismo sentido que el campo giratorio ya que, de este modo, se reduce la variación del flujo abarcado por las espiras del primero. Es decir, la fuerza expresada en la ecuación anterior producirá un par motor, incluso cuando la máquina esté inicialmente parada.[12]

Según el principio de funcionamiento expuesto, la máquina de inducción siempre girará a una velocidad inferior a la del campo giratorio, ya que, si ambas velocidades llegasen a igualarse, desaparecería la fuerza electromotriz inducida y, por tanto, el par motor. Por este motivo, también se denominan máquinas asíncronas. A la velocidad de giro del campo se la llama velocidad de sincronismo y sólo depende de la frecuencia de las corrientes de alimentación y del número de polos del motor. [12]

La velocidad de giro nominal de un motor de inducción suele estar comprendida entre el 92 y el 99% de la velocidad de sincronismo. Una manera habitual de expresar la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la de giro es utilizar el concepto de deslizamiento, definido de la siguiente forma:

$$\text{Deslizamiento} = s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (20)$$

Siendo n_s la velocidad de sincronismo y n la velocidad real. Este parámetro normalmente se expresa en forma de porcentaje, así pues, un deslizamiento del 4%, por ejemplo, correspondería a una velocidad de giro que fuese el 96% de la de sincronismo. [12]

El circuito equivalente de una máquina asíncrona es simple, y permite calcular con gran facilidad la ecuación que rige el comportamiento de este tipo de motor. En la siguiente figura se muestra una representación esquemática del circuito equivalente de un motor asíncrono.

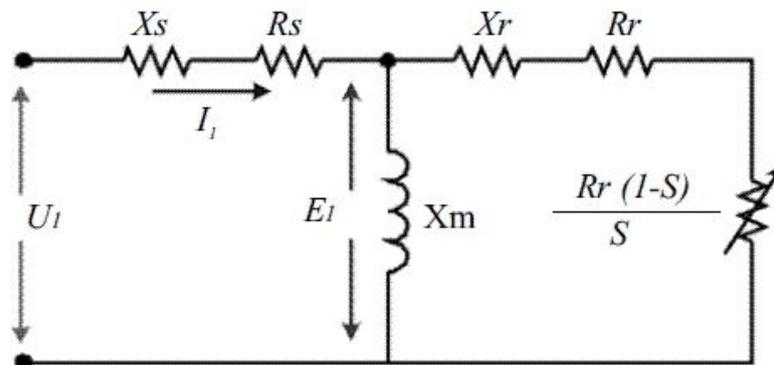


Figura 6.5.1. – Circuito equivalente de un motor de inducción. [12]

La ecuación fasorial que conforme al circuito anterior determina el comportamiento del motor se puede expresar de la siguiente forma:

$$U_1 = E_1 + R_s \cdot I_1 + jX_s \cdot I_1 \quad (21)$$

Siendo:

- U_1 : Tensión entre terminales del estator.

- E_1 : Fuerza contraelectromotriz generada por el flujo resultante que atraviesa los devanados de la máquina.
- I_1 : Corriente estatórica.
- R_s : Resistencia del estator.
- X_s : Reactancia de dispersión del estator.

Con respecto a esta última expresión hay que indicar que las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia son pequeñas, en funcionamiento nominal, que E_1 puede considerarse igual a U_1 .

6.5.2. Características constructivas

El motor trifásico de inducción, como todas las máquinas eléctricas, consta de dos partes bien diferenciadas como son la parte fija o estator y la parte giratoria o rotor. Ambas se encuentran separadas por un pequeño espacio libre que recibe el nombre de entrehierro, y que permite el libre giro del rotor en el interior de la máquina. El estator está formado por un núcleo de chapas magnéticas aisladas y apiladas, con un devanado trifásico situado en unas ranuras practicadas en la superficie interior. En máquinas de baja tensión y potencias no muy elevadas este devanado está fabricado con hilo de cobre esmaltado. En grandes máquinas de media tensión suele ser de pletina de cobre aislada con aislamientos de tipo mica-epoxy. En la figura 6.5.2 se puede observar la foto de un motor al que se le ha extraído el rotor. Se puede observar el devanado estatórico y las ranuras del núcleo magnético.[12]

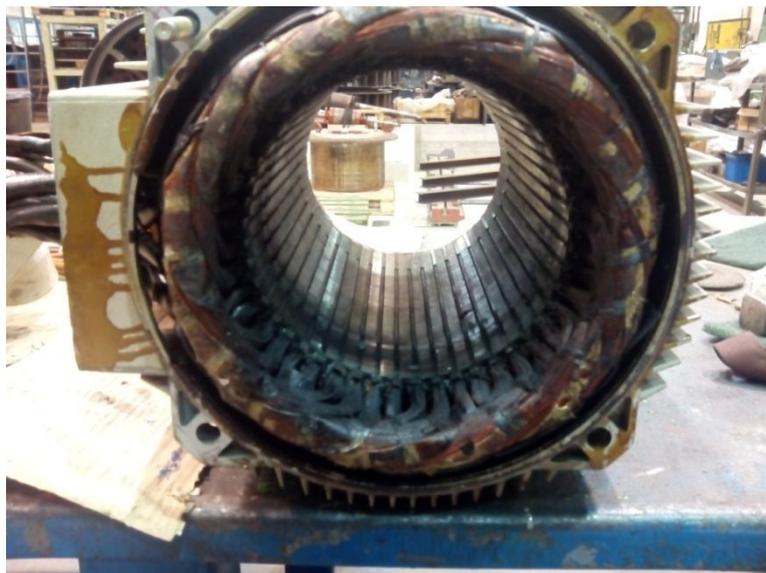


Figura 6.5.2. – Detalle del devanado estatórico de un motor de inducción.

El rotor se construye de manera semejante, si bien, en vez de ser un cilindro hueco ranurado interiormente, es un cilindro macizo ranurado por el exterior. Existen, básicamente, dos ejecuciones posibles para el rotor: jaula de ardilla y rotor bobinado o de anillos rozantes. En el primero se emplean unos conductores uniformemente distribuidos por las ranuras periféricas del rotor, normalmente barras de cobre o de aluminio desnudas, cuyos extremos se cortocircuitan por medio de unos anillos denominados anillos de cortocircuito. La variedad en el diseño de estas jaulas es grande, dependiendo principalmente de las características de arranque deseadas para el motor.[12]

El rotor bobinado, sin embargo, está formado por un devanado trifásico similar al estatórico. Las tres fases se suelen conectar en estrella y los terminales libres se conectan a unos anillos aislados entre sí y del eje, sobre los que deslizan unas escobillas. Este segundo tipo de rotor es mucho menos frecuente que el primero y suele ser exclusivo de motores de una gran potencia y tamaño, en los que la corriente de arranque se modifica mediante la variación de la resistencia rotórica R_r desde el exterior. Para ello a los anillos de cortocircuito se conectan resistencias que se varían durante el arranque de la máquina para conseguir pares de arranque elevados. En la figura 6.5.3. se puede observar un rotor de jaula de un motor de inducción de gran tamaño en el momento de ser introducido en el estator.



Figura 6.5.3. – Colocación del rotor en el estator de un motor de inducción.

El motor, para su conexión con la red eléctrica, dispone de una caja en la que se encuentran los terminales que irán conectados a la red trifásica. Esta caja, por lo general, presenta seis terminales unidos directamente a los dos extremos de cada una de las fases del devanado estático. Dichos terminales reciben denominaciones normalizadas: los principios de fase con las letras U_1 , V_1 y W_1 (antes U, V y W) y los finales U_2 , V_2 y W_2 (antes X, Y, y Z).

Hay que hacer notar que los finales de cada fase no se alinean con los principios con objeto de que sea fácil la realización de las conexiones estrella y triángulo mediante el empleo de pletinas de cobre normalizadas. En la figura 6.5.4. se muestra un esquema de la caja de conexiones del motor, así como las dos formas posibles de conexión en estrella y triángulo. [12]

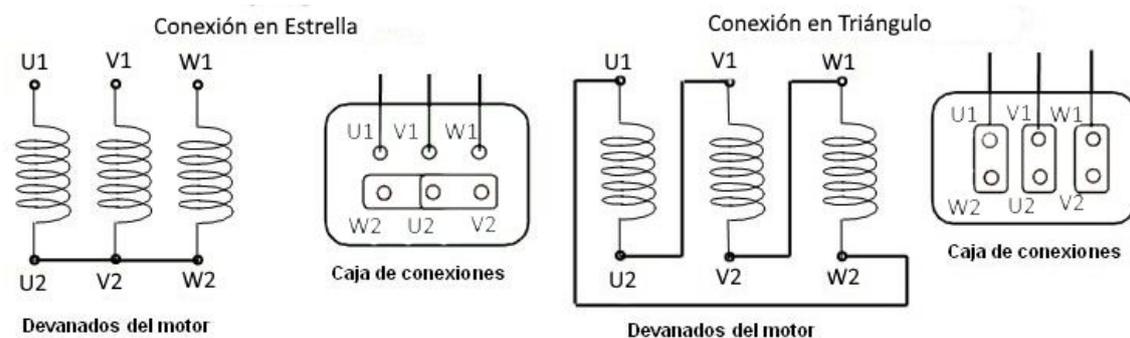


Figura 6.5.4. – Conexionado externo de los motores de inducción.

Como se puede observar en dicha figura, existen dos posibilidades que permiten conectar los devanados en estrella y en triángulo, según cuál de las dos posibilidades se escoja será posible alimentar el motor con dos tensiones diferentes: si se conecta en triángulo, la tensión de línea de la alimentación se aplicará íntegramente al devanado, mientras que en la conexión estrella es sólo la tensión de fase (1,73 veces menor) la que se aplica al mismo. En este último caso, para una potencia determinada, la corriente absorbida por el motor será 1,73 veces menor que la absorbida para la conexión en triángulo. [12]

6.5.3. Curvas características de comportamiento

De todas las funciones que representan las variables de un motor eléctrico, sin duda, es la característica mecánica el dato que más y mejor información aporta sobre su comportamiento. Consiste en la representación de la curva *Par-Velocidad*, cuando la máquina está alimentada a su tensión y frecuencia nominales. En la figura siguiente se presenta la característica mecánica de un motor de inducción en la que se han señalado los puntos más significativos y las tres posibles zonas de trabajo. En ella se puede apreciar como los puntos de mayor interés son los siguientes:

- Par de arranque: par que desarrolla el motor con velocidad nula.
- Par máximo: el mayor que podrá desarrollar el motor.
- Par nominal: el desarrollado a la velocidad nominal.

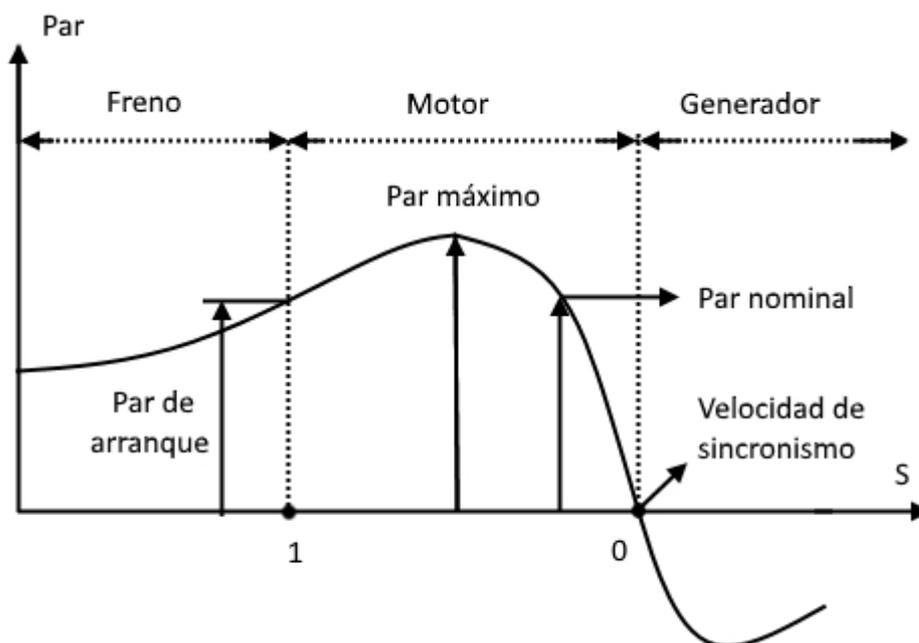


Figura 6.5.5. – Curva Par-Velocidad de un motor de inducción.

La máquina asíncrona cuando trabaja lo hace, en general, en las proximidades del punto de funcionamiento nominal, que siempre está a la derecha del punto de par máximo. Para velocidades superiores a la de sincronismo, la máquina se encuentra en funcionamiento como generador. Como se puede apreciar en la figura 6.5.5., en este caso el par es negativo, es decir tomará la potencia mecánica de una fuente externa a través del eje. [12]

La máquina asíncrona necesita una aportación de energía reactiva externa para poder trabajar como generador. Esta aportación de energía reactiva puede provenir de la propia red eléctrica, cuando el generador se encuentra conectado a ella, o de una batería de condensadores cuando la máquina funciona aislada. En cualquiera de los dos casos, este tipo de generador presenta como particularidad su capacidad para producir energía eléctrica con una cierta independencia de su velocidad de giro, lo que hace que sea el más utilizado en instalaciones donde la energía eólica es la fuente primaria empleada.

Es interesante señalar que la relación que existe entre el par suministrado por el motor y la tensión a la que está alimentado es cuadrática, es decir, cuando se reduce la tensión de alimentación, el par se reduce con el cuadrado de la misma, de forma que, si el motor se alimenta, por ejemplo, con un 70% de la tensión nominal, los pares son a cada velocidad la mitad de los obtenidos a la tensión nominal. [12]

Por otro lado, si se varía la resistencia rotórica R_r , el máximo de la curva se desplaza paralelamente hacia la izquierda, produciéndose el par máximo a velocidades mucho menores. Este hecho permite gobernar el arranque en los motores de rotor bobinado mediante la inserción de resistencias entre los anillos de cortocircuito. En el caso de los rotores de jaula, es la propia geometría de la jaula; en particular la forma y sección de las barras, el parámetro que permite modificar la característica mecánica del motor obteniendo diferentes pares de arranque.

6.6. Fallos característicos del motor de inducción

El motor de jaula de ardilla presenta grandes ventajas como la de ser un motor de construcción simple, robusta, de bajo coste y que requiere un mantenimiento mucho menor que cualquier otra máquina rotativa al carecer de escobillas.

No obstante, no se puede decir que el motor de inducción no sufra averías, siendo su causa más habitual la aparición de esfuerzos que superen los valores máximos para los cuales ha sido diseñado. En principio si estos esfuerzos se encuentran dentro de las características de diseño impuestas por el fabricante y su uso y mantenimiento del mismo se realiza según lo establecido en su manual de uso, no debería aparecer ningún fallo. Pero se tiene que tener en cuenta que, si uno de estos esfuerzos supera los valores de diseño, la vida útil del motor se reducirá de forma drástica, pudiendo llegar a producirse una avería catastrófica. Por esto es muy importante el diagnóstico preventivo en este tipo de motores. [13].

En este apartado se estudiará qué tipo de esfuerzos van a afectar de manera más grave al rotor o estator del motor de inducción, así como los fallos y/o defectos que tanto individualmente como en conjunto causan los esfuerzos que sufre el motor. [14].

6.6.1. Fallos en el estator

La mayoría de los fallos en motores eléctricos pueden ser clasificados en dos grupos: fallos de aislamiento y fallos mecánicos. Los fallos de aislamiento son caracterizados por dañar las espiras del estator, y los fallos mecánicos en su mayoría están asociados a daños en el rotor o componentes relacionados al mismo. [13]

En el sistema aislante del estator es donde se producen la mayor parte de los fallos y generalmente son debidos a la combinación de distintos esfuerzos. A continuación, se presentan los fallos que pueden afectar al estator del motor y una clasificación de los esfuerzos que los originan.

Fallo en el núcleo magnético

El núcleo magnético se encuentra formado por un conjunto de láminas magnéticas separadas entre sí por un aislante. La degradación de este aislante provoca corrientes interlaminares que conllevan un sobrecalentamiento localizado, que a su vez puede causar el deterioro del aislamiento de los devanados del estator. [13]

Las causas que provocan estas corrientes interlaminares pueden ser diversas:

- Un incorrecto montaje de las láminas.
- La intrusión de algún objeto extraño durante el montaje que pueda causar la erosión del material.
- La vibración que puede afectar al aislamiento de los pernos de apriete del núcleo, permitiendo que algún contacto eléctrico pueda cerrar el circuito, originándose corrientes parásitas en el núcleo, dando lugar a calentamientos globales y posible degradación del aislamiento entre chapas.

Fallo en el aislamiento del devanado del estator

La mayoría de los fallos en el estator, se dan en el aislamiento. Estos fallos surgen como consecuencia de la exposición de los mismos a esfuerzos de diversa índole e inclusive actuando al mismo tiempo. Dentro de este tipo de fallos se pueden hacer una distinción según las consecuencias que acarreen. En la tabla se muestra esta distinción.[13]

Tipo de fallo	Consecuencia
Cortocircuito entre espiras	El motor puede continuar en servicio por tiempo limitado
Cortocircuito entre bobinas de la misma fase	El motor puede continuar en servicio por tiempo limitado
Cortocircuito entre fases	Fallo del motor. El equipo de protección actúa y desconecta el motor
Derivación de fase a masa	Fallo del motor. El equipo de protección actúa y desconecta el motor.
Circuito abierto en una fase	El motor puede seguir funcionando, dependiendo de la carga y del circuito de protección.

Tabla 2 – Tipos de fallos y consecuencias en los motores eléctricos.[13]

Esfuerzos térmicos

Los materiales aislantes eléctricos presentan una temperatura límite de funcionamiento, por encima de la cual empiezan a experimentar una pérdida importante de sus propiedades. La temperatura máxima de servicio es una característica propia de cada sistema aislante y sirve de base para establecer la clasificación de los mismos. La tabla muestra las clases térmicas de los sistemas aislantes según la norma UNE 21-305-90 (Correspondiente a la CEI 60085).[13]

Clase de aislamiento	A	E	B	F	H	200	220	250
Temperatura máxima (°C)	105	120	130	155	180	200	220	250

Tabla 3 – Clases térmicas de los sistemas aislantes.[13]

Para la aplicación de estas tablas a los motores eléctricos, debe de tenerse en cuenta que el punto más caliente del motor debe ser mantenido a temperatura inferior del límite de la clase. La temperatura total será la suma de la temperatura ambiente con el incremento de temperatura que se produce como consecuencia del funcionamiento de la máquina más la diferencia de temperatura entre la temperatura media del bobinado y la temperatura del punto más caliente de la máquina.[13]

A continuación, la clasificación de estos esfuerzos térmicos:

- Sobrecarga térmica

Como consecuencia de ello, la vida del aislante se reduce considerablemente. Existen diversas causas que pueden provocar el sobrecalentamiento:

- Una temperatura de ambiente alta.
- Una deficiente refrigeración o ventilación.
- La variación de la tensión de alimentación.
- El desequilibrio de las fases de alimentación.
- Arranques.
- Aumento del par resistente.

- Dilatación térmica

Los diferentes coeficientes de dilatación térmicos del conductor y de los distintos materiales de los que se compone el aislante, pueden provocar con incrementos de temperatura, el deslizamiento de unas capas con otras, llegando inclusive, a la rotura de las láminas del aislante por la excesiva tensión mecánica soportada. Además, el deslizamiento entre el conductor y el aislante puede causar la aparición de bolsas de aire donde se produzcan pequeñas descargas que puedan dañar el aislante.[13]

- Envejecimiento térmico

El envejecimiento de los aislantes es provocado por varios factores, pero el más importante, es el térmico. Se dice que según la ley de Montsinger, un incremento de temperatura de 10°C en la temperatura de trabajo, puede llegar a reducir a la mitad la vida del aislamiento. Del mismo modo, la reducción de la temperatura de trabajo aumenta la vida del aislamiento.

Esfuerzos mecánicos

De entre los múltiples esfuerzos de origen mecánico a que puede verse sometido el motor, se consideran los siguientes:

- Movimiento de las bobinas

En las máquinas eléctricas de media y alta tensión, las elevadas intensidades que se producen en los arranques, conmutaciones o cortocircuitos exteriores originan grandes fuerzas electromagnéticas sobre las bobinas. Estos esfuerzos dan lugar a que el aislamiento pueda sufrir desde pequeñas fracturas a rupturas mecánicas importantes y son más acusados en motores de elevada velocidad y en aquellos que tienen bobinas de gran longitud.[13]

- Roces entre estator y rotor

Pueden ser debidos a diversas razones entre ellas las más comunes son: el desalineamiento entre rotor y estator, el fallo en los rodamientos, el desequilibrio del campo magnético y el eje doblado.

- Fatiga producida por vibraciones

En todas las máquinas eléctricas en funcionamiento, las vibraciones están presentes en mayor o menor grado, produciendo la separación y rotura de las láminas de mica que forman parte del aislante. En caso de mala sujeción, las bobinas pueden verse afectadas por vibraciones que las someten a rozamientos con otros elementos de la máquina, dañando el aislamiento y reduciendo su espesor.

- Introducción de objetos extraños

La introducción de forma accidental de objetos extraños en el entrehierro afecta tanto al estator como al rotor. Debido al roce con estos cuerpos extraños, el aislamiento puede resultar fuertemente dañado produciéndose averías que afectan además de al propio aislamiento, al cobre de las bobinas, barras o anillos de cortocircuito y chapas del núcleo magnético.[13]

Esfuerzos eléctricos

Los factores de influencia de origen eléctrico pueden producir los siguientes tipos de problemas:

- Descargas parciales

En el proceso de fabricación del aislamiento, aparecen microburbujas de aire como consecuencia de la evaporación de los componentes volátiles del aislante, debido a diversas razones como son, un proceso de impregnación defectuoso, la pérdida de capacidad del aislante o su deslaminación. Cuando en estas microburbujas, la acción del campo eléctrico del conductor supera la rigidez dieléctrica del aire, aparecen pequeñas descargas. Estas descargas parciales causan la degradación de las sustancias del aislamiento en las paredes de las microburbujas. La acción continuada de estas descargas puede llegar a perforar el aislamiento. [13]

- Efecto tracking

La humedad, el polvo, la suciedad, dicho de otro modo, la contaminación provoca la aparición de sendas o caminos superficiales paralelos por donde puede circular la corriente hacia masa. Esta circulación de corriente causa la aparición de puntos calientes que degradan el aislamiento paulatinamente. El problema se localiza principalmente en las cabezas de las bobinas.

- Efecto corona

Consiste en la ionización del aire que rodea a los bobinados. Aparece cuando el gradiente de tensión entre el conductor y el aire de su entorno supera el valor de rigidez dieléctrica del aire. En condiciones normales de presión y temperatura, la tensión crítica disruptiva a partir de la cual aparece el efecto corona es de 21 kV/cm. Este fenómeno se manifiesta en forma de crepitación sonora o zumbido, y en una corona violácea que rodea al conductor en los casos que se alcanza una determinada tensión crítica visual. Si se lleva este efecto a los motores de inducción, las zonas críticas son las cabezas de las bobinas y las zonas donde se separan estas del núcleo magnético, produciéndose distorsiones en el campo. Para impedir que surja el efecto corona, lo que se hace es asegurar la uniformidad del campo por medio de pinturas semiconductoras (normalmente de grafito) aplicadas en la superficie exterior de las bobinas. [13]

- Transitorios eléctricos

Los transitorios son sobretensiones producidas en un breve espacio de tiempo que pueden dañar el aislamiento. Estos aparecen como consecuencia de faltas entre fase y masa, faltas entre fases, faltas trifásicas, reencendidos repetitivos, acción de fusibles, apertura y cierre de interruptores, descargas eléctricas naturales, períodos de conmutación...

- Histéresis dieléctrica

La histéresis dieléctrica contribuye a que aparezcan unas pérdidas en el aislamiento en forma de calor. Cuando el calor generado es mayor que el calor disipado, ya bien sea por el aumento de las pérdidas eléctricas o por la disminución de la conductividad térmica del aislante, se produce un aumento localizado de la temperatura que puede llegar a perforar el aislante.

Esfuerzos de origen ambiental

Los esfuerzos ambientales a los que los motores se encuentran sometidos durante su funcionamiento son muy variados y dependen fundamentalmente del tipo de aplicación.

- Contaminación

Las partículas de polvo conducidas a través del conducto de ventilación, el agua, el aceite y sus vapores condensados sobre las superficies de los aislamientos, provocan que con el paso del tiempo se genere una capa de suciedad capaz de impedir la disipación de calor, al mismo tiempo que crea vías de escape para la corriente. La deficiente disipación de calor provoca aumentos de temperatura localizados en el aislamiento que reducen considerablemente la vida del mismo, llegando inclusive a la ruptura, lo que podría causar derivaciones a masa. Además de todas estas consecuencias, los contaminantes pueden degradar también la grasa de los rodamientos. [13]

- Condensación

Las partículas de polvo conducidas a través del conducto de ventilación, el agua, el aceite y sus vapores condensados sobre las superficies de los aislamientos, provocan que con el paso del tiempo se genere una capa de suciedad capaz de impedir la disipación de calor, al mismo tiempo que crea vías de escape para la corriente. La deficiente disipación de calor provoca aumentos de temperatura localizados en el aislamiento que reducen considerablemente la vida del mismo, llegando inclusive a la ruptura, lo que podría causar derivaciones a masa. Además de todas estas consecuencias, los contaminantes pueden degradar también la grasa de los rodamientos.

- Funcionamiento en altitud elevada

Los motores están diseñados para trabajar a la potencia nominal a una altitud inferior a los 1000 m y en un rango de temperaturas comprendido entre -15°C y 40°C , según indica la norma CEI 60034-1. Trabajar por encima de 1000 m conlleva un aumento de las temperaturas de trabajo debido al enrarecimiento del aire que causa la reducción de la vida del aislamiento. Es por ello que los fabricantes establecen tablas donde se indica el porcentaje de reducción de potencia en función de la temperatura ambiente y la altitud. [13]

- Temperatura ambiente muy elevada o muy baja

Cuando la temperatura ambiente es superior a 40°C y la máquina funciona a su potencia nominal, hay un aumento de calor en los devanados que provoca la disminución de la vida del aislamiento. Debido a ello, el fabricante proporciona

el porcentaje de potencia nominal al que debe funcionar para evitar reducciones drásticas en la vida de los aislamientos de la máquina.

En el caso contrario, cuando la temperatura ambiente es inferior a -15°C existen problemas de condensación, siendo necesaria la implementación de algún tipo de sistema de drenaje que elimine el agua condensada. Además, pueden ser necesarios lubricantes especiales para los rodamientos.

6.6.2. Fallos en el rotor

En el rotor de jaula de ardilla los problemas que ocurren suelen estar relacionados con las grandes temperaturas alcanzadas y las grandes cargas centrífugas que se producen en el final de las barras o a la salida de éstas del paquete rotórico, en su conexión con el anillo de cortocircuito, particularmente durante los arranques y cambios de régimen de funcionamiento del motor.[13]

El origen de tales efectos puede provenir de la elección incorrecta de los materiales que forman la jaula, la deficiente manufactura de la jaula, durante los procesos de fundición de la matriz de los rotores o por malas uniones entre las barras de la jaula y el anillo de cortocircuito. [13]

En motores de rotor bobinado, el diseño de las bobinas es similar al de las bobinas del estator y sus problemas semejantes, añadiendo, además, los inconvenientes que las fuerzas centrífugas pueden provocar sobre los finales de las bobinas.

Los grandes esfuerzos mecánicos que tienen lugar en los rotores pueden ser causa de problemas en el paquete magnético además de en sus barras o bobinas. La propagación del agrietamiento desde la superficie del rotor, debido a importantes ciclos de carga, bajo la acción de su propio peso durante la rotación, puede originar fallos catastróficos en el mismo. Esta acción es amplificada si la refrigeración contiene humedad u otras impurezas que faciliten la corrosión y contribuyen a disminuir la resistencia del material del rotor hasta producir fallos por fatiga. También el excesivo calentamiento del rotor se suma a la debilitación del material, particularmente en grandes generadores donde las corrientes parásitas, debidas a secuencias negativas en la alimentación, inducen corrientes en el rotor que producen pérdidas indeseables.[13]

A continuación, se muestra una clasificación de estos esfuerzos y diferentes formas en que los mismos pueden presentarse.

Esfuerzos térmicos

Pueden ser de diversos tipos y la presencia de una determinada forma de sollicitación puede motivar la posterior aparición de otras. Se establece la siguiente clasificación para las mismas:

- Sobrecarga térmica

Las sobrecargas térmicas pueden provocar fallos en el rotor. Existen diversas causas que pueden provocar el sobrecalentamiento:

- Elevado número de arranques consecutivos que originan un aumento excesivo de la temperatura sobre las barras y el anillo de cortocircuito.
- Bloqueos del rotor debidos a cargas elevadas.
- Fallo en la aceleración del rotor debido a que el motor proporciona un par inadecuado para la carga accionada.
- El rotor roza con el estator debido a: elevada excentricidad, fallo de los rodamientos, campo magnético desequilibrado, excesiva vibración, etc.
- Barras rotas.
- Insuficiente ventilación.
- Desequilibrio de la tensión de alimentación.

- Desequilibrio térmico

Los desequilibrios térmicos pueden tener su razón en el diseño y fabricación del rotor, o bien, en la superación de las condiciones nominales. Las causas más frecuentes son:

- Frecuentes arranques que originan diferencias de temperatura en las barras debido al efecto pelicular.
- Desigual transferencia de calor entre zona de las barras y el núcleo del rotor.

- Pérdida de fijación entre el núcleo del rotor y el eje, debida por ejemplo a expansiones térmicas durante el arranque, causando vibración inestable.
- Puntos calientes en la superficie del rotor.
- Gradientes de temperatura que se producen por una desigual circulación del aire de ventilación.

Las consecuencias de la elevada temperatura en el rotor pueden ser la rotura de las barras, la rotura del anillo cortocircuitado o la separación de alguna barra respecto al anillo cortocircuitado.[13]

- Puntos calientes y pérdidas

Durante el proceso de fabricación existen diversas variables que no son posibles controlar y que pueden llevar a la formación de puntos calientes. Algunas de estas causas que se dan en la fabricación y diseño son:

- Chispas en las laminaciones en ranuras o superficies del rotor.
- Acortamiento irregular de las barras del rotor o de las láminas en el área de las ranuras
- Incorrecto apilado de las láminas o falta de simetría.
- Las barras están desigualmente sujetas en sus respectivas ranuras.
- Distribución no uniforme de pérdidas en el paquete.
- Diseño inadecuado de la laminación.
- Uniones deficientes entre los extremos de las barras y los anillos de cortocircuito.

Con el objetivo de detectar estos problemas existen controles y ensayos de calidad, aunque también es posible detectarlos en funcionamiento, por medio del análisis de la corriente, del espectro de vibración.

- Chispeos en el rotor

El chispeo puede ser de carácter no destructivo, ocurriendo inclusive en el régimen de funcionamiento nominal. Sin embargo, el chispeo preocupante ocurre durante el arranque, donde como consecuencia de la elevada corriente, se genera un circuito eléctrico con dos ramas en paralelo. La corriente no solo circulará por las barras, sino que una pequeña parte circulará por las láminas del núcleo magnético. Además, durante el arranque, la elevada frecuencia de la corriente del rotor provoca unas fuerzas magnéticas sobre las barras de forma radial causando la vibración de las mismas. Estas vibraciones pueden provocar el corte intermitente de la corriente en las barras debido a la aparición del arco eléctrico entre las láminas del núcleo y las barras. Las chispas que se observan en el entrehierro son partículas incandescentes del núcleo magnético o de las barras. Estas partículas si han sido producidas durante la fabricación o montaje es posible que dejen de aparecer tras varios ciclos de arranque. Por el contrario, si tienen su origen en el chispeo intermitente, éstas podrían mantenerse durante todo el ciclo de vida del motor.[13]

Esfuerzos electromagnéticos

Se puede distinguir entre el efecto electromagnético propiamente dicho, los esfuerzos originados por la presencia de campos magnéticos desequilibrados y los efectos debidos al ruido y vibración electromagnética:

- Efecto electromagnético

La acción del flujo magnético unido a la corriente que circula por las barras tiene como efecto la aparición de fuerzas electromagnéticas unidireccionales que son capaces de hacer vibrar las barras. Esta vibración genera sobre las barras unos esfuerzos continuados que pueden causar la rotura por fatiga de las barras. Si la vibración es excesiva, aparece el fenómeno del chispeo provocando la erosión del metal, aumentando el juego entre la barra y la ranura. Es importante resaltar que las mayores vibraciones se dan en el momento del arranque, como consecuencia del elevado valor de la corriente.

- Campos magnéticos desequilibrados

En un motor real, el rotor no se encuentra perfectamente centrado por diversas razones, como son el desgaste de los rodamientos, problemas de excentricidad, el peso elevado del rotor, etc. Cuando esto ocurre se va a tener dos zonas claramente diferenciadas, una primera, donde la distancia del

entrehierro entre rotor y estator es muy reducida y una segunda, donde la longitud del entrehierro es mucho mayor. En la zona de menor longitud de entrehierro, habrá menor reluctancia, por lo que circulará mayor flujo de campo magnético, por otra parte, en la zona de mayor longitud de entrehierro ocurre todo lo contrario, el flujo de campo magnético se reduce. Las consecuencias de ello son mayores fuerzas de atracción en el entrehierro menor y menores fuerzas en el entrehierro mayor. Dicho de otro modo, se tendrá un sistema desequilibrado de fuerzas que de forma continuada puede llegar a doblar el eje hasta el punto de llegar a tocarse estator y rotor. Normalmente para controlar que esto no ocurra, se impone como valores límites de excentricidad en el diseño, valores entre el 10% y el 20% de la longitud del entrehierro.[13]

- Ruido y vibración electromagnética

En las máquinas eléctricas, ciertos elementos que tienen por función principal la generación del campo electromagnético contribuyen con sus características y con las formas de funcionamiento, de forma desigual, a la generación de vibración y ruido, entre ellos: la configuración y disposición de los devanados de estator y rotor, las fluctuaciones de la permeancia en el entrehierro, los efectos de saturación, el ranurado y la excentricidad.

Esfuerzos dinámicos

Los esfuerzos de origen dinámico son provocados por el ciclo de trabajo al que el motor se encuentra sometido y por la carga accionada. Un diseño del motor conforme a la aplicación en que el motor va a ser utilizado debe permitir mantener controlados este tipo de esfuerzos. Se consideran los siguientes:

- Elevados pares de carácter transitorio

El eje del motor debe ser capaz de soportar pares muy elevados y de corta duración. Normalmente estos pares aparecen durante el arranque o por el bloqueo de accionamientos, o por el propio funcionamiento del inversor de alimentación.

- Fuerzas centrífugas

Los rotores están diseñados para no superar una determinada velocidad. Alcanzar ciertas velocidades puede provocar el desplazamiento del eje, de las chapas magnéticas y de la jaula. Para que esto no suceda existen sistemas de control de la velocidad, en aplicaciones como aerogeneradores.

- Esfuerzos cíclicos

El motor se ve sometido a esfuerzos cíclicos que pueden tener su origen en la propia naturaleza de la carga, en correas de transmisión sobretensadas, en la desalineación del eje, en la holgura de los rodamientos, etc.

Esfuerzos de origen ambiental

La situación medioambiental donde se encuentre el motor es de gran importancia a la hora de tener en cuenta esfuerzos adicionales. Desde ambientes salinos, químicos, hasta la entrada de objetos por el sistema de ventilación, pueden provocar diversos fallos en el motor.[13]

6.6.3. Fallos en los rodamientos

Un rodamiento es un elemento mecánico que sirve de apoyo y reduce la fricción entre dos piezas por medio de rodadura. Se coloca entre dos componentes de una máquina con un eje de rotación en común, de manera que existe un movimiento relativo entre ambos.[13]

A continuación, se hace una breve descripción de cada causa de fallo en rodamientos:

Lubricación incorrecta

Los lubricantes se usan entre superficies de contacto para mantener ambas partes en continuo movimiento. El principal propósito de la lubricación de rodamientos es reducir la fricción entre superficies. Otras funciones complementarias son: la disipación de calor, la eliminación de partículas sólidas desgastadas y contaminantes desde la superficie de rodadura, la protección contra la corrosión, el incremento del efecto de sellado sobre las juntas. [4].

En la siguiente figura se puede observar el porcentaje de las diferentes causas de fallo en los rodamientos, donde la falta de lubricación es la principal de ellas.

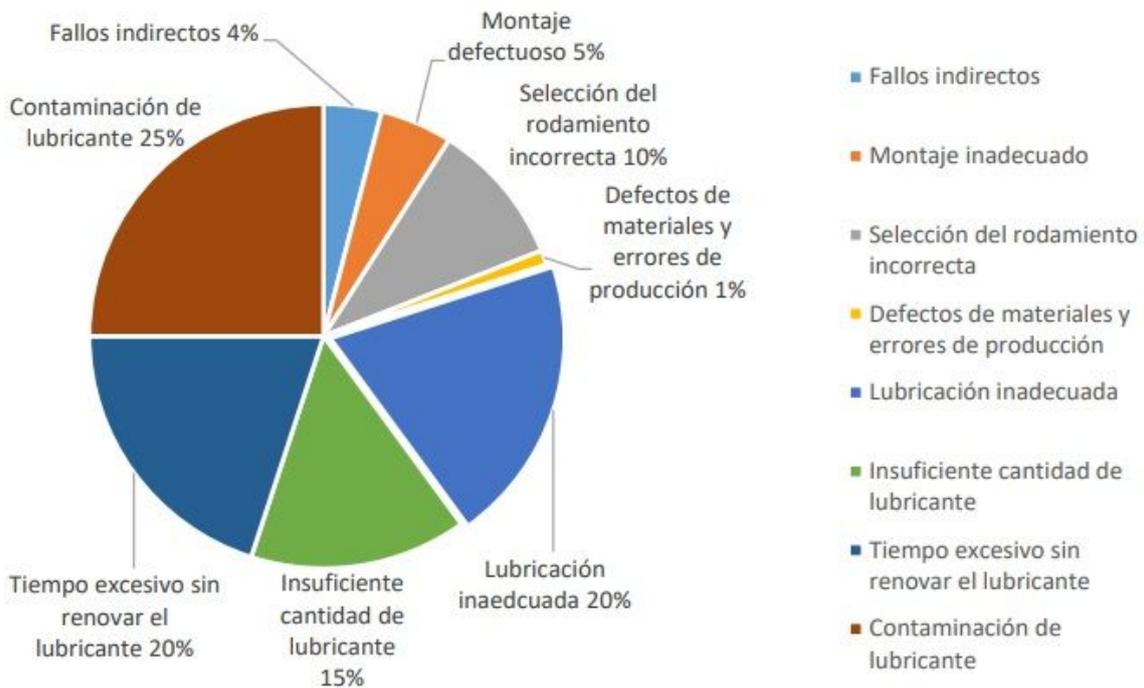


Figura 6.6.1. – Fallos en los rodamientos. [15]

En la gráfica se puede observar cómo queda desglosado el porcentaje que hace referencia a la lubricación incorrecta en cuatro secciones el tiempo excesivo sin renovar el lubricante 20%, lubricación inadecuada 20%, insuficiente cantidad de lubricante 15% y contaminación del lubricante un 25%.

Selección del rodamiento incorrecta

Esta posibilidad debe ser considerada después de analizar el resto de causas de fallos.

Montaje defectuoso

Un desalineamiento de 0.01/10mm es suficiente para causar un aumento de la vibración y de la temperatura del rodamiento provocando un gran desgaste. También, existen casos de montajes en los que se usa calentadores de inducción para expandir el anillo interior, siendo necesario desmagnetizar el rodamiento antes de la instalación para evitar el fallo debido a la atracción.

Existen diversas posibilidades que pueden causar un montaje defectuoso:

- Calor excesivo o irregular del rodamiento.
- Carga desequilibrada.
- Desalineamiento.

Fallos indirectos

- Sobrecargas: precargas incorrectas, un ajuste prieto y una carga excesiva, pueden traer como consecuencia una fatiga prematura.
- Descarga eléctrica: la circulación de corriente a través de los rodamientos surge debido a la aparición de tensiones en el eje. Estas tensiones pueden deberse a inducciones electromagnéticas o a fenómenos electrostáticos. Las distribuciones asimétricas de corriente tanto en el rotor como en el estator, que surgen como consecuencia de asimetrías en el circuito magnético, rotura de las barras, alimentación desequilibrada, cortocircuitos entre espiras del estator, etc., generan tensiones inducidas en el eje del motor. Las consecuencias visuales de esta corriente se reflejan en la formación de pequeños cráteres en el camino de rodadura, la degradación del lubricante y el posible desprendimiento de partículas metálicas. En los casos de corrientes débiles se observan marcas paralelas al eje a lo largo del anillo de rodadura. [13]
- Vibración: las vibraciones estacionarias pueden causar daños que se identifican como depresiones brillantes o manchas rojizas comunes a la corrosión. Estas marcas guardan una distancia idéntica a la separación entre los elementos rodantes.
- Alta temperatura: las altas temperaturas son un factor de riesgo para la vida del rodamiento: Aceites minerales de gran calidad comienzan a oxidar a 71°C, por lo que alcanzadas ciertas temperaturas no importa ni la calidad, ni la cantidad, ni el tipo de lubricante.

Cada vez son menos los rodamientos con defectos de fabricación debido a la continua mejora de estos procesos y la tecnología de materiales, además del progreso de los instrumentos de detección de defectos que eliminan los rodamientos defectuosos en el mismo proceso de fabricación.

Las conclusiones que se pueden obtener de este apartado es que la causa de fallo más importante es la de lubricación. La correcta lubricación ofrece oportunidades, como, por ejemplo, poder alargar la vida útil de aquellos componentes impregnados de aceite o grasa, eliminando no sólo fallos catastróficos si no también fallos funcionales que afectan a la producción.

6.6.4. Rotura de barras en motores de inducción

Uno de los principales fallos de los motores de inducción, es el agrietamiento, y la rotura de barras de rotor, especialmente en motores que arrancan con frecuencia bajo carga [16].

El arranque produce una corriente elevada que pasa por las barras debido a que la velocidad del rotor es mucho más baja que la velocidad síncrona. Las altas corrientes causan un calentamiento y una expansión de las barras con relación al rotor y debido a las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales. Este calentamiento junto con la expansión que tiene lugar en las barras, serán desiguales y por lo tanto esto producirá un agrietamiento de las juntas, en las cuales las barras se unen al anillo de cortocircuito. Cuando aparece una grieta, la resistencia de la barra se incrementa, lo que incrementa aún más el calentamiento, empeorando el estado de la grieta. [13]

Al mismo tiempo, las barras del rotor vecinas recibirán corrientes incrementadas debido a la corriente reducida en la barra con grietas, con lo que se producirá una rotura en cadena de las barras.

También debido a los regímenes transitorios térmicos del motor la jaula puede sufrir movimientos diferenciales dentro del paquete magnético rotórico, lo que conduce habitualmente a la torsión y agrietamiento de los anillos. Una vez que una barra o anillo se ha agrietado, el proceso es degenerativo: la barra defectuosa se calienta en torno a la fisura hasta llegar a romperse. La rotura origina la aparición de arcos eléctricos entre las dos partes separadas, que habitualmente dañan al circuito magnético. Las barras adyacentes soportan entonces corrientes mayores y, por tanto, mayores solicitaciones térmicas y mecánicas, con lo cual se inicia el proceso de aparición de nuevas grietas.[13]

El reducido tamaño de las holguras residuales produce una unión muy eficiente entre barras y chapas dando lugar a resistencias de contacto muy bajas. Por esto, es posible la circulación de corrientes entre las barras rotóricas y las chapas del núcleo en dirección perpendicular a las primeras. Este nuevo flujo de corriente estará distribuido a lo largo del rotor, circulando transversalmente a través de las chapas de material magnético entre las diferentes barras de la jaula. [13]

Estas corrientes (denominadas “inter-bar currents” o también denominadas corrientes interlaminares), serán de especial importancia para poder analizar el mecanismo de fallo y sus consecuencias. Por lo tanto, si por una máquina sana pueden circular corrientes interlaminares, la distribución, de corriente resultado de una asimetría rotórica no será la misma ya que existe un nuevo camino para su recirculación: el propio núcleo magnético. De este modo, los efectos que se puedan detectar desde el exterior cuando se inicie la avería no serán los mismos que si la jaula estuviera perfectamente aislada, y, por lo tanto, el protocolo de diagnóstico empleado deberá tenerlo en cuenta. [13]

Las asimetrías en la jaula rotórica de un motor de inducción suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas en el rotor y con las elevadas fuerzas centrífugas que son soportadas tanto en las barras como en los anillos, en especial durante los regímenes de funcionamiento transitorio. Los problemas pueden comenzar durante la construcción de la máquina debido a una fundición defectuosa en los rotores de aluminio, o a uniones defectuosas en el caso de anillos de cortocircuito soldados o ensamblados. Por ello aparecen juntas de alta resistencia eléctrica o porosidades en la fundición que producen puntos de altas temperaturas dentro de la jaula.

La fractura suele iniciarse en los puntos de la barra que no están soportados por el cuerpo del rotor, es decir, en las proximidades de la unión con el anillo de cortocircuito o en éste mismo. Además, en esta zona es donde suelen acumular las mayores tensiones mecánicas de la estructura. En el proceso de desarrollo de la avería hay que tener en cuenta que las barras rotóricas soportan las fuerzas de frenado y aceleración del motor; por tanto, si la máquina sufre variaciones bruscas en su velocidad de giro, originadas durante su ciclo de trabajo, o por el tipo de máquina accionada, el fallo puede desarrollarse rápidamente como consecuencia de la fatiga de los materiales.[13]

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

7. Descripción de las fases y equipos utilizados

En este capítulo se realizará una breve descripción de los equipos a utilizar en la realización de las pruebas en las que se apoya este proyecto, así como de la metodología de ensayo y de análisis que se aplicará posteriormente a los datos obtenidos en los ensayos.

7.1. Descripción de las fases

La metodología de trabajo consiste en realizar diversos ensayos en el banco de pruebas, estudiando algunos de los fallos más comunes en un motor eléctrico de inducción. Para ello se realiza un primer ensayo de calibración de los equipos, donde se recogen datos en un estado normal de funcionamiento de la instalación, sometiendo a esta a diversas cargas de tipo resistivo, inductivo y capacitivo.

A continuación, se realizan los experimentos de las diferentes pruebas de los fallos principales que afectan a un motor eléctrico: derivación de corriente entre fases por falta de aislamiento, derivación entre una de las fases y masa, desequilibrio de masas en el rotor y rodamientos en mal estado.

Tras obtener los datos de trabajo en condiciones normales y con fallos, se procede a analizarlos utilizando los programas Power Log de Fluke, Microsoft Excel y el programa de análisis estadístico QualStat.

7.2. Equipos utilizados

En este apartado se presentan los distintos equipos empleados para la realización de las pruebas.

Para realizar los ensayos y simular los desperfectos se ha utilizado una instalación consistente en dos grupos motor-alternador conectados a un cuadro de distribución eléctrico. Esta instalación es utilizada normalmente para realizar prácticas de acoplamiento de alternadores.

- Grupo Motor-Alternador



Figura 7.2.1. - Grupo Motor-Alternador con elementos de control

El motor del grupo tiene las siguientes características:

CV	7,5	RPM	1440	Volt	220/380	Hz	50	Aislamiento	F
kW	5,5	CosPhi	0,86	Amp	19,4/11,2	IP	-	Servicio	S1

Tabla 4 – Datos del motor del grupo

El alternador tiene las siguientes características:

KVA	5	Hz	50	Volt	400/230	Temp A	
FASES	3	COS Phi	0,80	Amp	-	Ex.Volt	110
RPM	1500	IP	23	Aislamiento	F	Ex.Amp	2

Tabla 5 – Datos del alternador del grupo

- Registrador de potencia Fluke 1735



Figura 7.2.2. - Registrador de potencia Fluke 1735 [17]

El registrador de potencia Fluke 1735 PowerLogger es una herramienta para realizar estudios de energía y registros básicos de calidad de la potencia. El 1735 registra la mayoría de los parámetros de potencia eléctrica y armónicos, y además captura sucesos de voltaje.

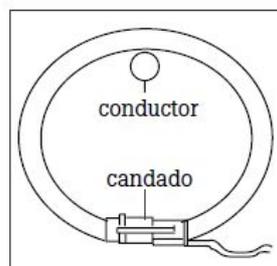
Diseñado para medir los parámetros más críticos de potencia trifásica, el 1735 puede registrar voltajes de verdadero valor eficaz, corrientes de verdadero valor eficaz, ángulos de fase, sucesos de voltaje, THD de voltaje y corriente, armónicas de voltaje y corriente hasta la quincuagésima, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, energía activa, energía reactiva. Con una memoria de hasta 45 días de datos, el 1735 puede descubrir problemas intermitentes o de detección difícil.

Datos generales

Pantalla	Pantallas de transmisión gráfica a color, de ¼ VGA, de 320 x 240 píxeles, con iluminación adicional de fondo y contraste ajustable, texto y gráficos en colores
Calidad	Desarrollado, diseñado y fabricado según la norma DIN ISO 9001
Memoria	4 MB de memoria flash, 3,5 MB para registrar datos
Interfaz	Zócalo RS-232 SUB-D; 115,2 k baudios, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de parada, las actualizaciones de firmware se pueden hacer con la interfaz RS-232 (cable de extensión de 9 polos)
Velocidad de muestreo	10,24 kHz
Frecuencia de la línea	50 Hz o 60 Hz, seleccionable por el usuario, con sincronización automática
Alimentación	Paquete de batería de NiMH, con adaptador de CA (15 V a 20 V/0,8 A)
Tiempo de funcionamiento de la batería	Típicamente, más de 12 horas con la luz de fondo baja y más de 6 horas con la luz de fondo alta
Dimensiones	240 mm x 180 mm x 110 mm (6,1 pulg. x 4,6 pulg. x 2,8 pulg.)
Peso	1,7 kg (3,75 lb), incluida la batería

Tabla 6 – Datos generales del Registrador de potencia Fluke 1735 [17]

- Sondas flexibles de corriente



bloqueo Flexi Set

Figura 7.2.3. – Dibujo de sonda flexible [17]

Las sondas Flexi Set se utilizaron en la adquisición de las señales de corriente del motor analizado.

Las cuatro sondas de corriente están conectadas con un enchufe, y el instrumento automáticamente detecta, modifica la escala y alimenta las sondas. Estas sondas de corriente de rango variable se ajustan fácilmente en 15 A, 150 A o 3000 A para una gran exactitud en casi cualquier aplicación. Las conexiones de voltaje son de puntas simples, permitiendo configuraciones sencillas y veloces.

Rangos de intensidad Flexi Set	15 A/150 A/3000 A de verdadero valor eficaz (en el seno)
Rangos de pinza amperimétrica	1 A/10 A
Resolución	0,01 A
Rangos	150 A/3000 A y 1 A/10 A
	Error intrínseco: $\pm (0,5 \% \text{ del valor medido} + 10 \text{ dígitos})$
	Error de funcionamiento: $\pm (1 \% \text{ del valor medido} + 10 \text{ dígitos})$
Rangos	15 A
	Error intrínseco: $\pm (0,5 \% \text{ del valor medido} + 20 \text{ dígitos})$
	Error de funcionamiento: $\pm (1 \% \text{ del valor medido} + 20 \text{ dígitos})$

Tabla 7 – Datos de las sondas Flexi Set [17]

- Software Power Log

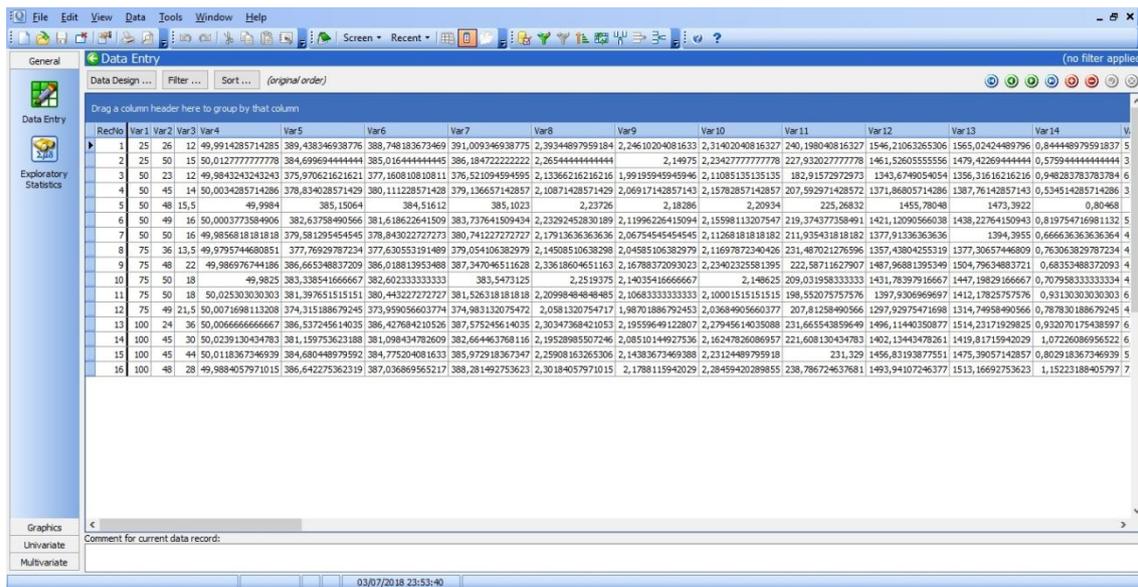
Power Log es el software de PC para los Fluke 345, 433, 434, 434-II, 435, 435-II, 437-II, VR1710 y 1735. El Software tiene como función tratar los datos registrados por el instrumento.

Después de transferir los datos registrados a un PC para su evaluación tabular y gráfica, los datos se pueden exportar a una hoja de cálculo para generar e imprimir informes.

- Software QualStat

QualStat es un paquete de software estadístico diseñado para análisis de datos multivariantes, proporcionando una manera sencilla de analizar datos complejos. Incluye estadísticas generales populares y gráficos avanzados multivariantes de control de procesos estadísticos,

Está siendo utilizado en muchas industrias por ingenieros, investigadores, profesionales de control de calidad y estadísticos para proporcionar información sobre los datos de sus procesos.



The screenshot shows the QualStat software interface. The main window is titled 'Data Entry' and contains a table with 16 rows and 14 columns labeled 'Var1' through 'Var14'. The table contains numerical data. Below the table, there are sections for 'Graphics', 'Univariate', and 'Multivariate' analysis options. The status bar at the bottom indicates the date and time: '03/07/2018 23:53:40'.

Figura 7.2.4. – Ventana principal del software QualStat.

Algunas de las formas en que QualStat está siendo utilizado:

Benchmarking: Una técnica en la que una empresa mide su desempeño frente a la de las mejores empresas de su clase, determina cómo esas compañías lograron sus niveles de rendimiento y utiliza la información para mejorar su propio desempeño. Los temas que pueden ser evaluados incluyen estrategias, operaciones y procesos.

Minería de datos: Descubrimiento de relaciones y patrones en datos que no son obvios sin el uso de herramientas de software como QualStat. La minería de datos proporciona información sobre la información oculta en un conjunto de datos.

Control Estadístico de Procesos: La aplicación de técnicas estadísticas para controlar un proceso.

Modelado: El uso de ecuaciones matemáticas para calcular el comportamiento de un sistema. Después de modelar un sistema, esta descripción matemática del comportamiento de un sistema se puede utilizar para la optimización, simulación, etc.

Mejora Continua de Procesos: Una filosofía y actitud para analizar capacidades y procesos y mejorarlos repetidamente para lograr la satisfacción del cliente. Las herramientas estadísticas como QualStat son una parte integral de ese análisis.

- Cuadro eléctrico

Se muestra en la siguiente imagen el cuadro eléctrico donde se colocan las sondas del Fluke para registrar los datos eléctricos de las pruebas.



Figura 7.2.5. - Cuadro eléctrico con Fluke 1735 conectado a barras

- Motor de prueba

El motor utilizado para realizar simulaciones de fallos, es un motor de inducción con devanado en el estator trifásico y arrollamiento en jaula de ardilla en el rotor, con una polea acoplada al eje.



Figura 7.2.6. – Motor de prueba

Sus características de operación son:

kW	1,1	CV	1,5	Volt	220/380
R.P.M	1400	Hz	50	Amp	4,8/2,8

Tabla 8 – Datos del motor de prueba.

Además de los equipos mostrados se utilizaron los siguientes elementos e instrumentos de medida:

- Puntas y pinzas de conexión de voltaje
- Bombillas de 40w
- Condensador
- Resistencias
- Vibrómetro
- Pistola láser de temperatura
- Multímetro

8. Cronograma

En la siguiente tabla puede verse el cronograma de las fases y tareas desarrolladas durante la realización del trabajo.

Fases y tareas							
Calibración de equipos	■						
Experimento de derivación entre fases		■					
Experimento de desequilibrio de rotor			■				
Experimento de daños en el rodamiento				■	■		
Análisis estadístico de los datos					■	■	■
Redacción del TFG					■	■	■
	nov-17	dic-17	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18

Figura 8.1. Cronograma de tareas.

9. Descripción de los resultados

9.1. Desarrollo de las pruebas

En este apartado se describe el desarrollo de los distintos experimentos realizados para producir los fallos estudiados en el motor de inducción. Para ello se utilizaron los equipos y materiales descritos en el apartado anterior.

En cada uno de los casos y tras realizar el montaje correspondiente se procede a la adquisición de los datos. Las distintas situaciones se provocan manualmente, alterando las cargas o encendiendo los equipos necesarios para la prueba.

Al finalizar las diferentes pruebas se procede a introducir los datos recogidos por el registrador de potencia Fluke 1735 en el software Power Log. Mediante este programa pueden verse distintas gráficas de las pruebas, entre ellas los valores eficaces de tensión e intensidad, la evolución temporal de los armónicos y su histograma.

9.1.1. Calibración del equipo

Con el fin de comprobar el funcionamiento y calibración del equipo se realiza un ensayo inicial sin ningún desperfecto. Para ello y tras realizar todas las conexiones de equipos se procede a realizar el ensayo mediante el siguiente procedimiento.

En primer lugar se realiza la conexión de diferentes cargas por separado, siendo el primer elemento conectado una resistencia, seguido por el motor y por último el condensador.

En segundo lugar se conectan las diferentes cargas de forma conjunta, conectándose primero la resistencia, después el motor y el condensador. La desconexión se realiza en orden inverso.

En las siguientes gráficas se puede ver la variación de los valores eficaces de tensión e intensidad (*RMS*), la evolución temporal de los armónicos y su histograma. En la gráfica *RMS* se pueden apreciar claramente las diferentes conexiones en su efecto sobre la intensidad de corriente.

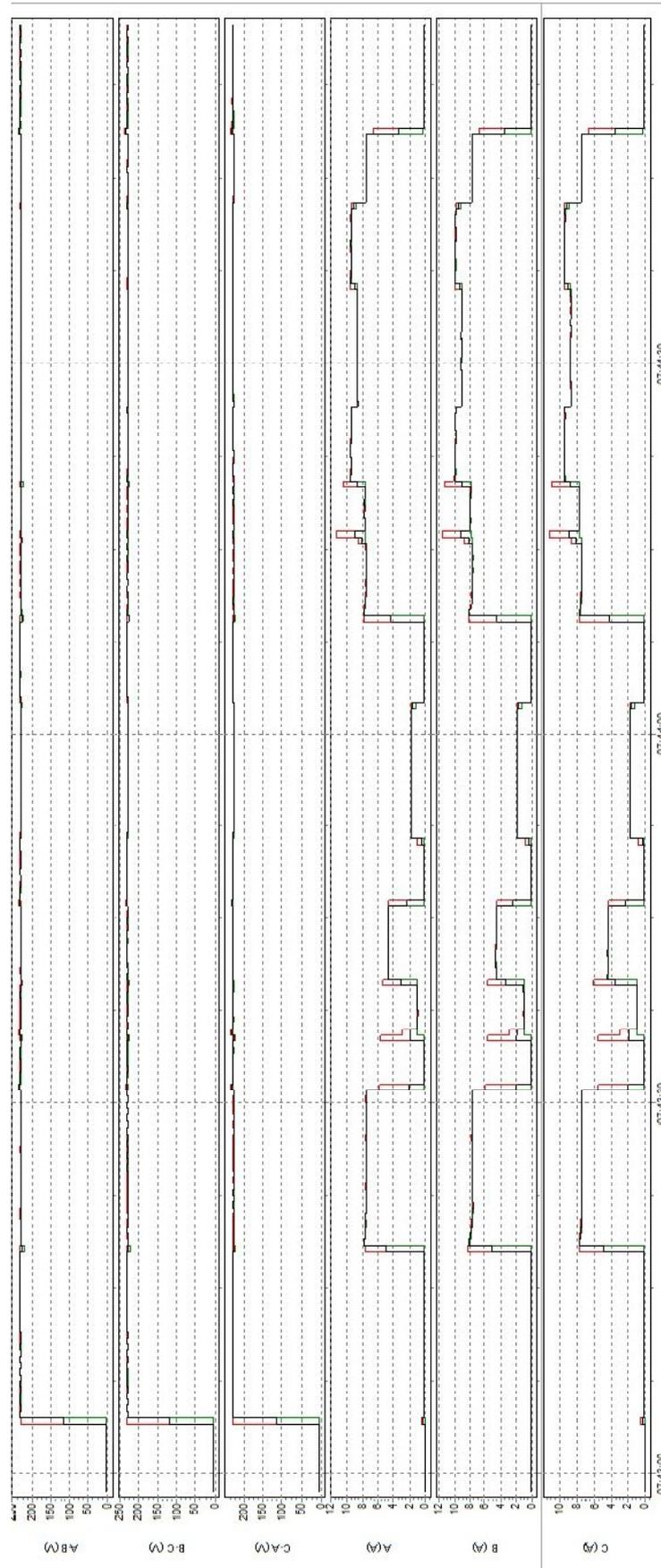


Figura 9.1.1. – Gráfica RMS 1º Prueba

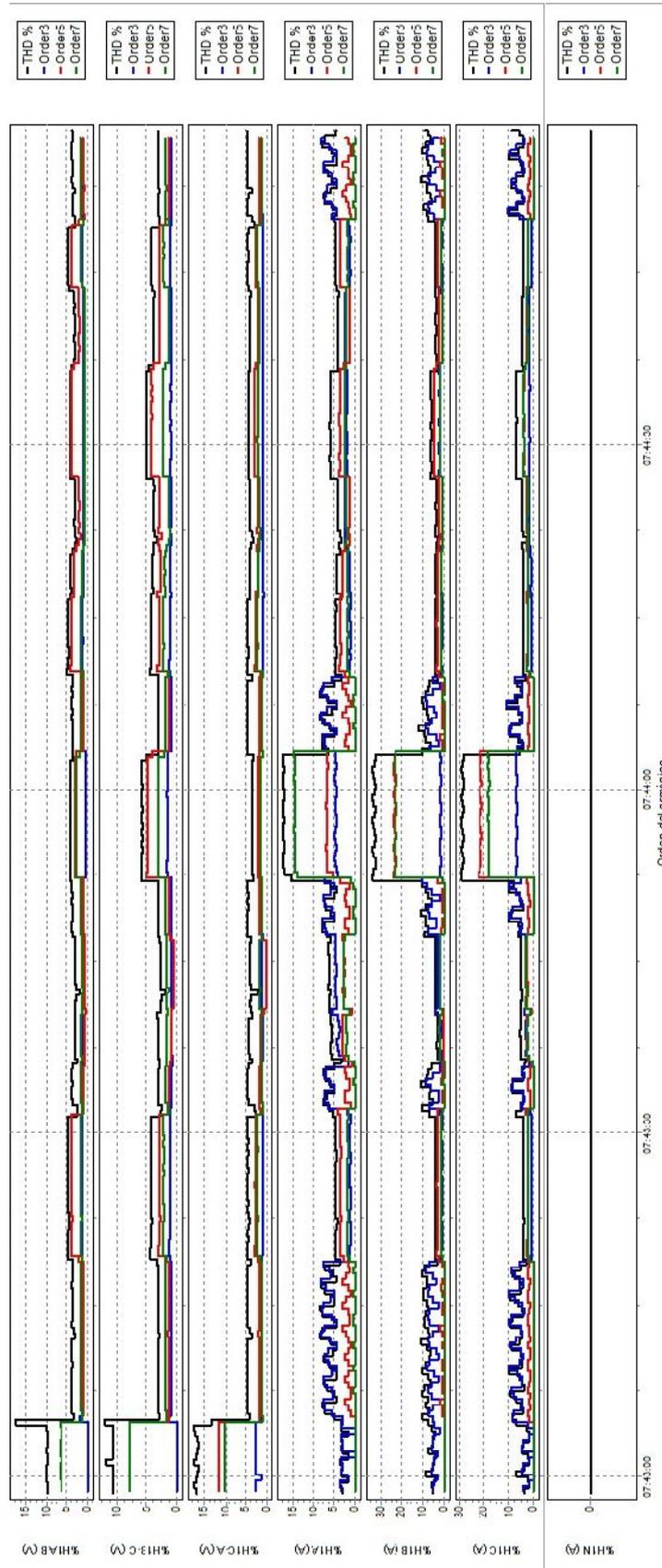


Figura 9.1.2 - Evolución temporal 1º Prueba

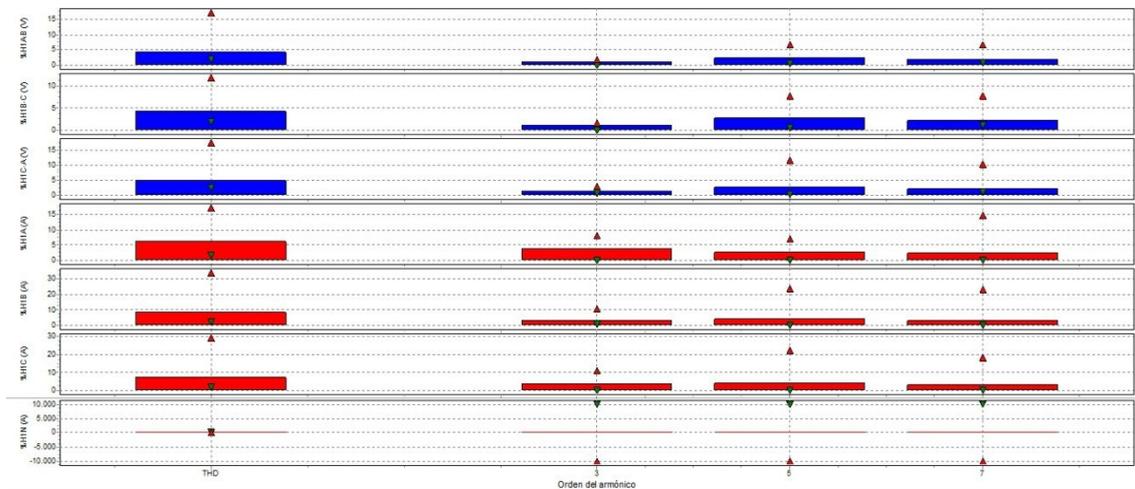


Figura 9.1.3. – Histograma 1º Prueba

Una vez realizado el ensayo y obtenidos los datos de funcionamiento gracias al registrador de potencia Fluke se procede a tratarlos mediante los programas Power Log y Excel obteniendo la siguiente gráfica.

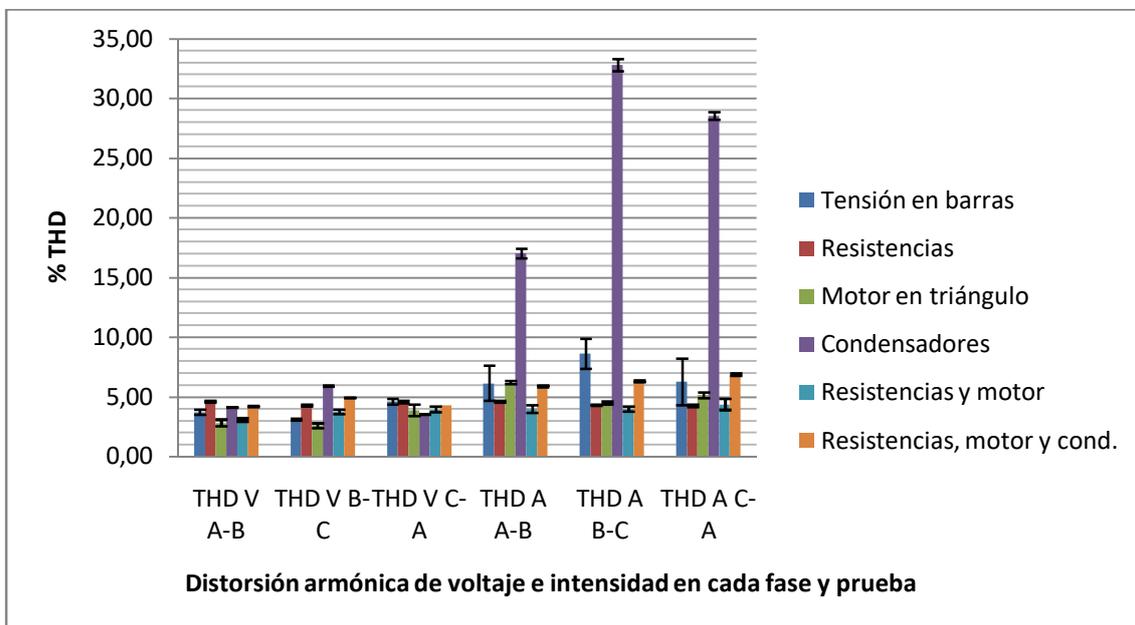


Figura 9.1.4. - THD ensayo inicial

En esta gráfica se muestra el efecto de la conexión de los distintos elementos en la distorsión armónica total. Se puede observar claramente una distorsión armónica más elevada producida por la conexión del condensador, llegando a THD a valores del 32 %.

9.1.2. Prueba de derivación entre líneas

El segundo ensayo tiene como objetivo observar el efecto que tiene en los armónicos una posible derivación de corriente entre las fases de bobinado del estator. Esta derivación de corriente implicaría un fallo en el aislamiento entre las dos fases. La metodología de trabajo para esta prueba es la siguiente.

Para simular un fallo de aislamiento y ser capaces de discernir el efecto que producen corrientes de distinta intensidad en la distorsión armónica total se realiza la conexión de un elemento resistivo entre dos de las fases, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

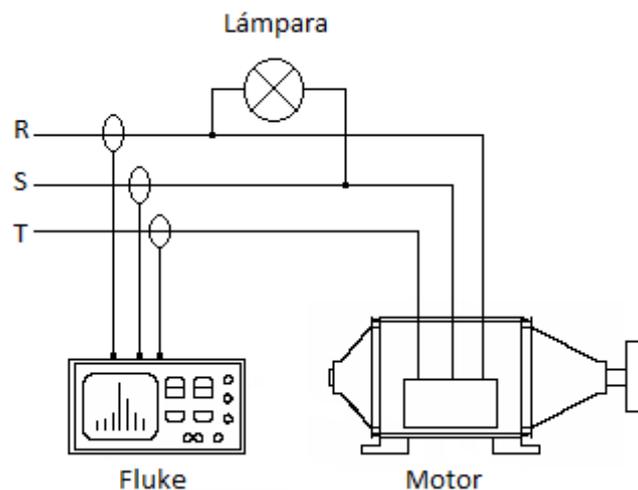


Figura 9.1.5. – Esquema de conexión del equipo

El elemento resistivo conectado entre las dos líneas consiste en una serie de tres lámparas de 40 w. Estas lámparas se conectan de distintas formas para conseguir una variación de la intensidad de la corriente que circula entre las dos fases, realizándose el ensayo desde la intensidad más baja hasta la más alta.

La intensidad de corriente en cada caso es la siguiente:

- Tres lámparas en serie: 0,07 A
- Una lámpara: 0,17 A
- Dos lámparas en paralelo: 0,34 A
- Tres lámparas en paralelo: 0,51 A

En las siguientes gráficas se puede ver la variación de los valores eficaces de tensión e intensidad (*RMS*), la evolución temporal de los armónicos y su histograma.

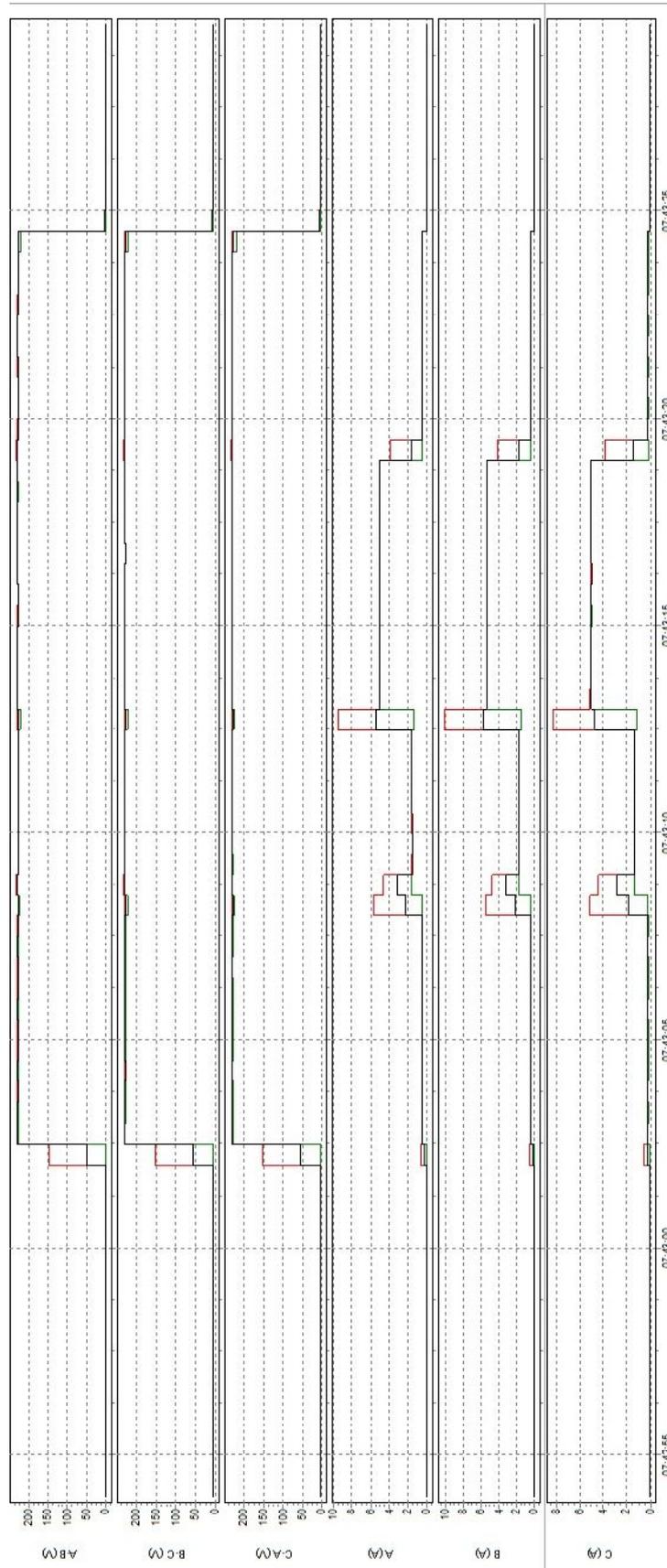


Figura 9.1.6. – Gráfica $RMS I = 0,51A$

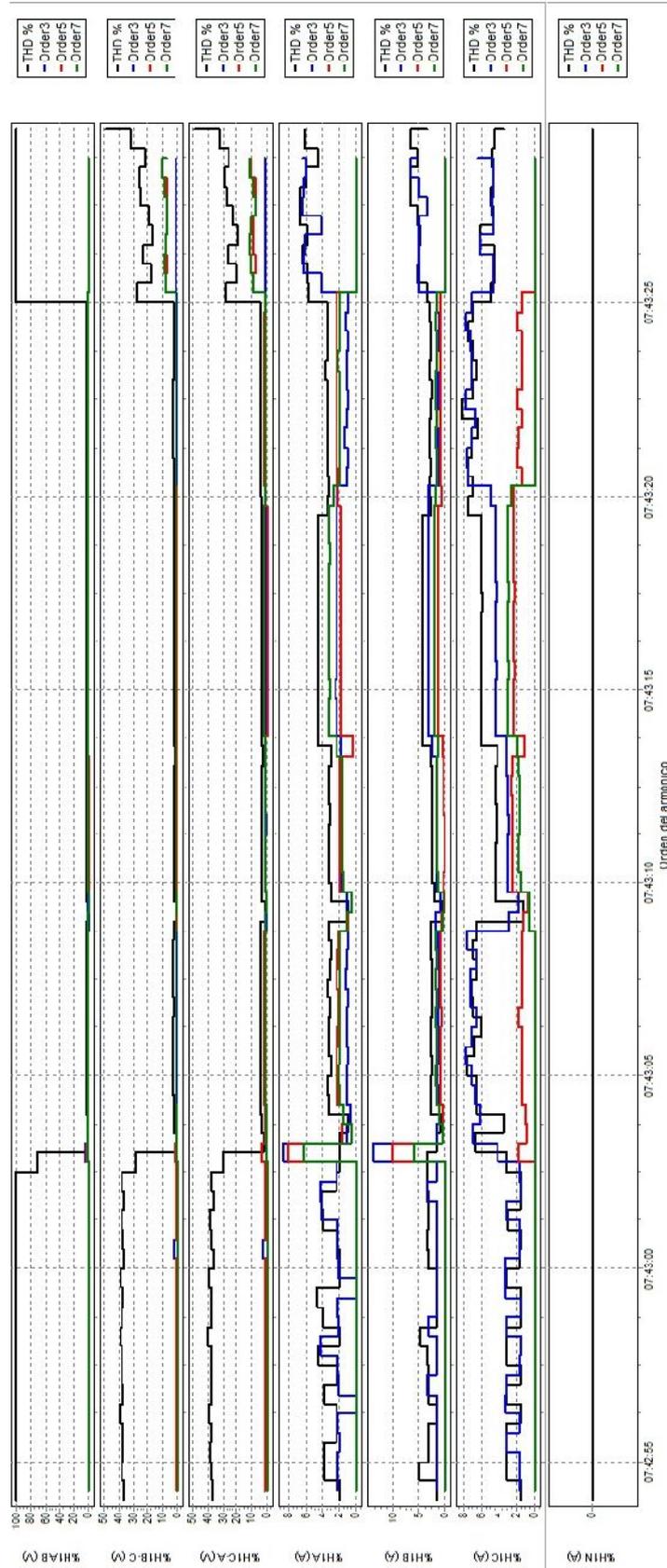


Figura 9.1.7. - Evolución temporal $I = 0,51A$

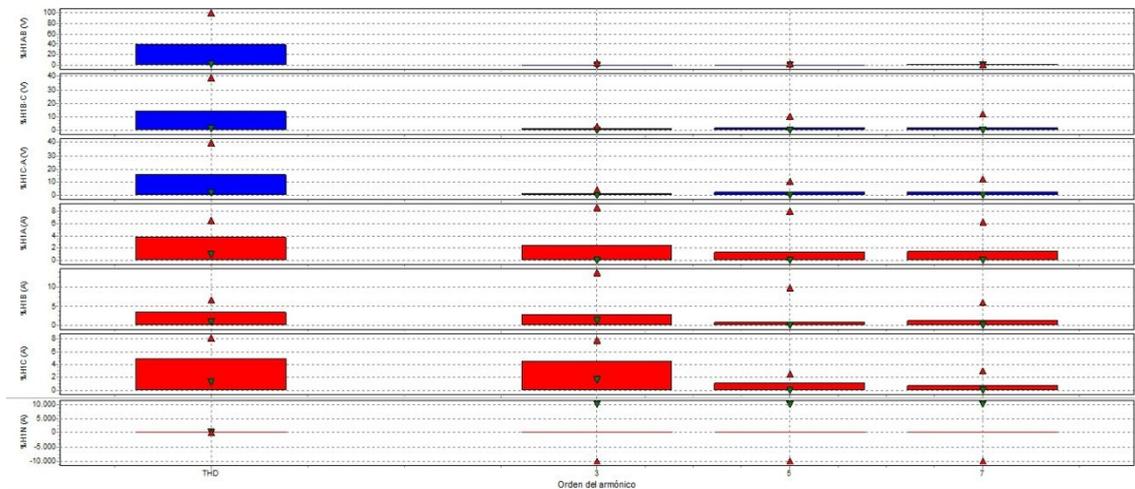


Figura 9.1.8. - Histograma $I = 0,51A$

Al igual que en la prueba anterior una vez realizado el ensayo y obtenidos los datos de funcionamiento gracias al registrador de potencia Fluke se procede a tratarlos mediante los programas Power Log y Excel obteniendo la siguiente gráfica.

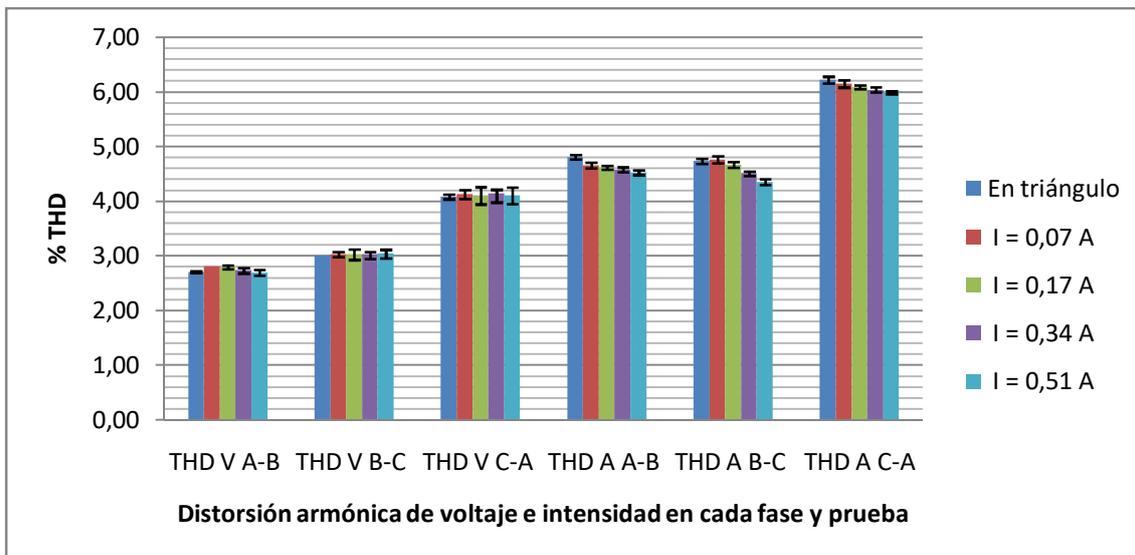


Figura 9.1.9. - THD Derivación entre líneas

En la gráfica obtenida puede observarse una reducción en la distorsión armónica total al aumentar la intensidad de la corriente que circula entre dos de las fases. Esta relación se ve más claramente en las siguientes figuras.

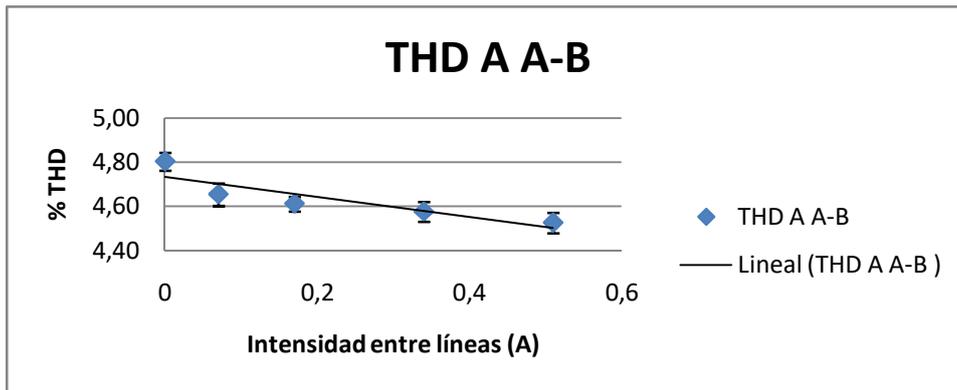


Figura9.1.10. – THD A A-B Derivación entre líneas

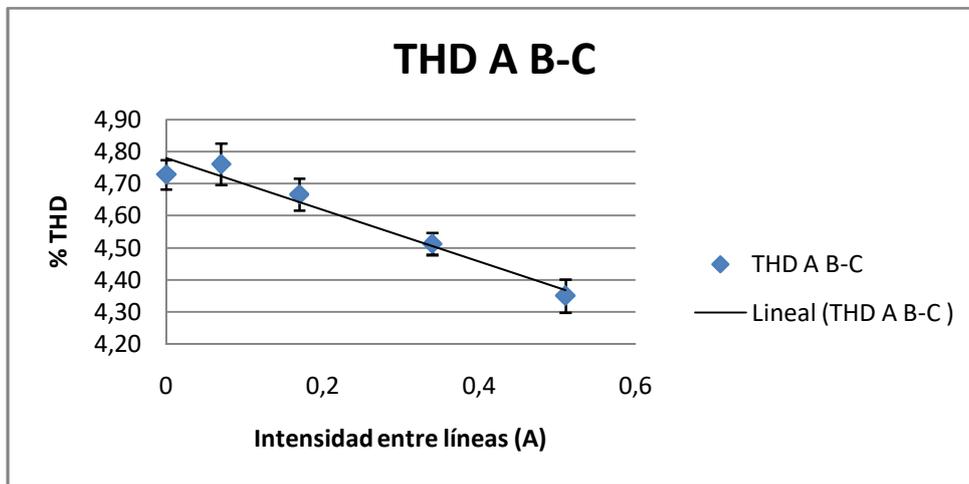


Figura9.1.11. – THD A B-C Derivación entre líneas

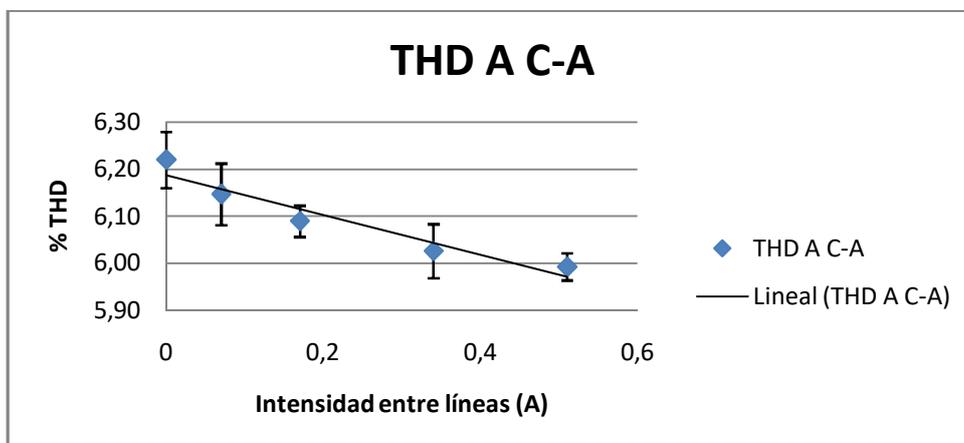


Figura9.1.12. – THD A C-A Derivación entre líneas

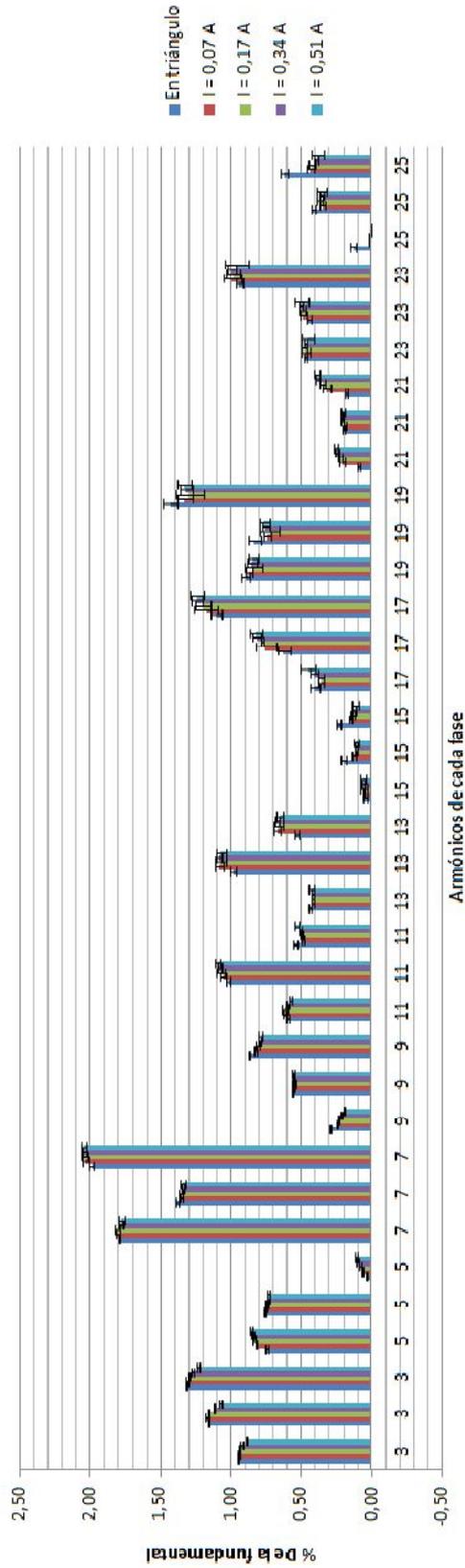


Figura 9.1.13. - Armónicos Derivación entre líneas

9.1.3. Prueba de derivación entre fase y masa

El tercer ensayo tiene como objetivo observar el efecto que tiene en los armónicos una posible derivación de corriente entre una de las fases de bobinado del estator y su carcasa. Esta derivación de corriente implicaría un fallo en el aislamiento entre el bobinado y la carcasa. La metodología de trabajo para esta prueba es la siguiente.

Para simular un fallo de aislamiento y ser capaces de discernir el efecto que producen corrientes de distinta intensidad en la distorsión armónica total se realiza la conexión de un elemento resistivo entre dos de las fases, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

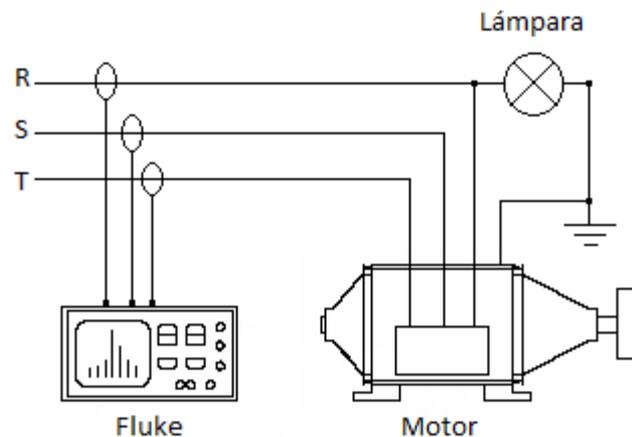


Figura 9.1.14. – Esquema de conexión del equipo

El elemento resistivo conectado entre la fase y la carcasa consiste en una serie de dos lámparas de 40 w. Estas lámparas se conectan de distintas formas para conseguir una variación de la intensidad de la corriente que circula entre una de las fases y la carcasa.

La resistencia en cada caso es la siguiente:

- Una lámpara: 97,1 Ω
- Dos lámparas en paralelo: 48,15 Ω

En las siguientes gráficas se puede ver la variación de los valores eficaces de tensión e intensidad (*RMS*), la evolución temporal de los armónicos y su histograma.

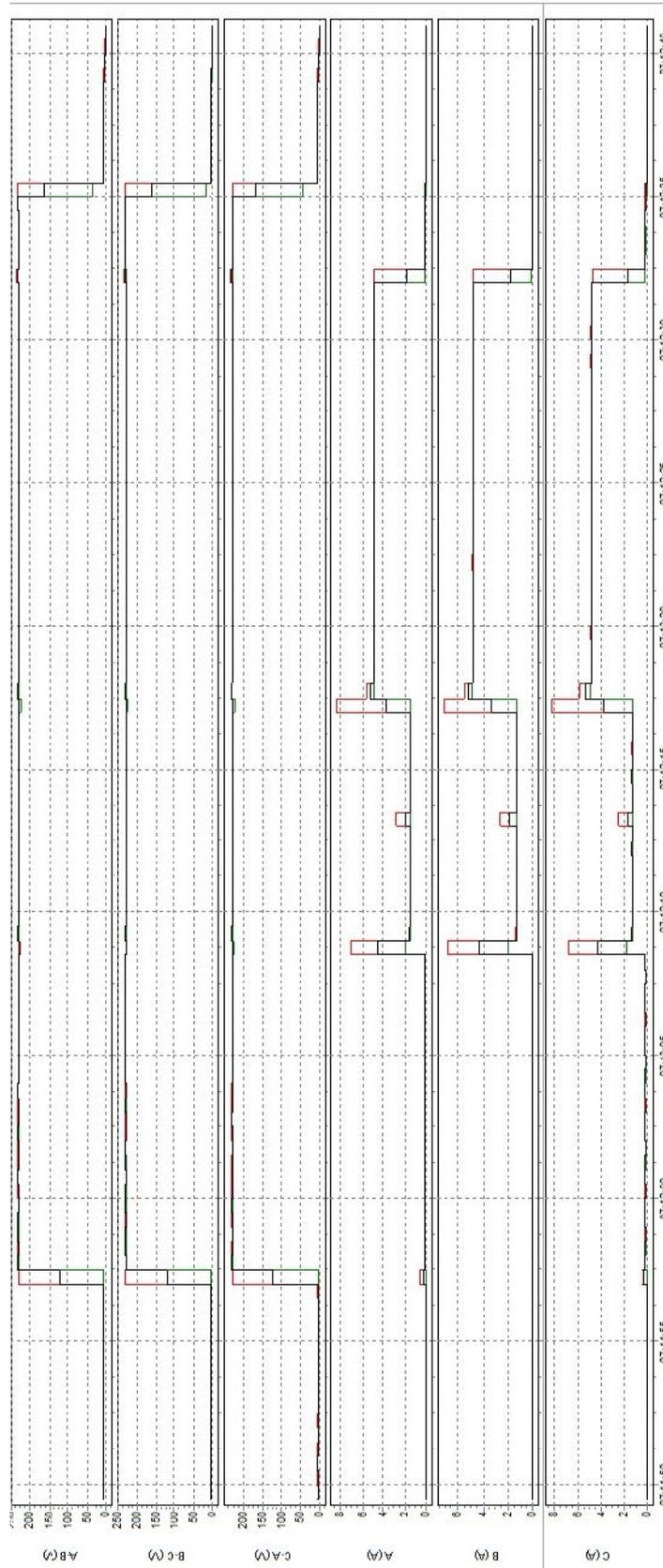


Figura 9.1.15.- RMS 97,1Ω

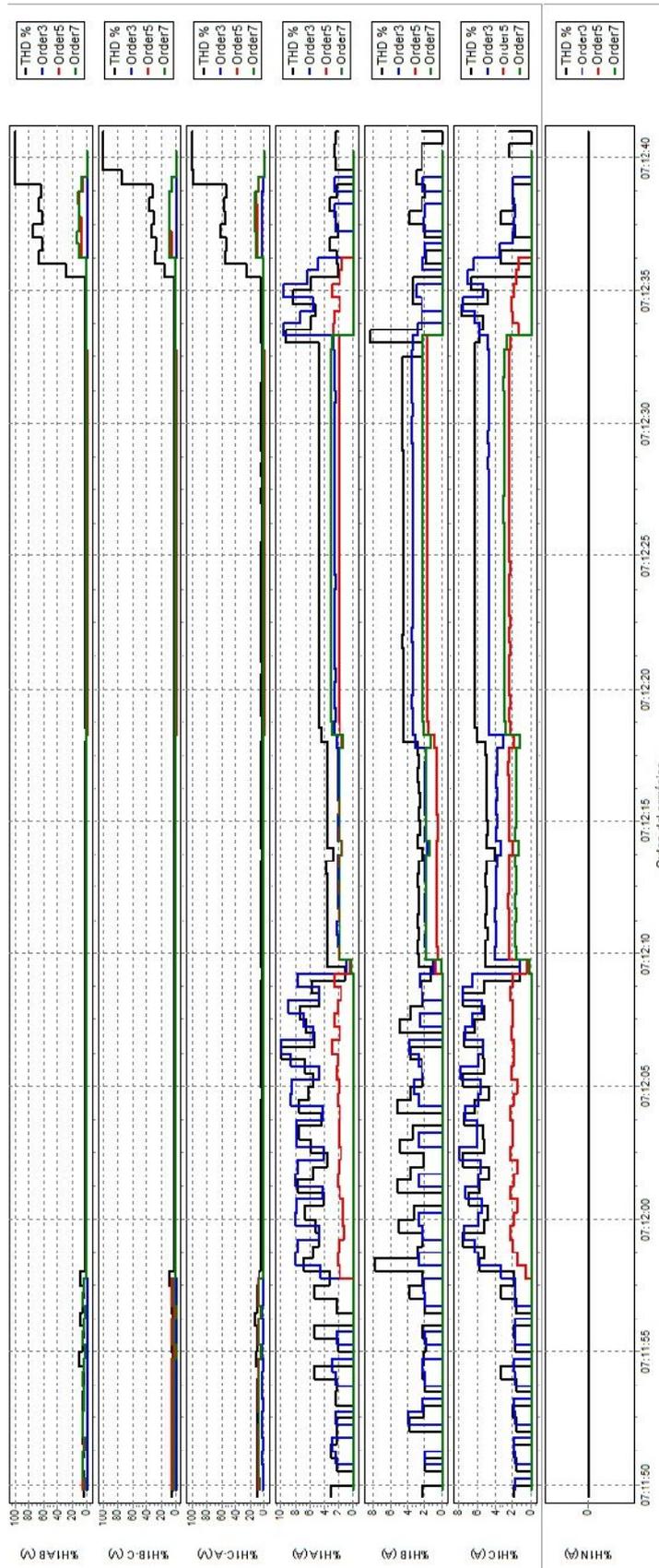


Figura 9.1.16. - Evolución temporal 97,1Ω

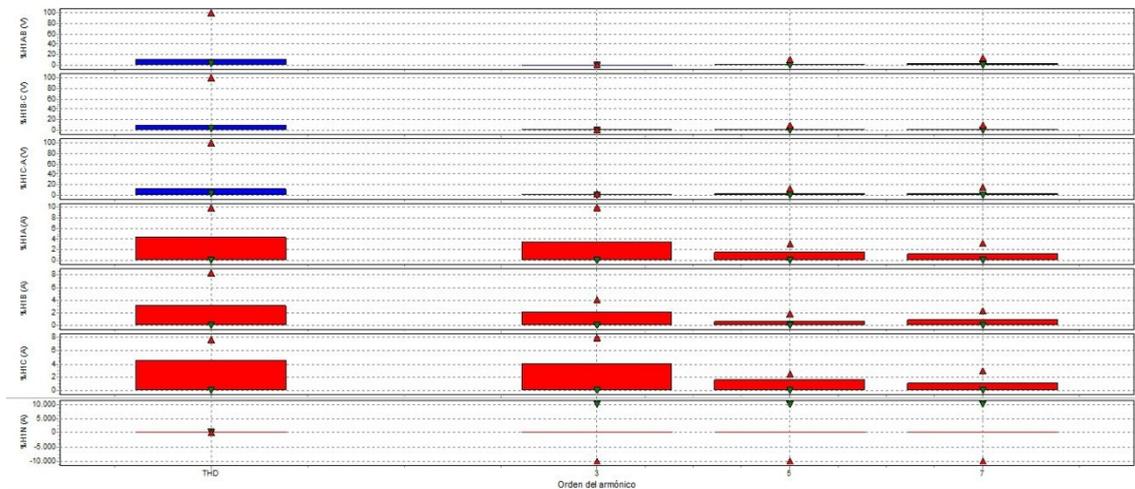


Figura 9.1.17.– Histograma 97,1Ω

Al igual que en las pruebas anteriores una vez realizado el ensayo y obtenidos los datos de funcionamiento gracias al registrador de potencia Fluke se procede a tratarlos mediante los programas Power Log y Excel obteniendo la siguiente gráfica.

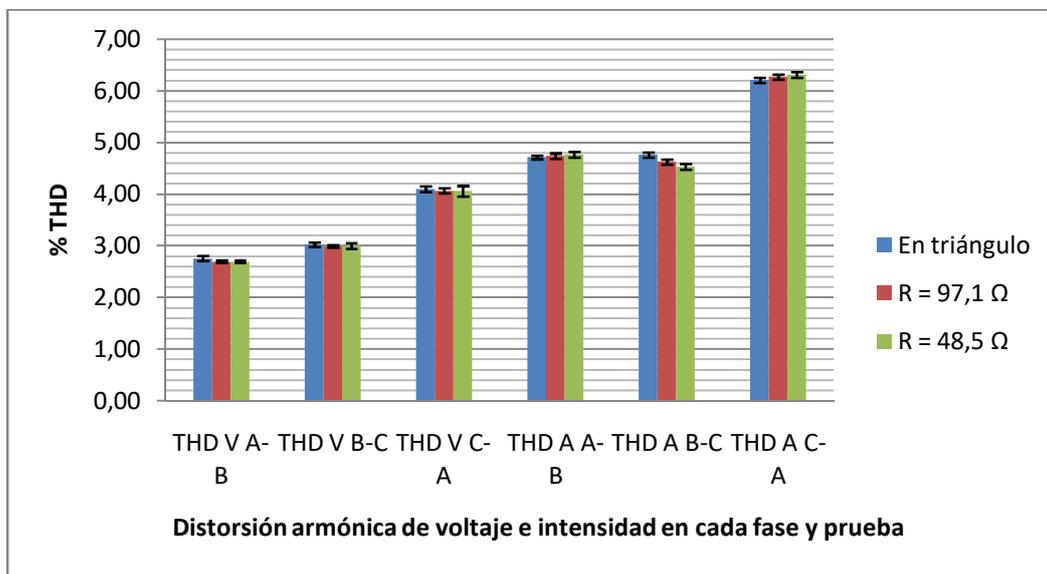


Figura 9.1.18. - THD Derivación entre fase y masa

En la gráfica obtenida si bien puede verse una variación en la distorsión armónica total, no puede obtenerse un resultado concluyente ya que varía de distinta forma en cada fase.

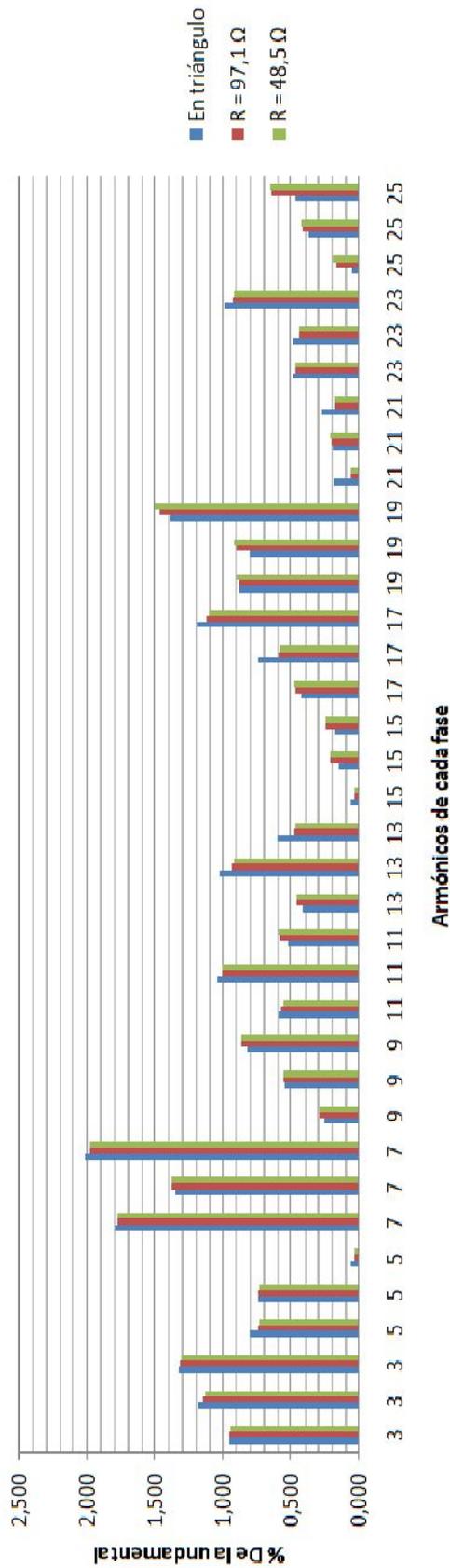


Figura 9.1.19. - Armónicos Derivación entre fase y masa

9.1.4. Prueba de desequilibrio del rotor

El cuarto ensayo tiene como objetivo observar el efecto que tiene en los armónicos un posible desequilibrio de masas en el rotor. Este desequilibrio implicaría un fallo en el equilibrado del rotor y podría generar vibraciones y desgaste prematuro de los rodamientos del motor. La metodología de trabajo para esta prueba es la siguiente.

Para simular un desequilibrio de masas en el rotor y ser capaces de discernir el efecto que produce en la distorsión armónica total se perfora una de las aletas del ventilador añadiendo una masa compuesta de un tornillo con una palomilla, tal y como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 9.1.20.- Masa añadida en el ventilador

El ensayo de desequilibrio se realiza variando la masa en el ventilador, para ello se añade en el primer ensayo un tornillo y una palomilla (5,991 g), en el segundo un tornillo una palomilla y ocho arandelas de acero (11,134 g) y el tercer ensayo un tornillo con tres palomillas (12,174 g). Las diferentes masas se colocan a una distancia de 45 mm del eje del motor.

En las siguientes gráficas se puede ver la variación de los valores eficaces de tensión e intensidad (*RMS*), la evolución temporal de los armónicos y su histograma.

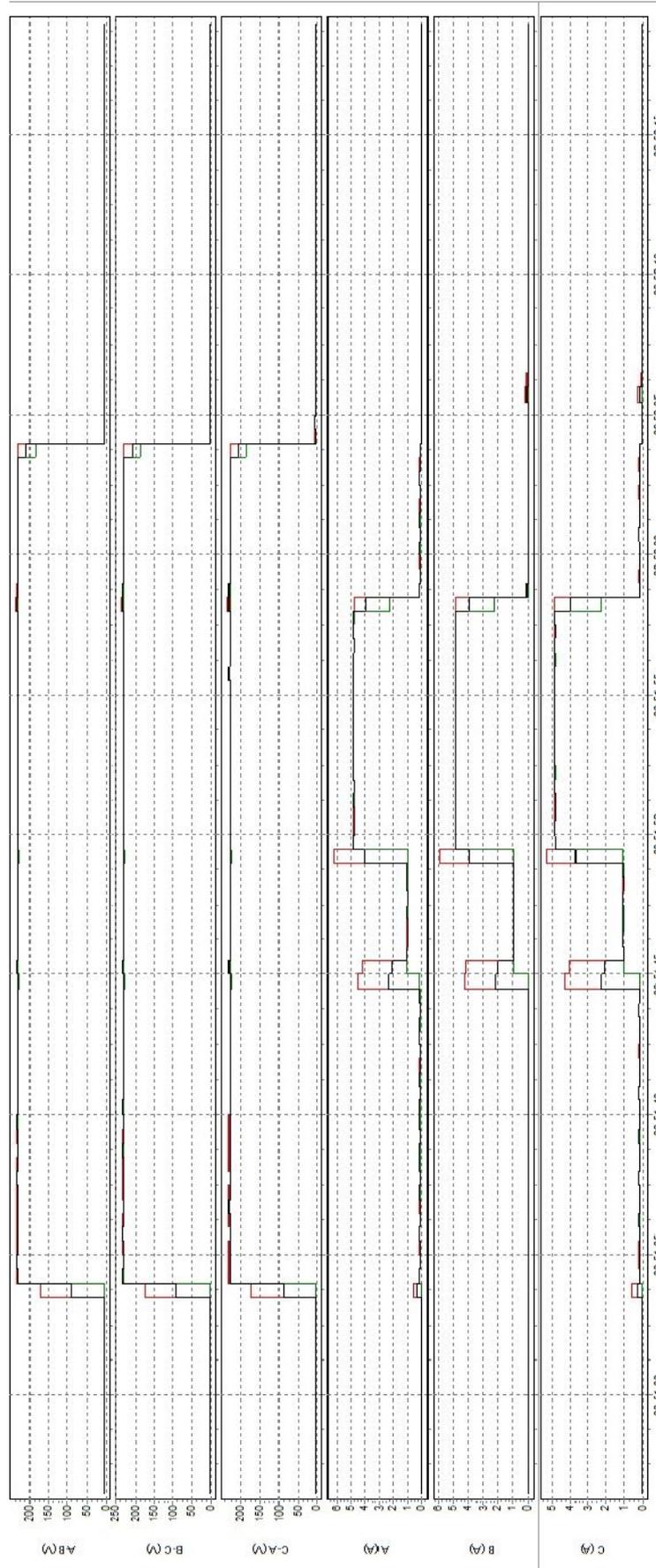


Figura 9.1.21. - RMS con 12,174 g

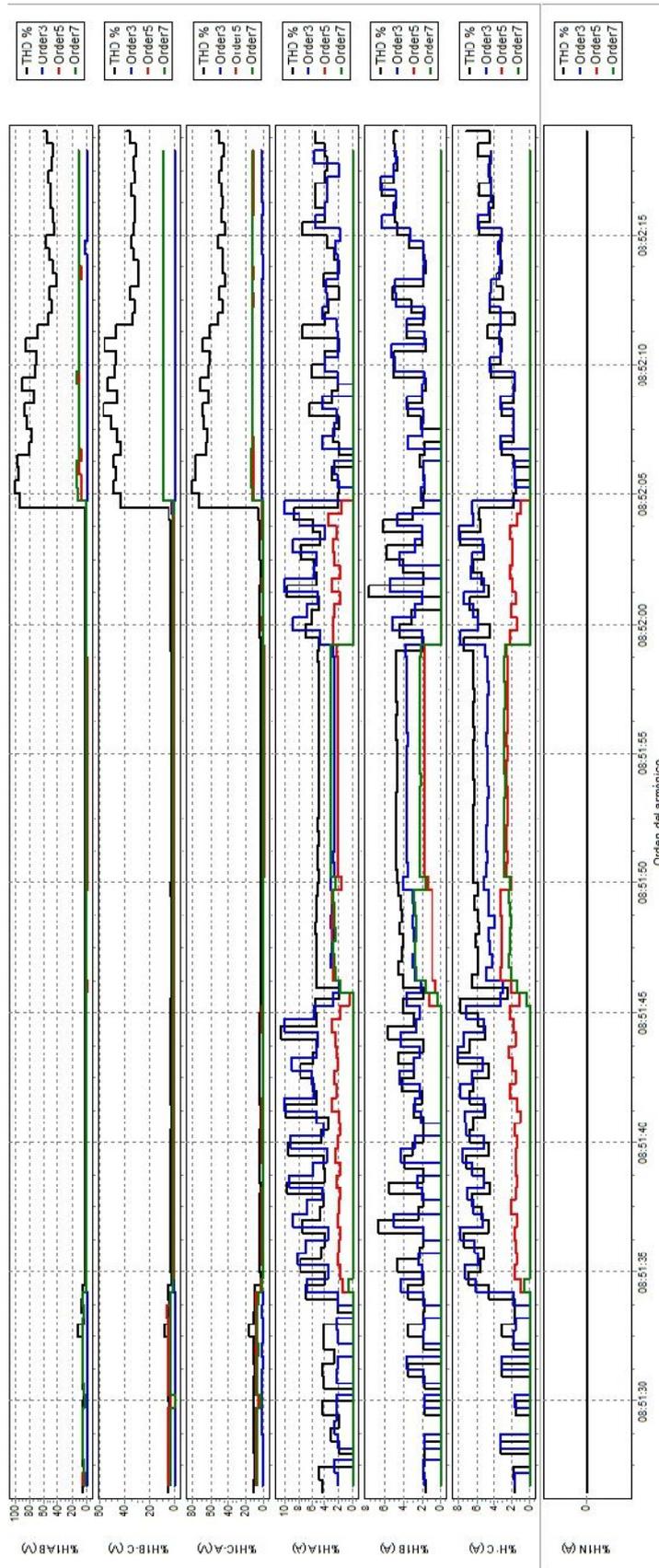


Figura9.1.22. - Evolución temporal con 12,147 g

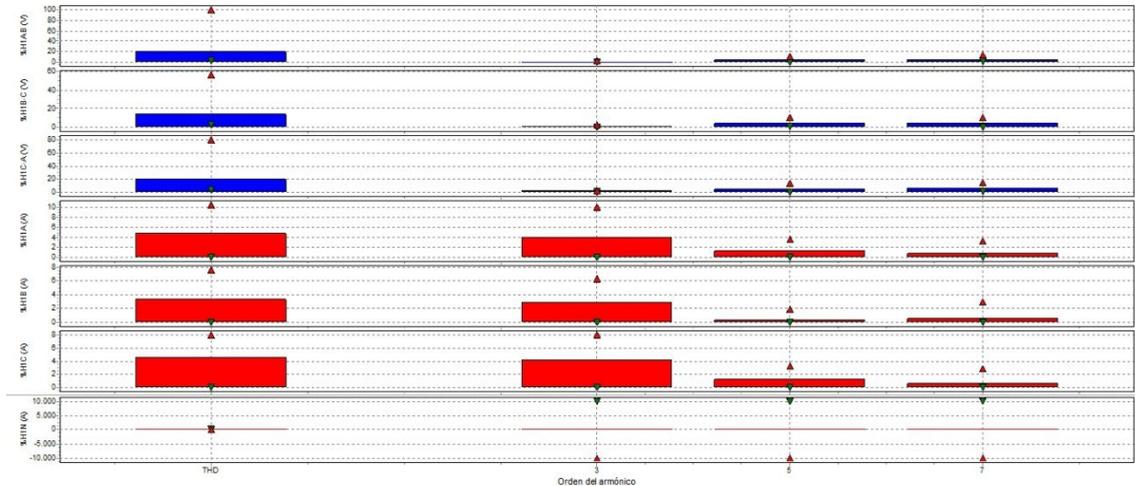


Figura 9.1.23.- Histograma con 12,174 g

Al igual que en las pruebas anteriores una vez realizado el ensayo y obtenidos los datos de funcionamiento gracias al registrador de potencia Fluke se procede a tratarlos mediante los programas Power Log y Excel obteniendo la siguiente gráfica.

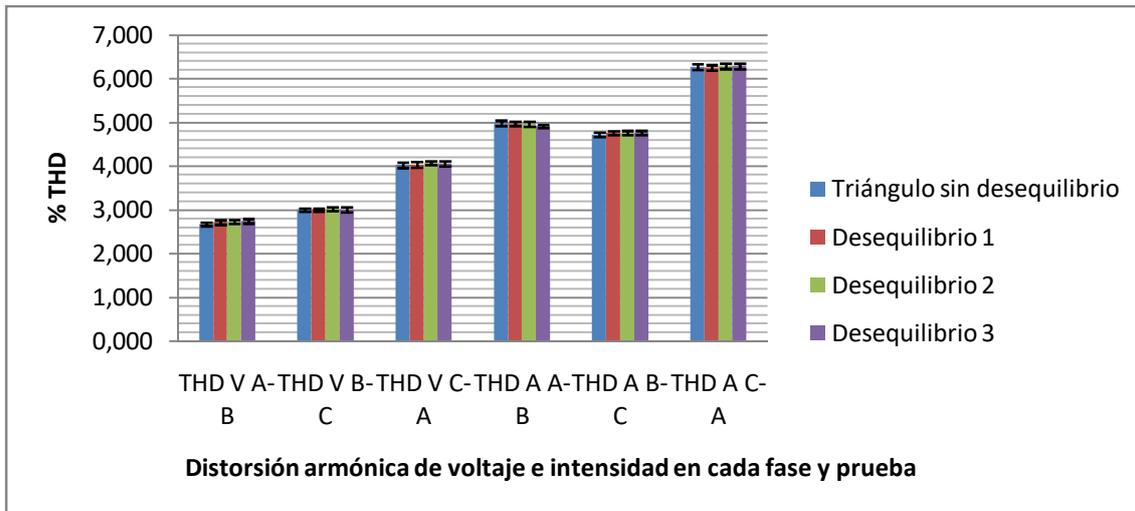


Figura 9.1.24. - THD Desequilibrio

En la gráfica obtenida no se puede observar ninguna influencia en la distorsión armónica de un desequilibrio en el rotor, siendo los desequilibrios de 5,991 g, 11,134 g y 12,147 g respectivamente.

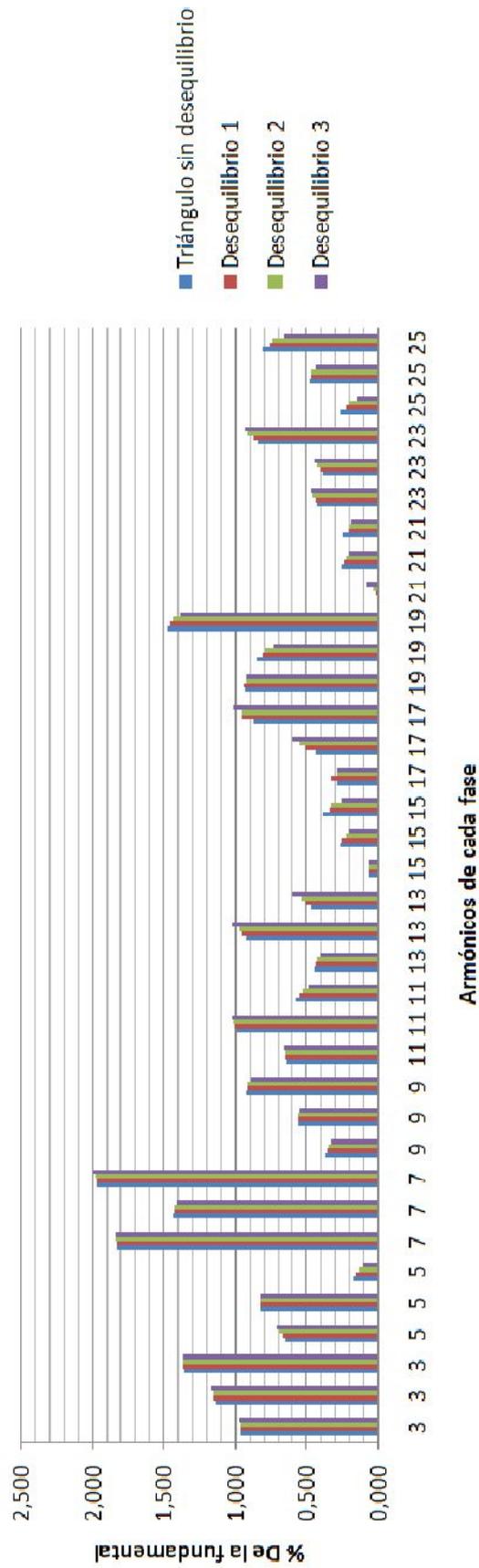


Figura 9.1.25. - Armónicos Desequilibrio

9.1.5. Prueba con rodamiento dañado

El quinto ensayo tiene como objetivo observar el efecto que tiene en los armónicos un rodamiento en mal estado.

Para ello y a lo largo de distintos días se van produciendo cada vez más desperfectos a uno de los rodamientos del motor. Inicialmente estos daños se producen introduciendo arena en el rodamiento y haciéndolo funcionar durante varias horas. En las últimas pruebas se comienza a dañar el rodamiento rompiendo la jaula que contiene las bolas, tal y como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 9.1.26. - Rodamiento con arena y jaula abierta

A diferencia del resto de pruebas, esta se realizó utilizando directamente la corriente de la red además del equipo motor-alternador, por lo que se obtuvieron datos de la misma prueba en tres situaciones distintas, conectado al alternador, a la red a 220 V y a 380 V.

En las siguientes gráficas se puede ver el voltaje, la intensidad y la distorsión armónica medidas durante las pruebas realizadas con el rodamiento lleno de arena y conectado al alternador.

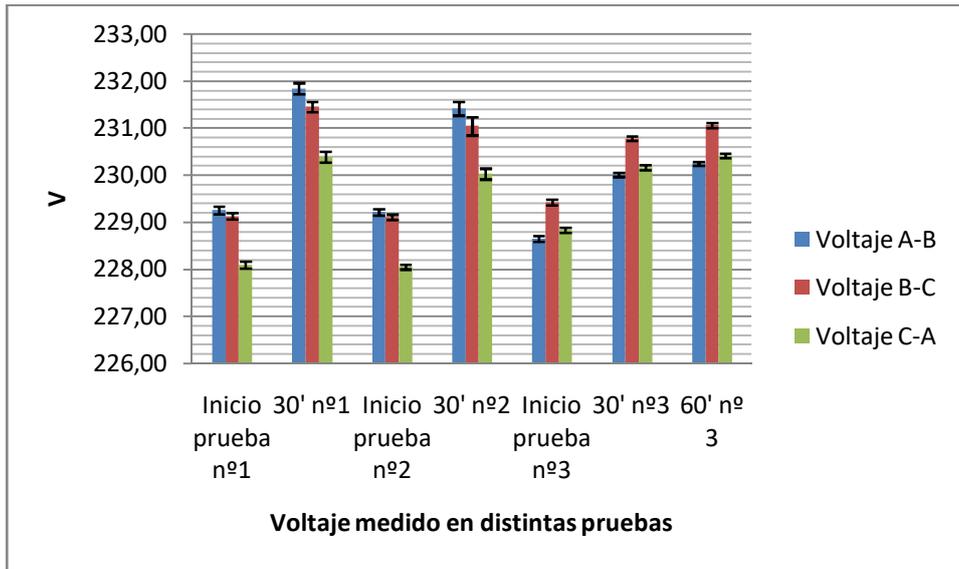


Figura 9.1.27. - Gráfica del voltaje conectado al alternador

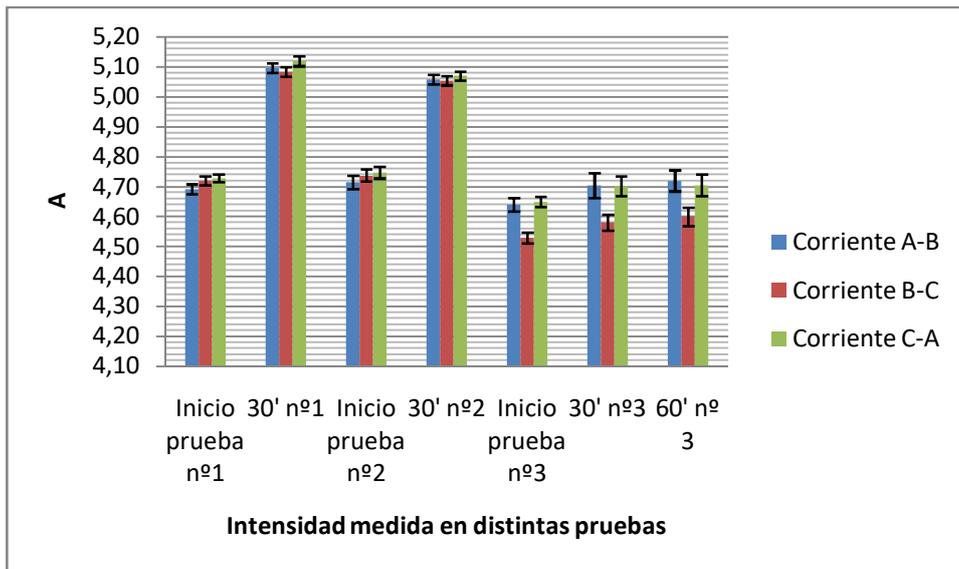


Figura 9.1.28. - Gráfica de la intensidad conectado al alternador

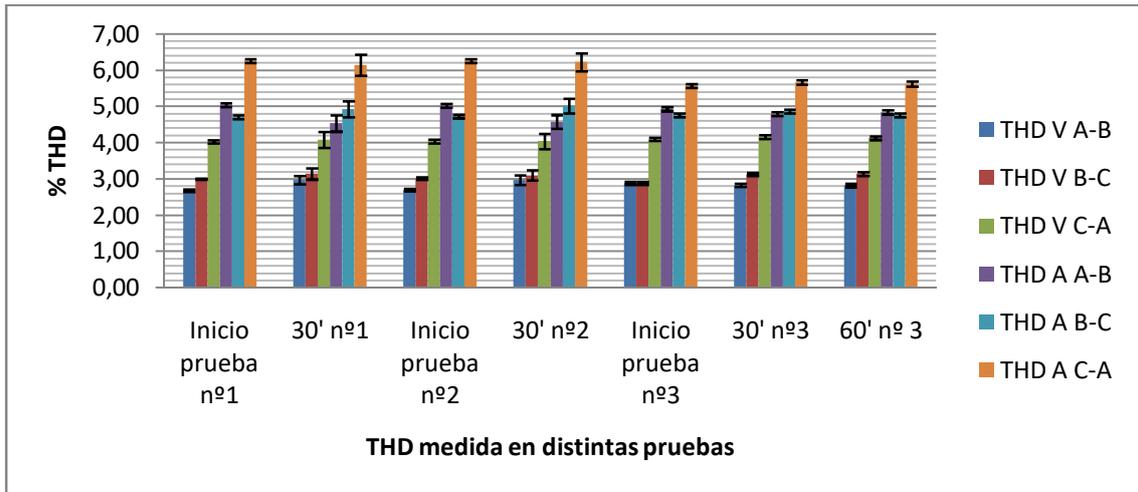


Figura 9.1.29. - Gráfica de la distorsión armónica conectado al alternador

En las siguientes gráficas se puede ver el voltaje, la intensidad y la distorsión armónica medidas durante las pruebas realizadas con el rodamiento lleno de arena, con daños en el rodamiento y conectado a la red a 220 V.

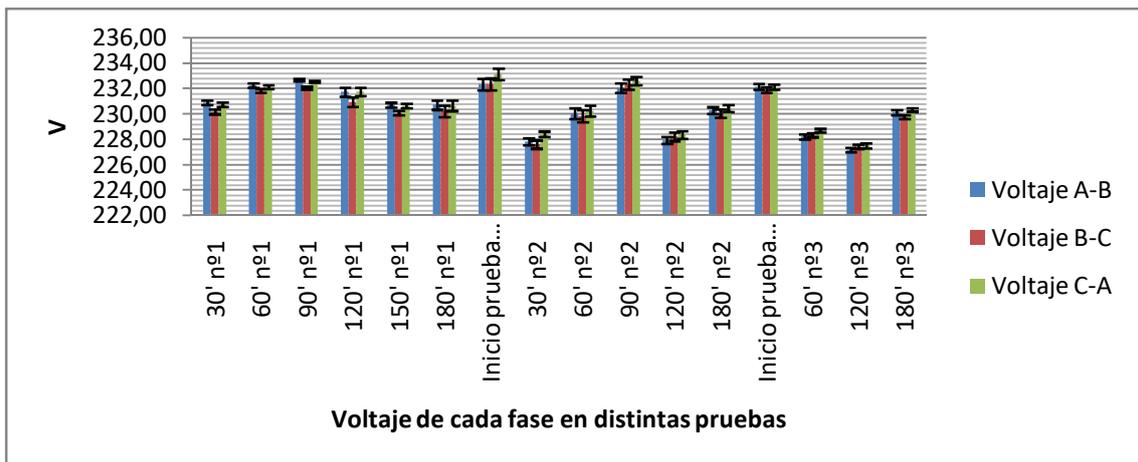


Figura 9.1.30. - Gráfica del voltaje conectado a la red a 220 V

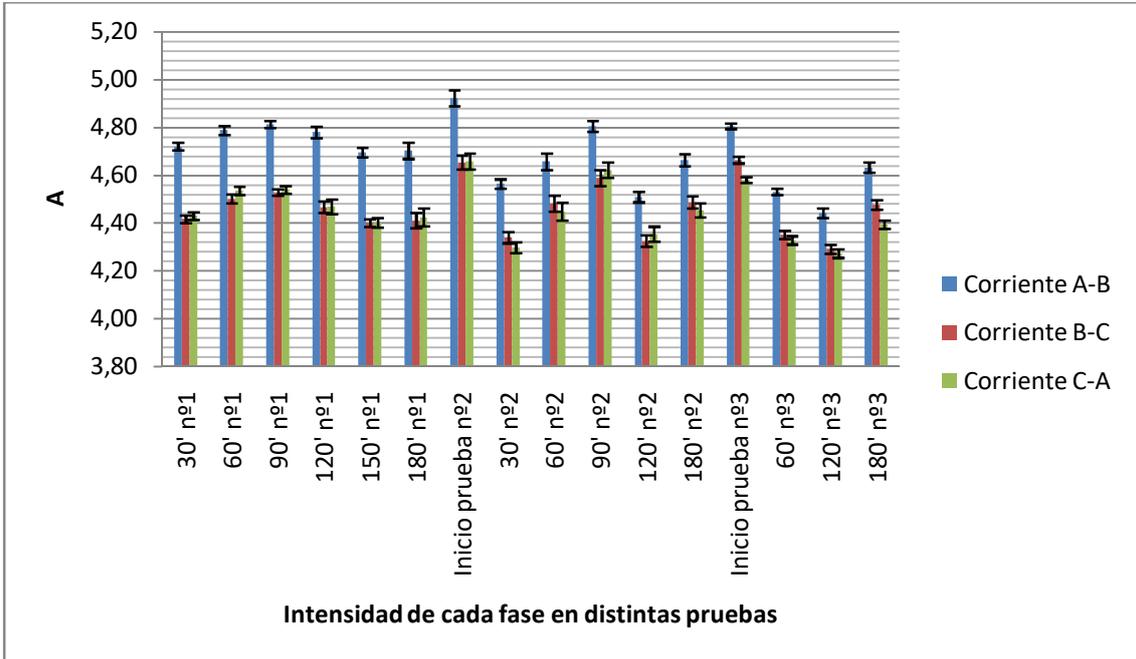


Figura 9.1.31. - Gráfica de intensidad conectado a la red a 220 V

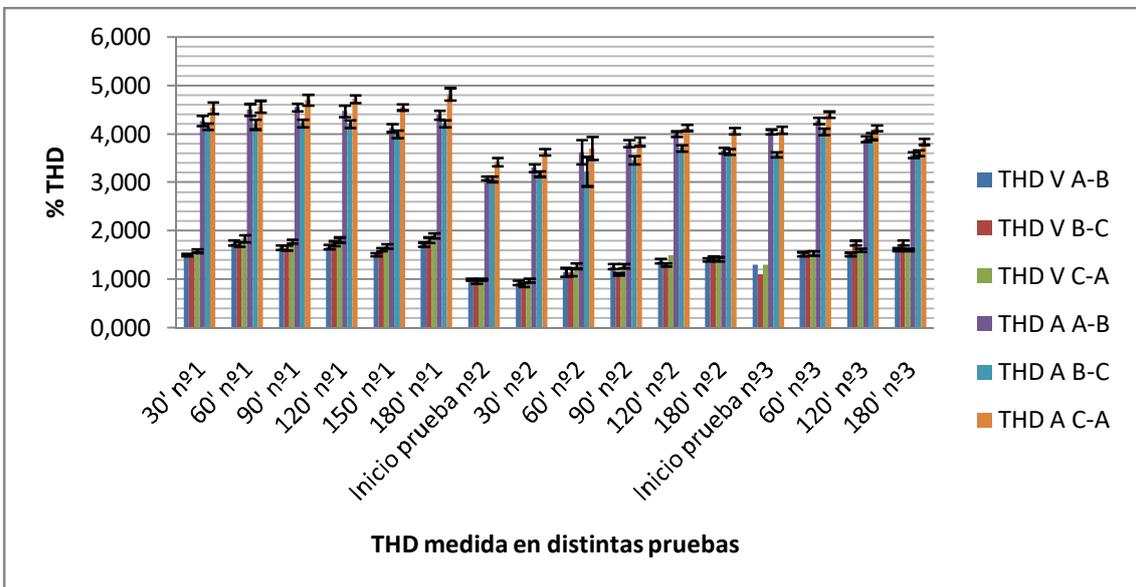


Figura 9.1.32. - Gráfica de la distorsión armónica conectado a la red a 220 V

En las siguientes gráficas se puede ver el voltaje, la intensidad y la distorsión armónica medidas durante las pruebas realizadas con el rodamiento lleno de arena, con daños en el rodamiento y conectado a la red a 380 V.

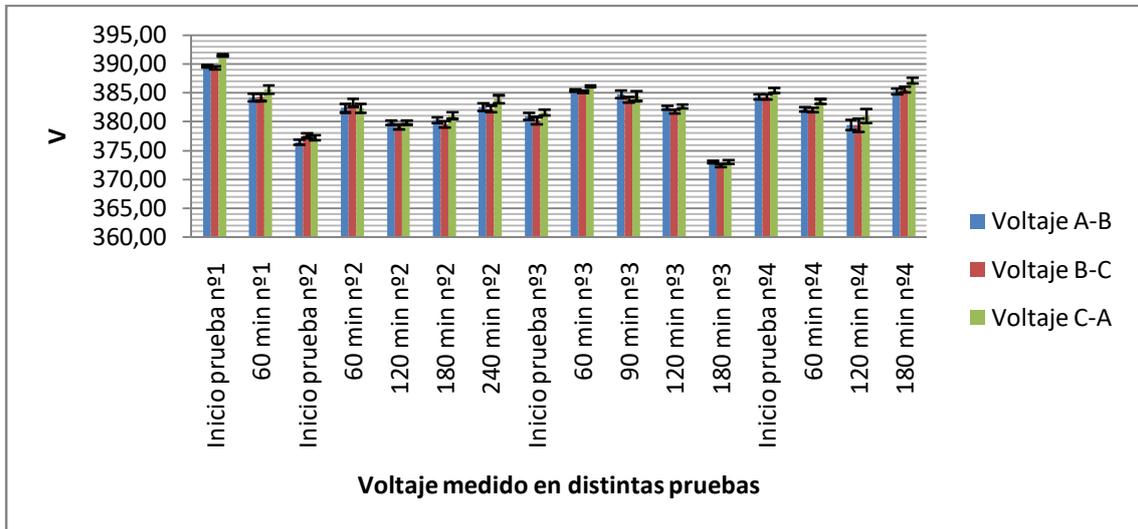


Figura 9.1.33. - Gráfica del voltaje conectado a la red a 380 V

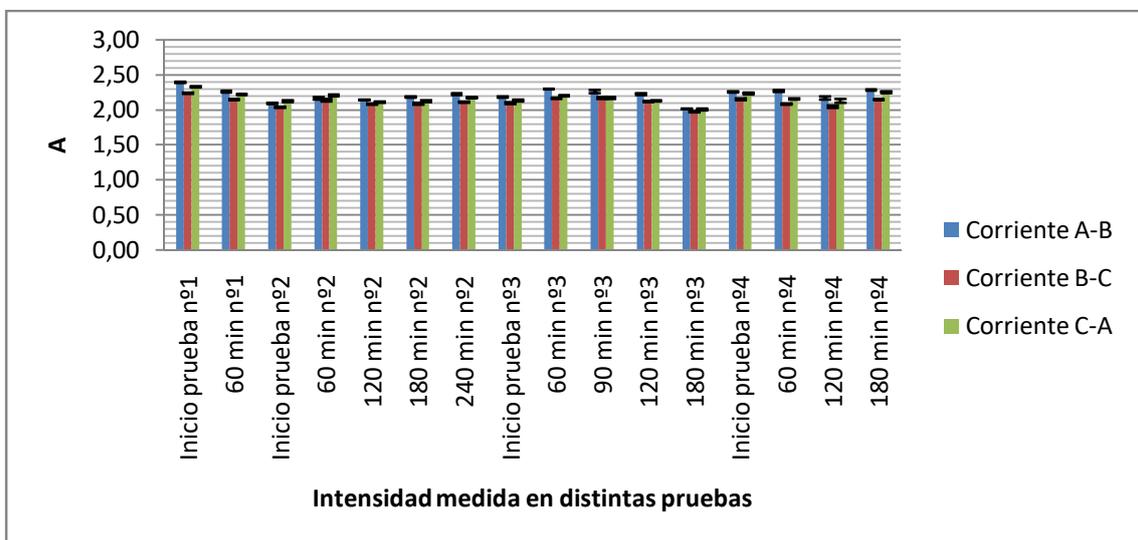


Figura 9.1.34. - Gráfica de intensidad conectado a la red a 380 V

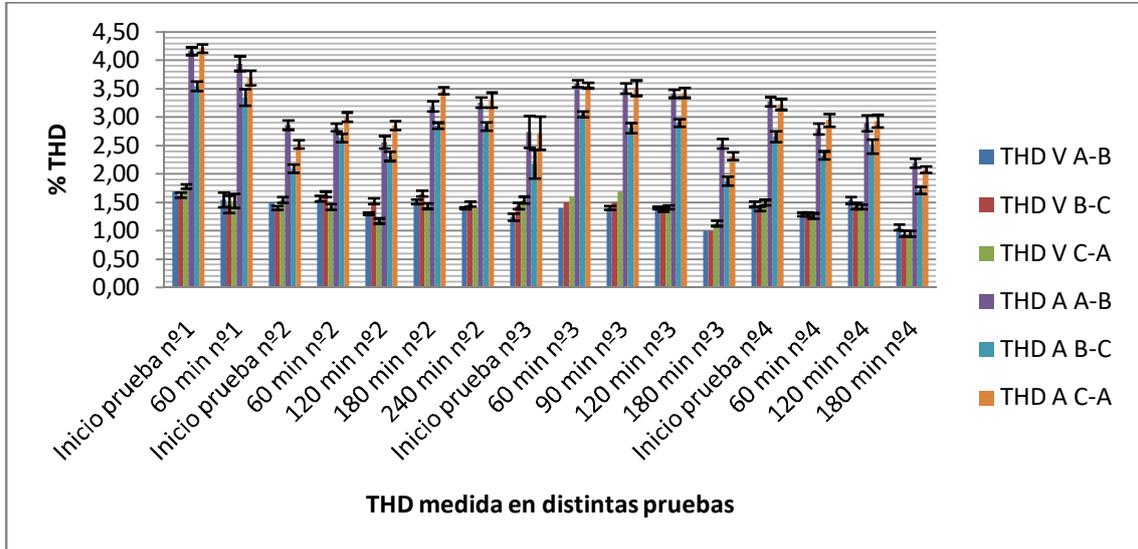


Figura 9.1.35. - Gráfica de la distorsión armónica conectado a la red a 380 V

En las siguientes gráficas se puede ver la temperatura y las vibraciones medidas en las distintas pruebas realizadas, con el alternador, a 220 V y a 380 V.

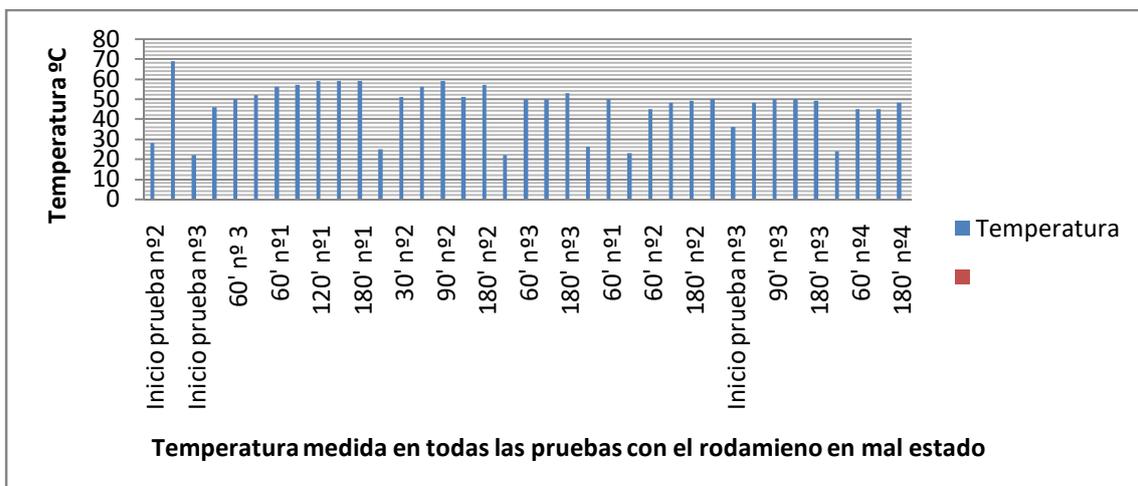


Figura 9.1.36. - Gráfica de la temperatura en las pruebas de rodamiento

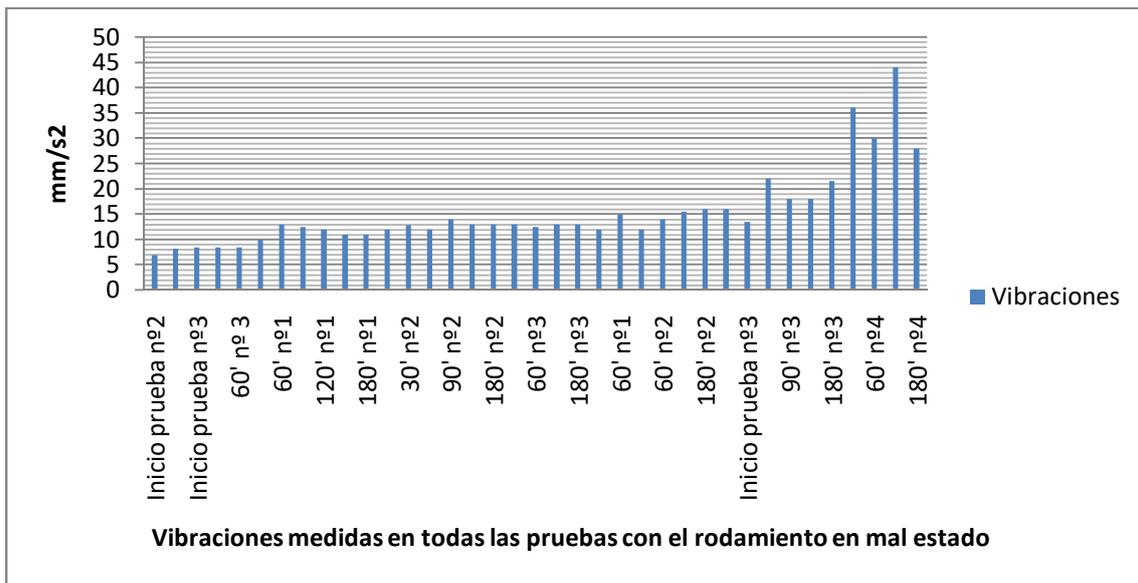


Figura 9.1.37. - Gráfica de la vibración en las pruebas con rodamiento

9.2. Análisis estadístico y multivariante

En este apartado se exponen los resultados obtenidos tras analizar con el programa de análisis estadístico QualStat la multitud de datos obtenidos de las diferentes pruebas realizadas.

El procedimiento seguido para realizar el análisis es el siguiente:

- En primer lugar, se lleva a cabo un tratamiento de los datos obtenidos mediante el Fluke con el programa Excell. Esto permite trabajar con el programa de análisis QualStat al condicionar los datos de entrada según los requiere.
- A continuación, se utiliza el programa QualStat para calcular una matriz de correlación entre todas las variables registradas en los experimentos. De esta forma se obtienen las correlaciones más significativas entre las variables.

La matriz de correlación obtenida muestra las correlaciones lineales significativas entre las diferentes variables resaltadas en amarillo. Los números absolutos grandes cerca de 1.0 indican una relación lineal fuerte, mientras que los números absolutos pequeños cerca de 0.0 indican una relación lineal débil o nula. Un coeficiente de correlación lineal absoluto entre 0.65 y 1.0 indica una relación fuerte, 0.35 y 0.65 es una relación moderada, y menos de 0.35 es una relación débil. Los coeficientes de correlación muy cercanos a 1.0 (p. Ej., > 0.999) son un indicador de colinealidad potencial. Un coeficiente de correlación igual a 1.0 o -1.0 indica una relación lineal perfecta. Las variables con una correlación perfecta son redundantes y solo se debe considerar una de las variables en el análisis.

- Por último, se realiza un análisis multivariante mediante una regresión múltiple, utilizando para ello las variables más significativas, obteniendo como resultado una ecuación que modela el comportamiento observado en cada experimento.

El análisis multivariante es un método estadístico utilizado para determinar la contribución de varios factores en un simple evento o resultado. Una vez seleccionada la variable dependiente, que es el evento a estudiar se toman las demás variables como independientes o explicativas. Este tipo de análisis puede utilizar información de múltiples variables de entrada, aunque éstas no sean linealmente independientes.

9.2.1. Derivación entre líneas

En las siguientes gráficas se muestra la matriz de correlación obtenida tras realizar el análisis estadístico para el experimento de derivación entre líneas.

	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10
Var1	1.0	-0,767081	-0,968121	-0,94123	0,630146	0,555152	0,962725	0,587753	-0,450171	0,807711
Var2	-0,767081	1.0	0,593319	0,518179	-0,912132	-0,955166	-0,909823	-0,967315	-0,221938	-0,973839
Var3	-0,968121	0,593319	1.0	0,99243	-0,428301	-0,354496	-0,872805	-0,389114	0,630371	-0,664973
Var4	-0,94123	0,518179	0,99243	1.0	-0,335498	-0,271321	-0,826202	-0,304091	0,69754	-0,608368
Var5	0,630146	-0,912132	-0,428301	-0,335498	1.0	0,862835	0,768203	0,884533	0,280934	0,797283
Var6	0,555152	-0,955166	-0,354496	-0,271321	0,862835	1.0	0,759017	0,998508	0,490342	0,922567
Var7	0,962725	-0,909823	-0,872805	-0,826202	0,768203	0,759017	1.0	0,783489	-0,194267	0,933784
Var8	0,587753	-0,967315	-0,389114	-0,304091	0,884533	0,998508	0,783489	1.0	0,456849	0,929912
Var9	-0,450171	-0,221938	0,630371	0,69754	0,280934	0,490342	-0,194267	0,456849	1.0	0,134939
Var10	0,807711	-0,973839	-0,664973	-0,608368	0,797283	0,922567	0,933784	0,929912	0,134939	1.0
Var11	0,300986	-0,702128	-0,0690109	-0,0271158	0,769324	0,728438	0,475589	0,724519	0,439465	0,62054
Var12	-0,884947	0,975695	0,753776	0,688979	-0,85559	-0,877624	-0,976823	-0,896711	-0,0173023	-0,974772
Var13	-0,97845	0,618465	0,995053	0,984947	-0,483652	-0,372585	-0,8865	-0,409178	0,622219	-0,673875
Var14	-0,960586	0,900496	0,865362	0,810717	-0,817981	-0,734518	-0,988367	-0,765017	0,210986	-0,894039
Var15	-0,985199	0,680545	0,991722	0,977664	-0,496379	-0,463408	-0,922236	-0,494162	0,5346	-0,753461
Var16	-0,941669	0,508037	0,99086	0,996858	-0,355224	-0,250189	-0,818957	-0,285989	0,718436	-0,584355
Var17	-0,992187	0,692085	0,991384	0,973712	-0,533133	-0,468545	-0,928717	-0,501645	0,534431	-0,751285
Var18	0,815856	-0,996622	-0,656003	-0,583445	0,90298	0,929833	0,939538	0,945309	0,145119	0,976243
Var19	-0,940268	0,91619	0,827586	0,785219	-0,809464	-0,763209	-0,984665	-0,787144	0,172724	-0,924736
Var20	0,939317	-0,933107	-0,826283	-0,768674	0,848469	0,786162	0,988986	0,813397	-0,135931	0,92356
Var21	-0,818834	0,292276	0,895052	0,929315	-0,196673	-0,00615843	-0,644914	-0,043326	0,86007	-0,363502
Var22	-0,839068	0,976731	0,682195	0,627624	-0,86886	-0,889336	-0,94699	-0,903566	-0,0654905	-0,973027
Var23	0,742288	-0,995848	-0,570858	-0,490067	0,901643	0,966323	0,893368	0,977269	0,263809	0,969443
Var24	-0,907943	0,964656	0,783305	0,725156	-0,839941	-0,851579	-0,986989	-0,871653	0,0377208	-0,970339
Var25	-0,0543911	0,67622	-0,169276	-0,264804	-0,689897	-0,850827	-0,316262	-0,83489	-0,86382	-0,583833
Var26	-0,86279	0,982823	0,71437	0,644816	-0,906652	-0,884973	-0,961161	-0,905799	-0,0497131	-0,958245
Var27	-0,700728	0,0952881	0,831905	0,886753	0,0443925	0,180491	-0,493036	0,148402	0,938856	-0,203803
Var28	0,849922	-0,975804	-0,714869	-0,638406	0,874375	0,89408	0,953089	0,913748	0,0793967	0,959762
Var29	0,118823	0,545522	-0,348465	-0,427702	-0,59091	-0,750917	-0,15032	-0,726983	-0,927203	-0,451686
Var30	-0,161601	0,741247	-0,0642308	-0,168938	-0,794673	-0,878608	-0,407373	-0,871538	-0,788543	-0,630495
Var31	0,529033	-0,942753	-0,310585	-0,236273	0,880545	0,981676	0,733973	0,979256	0,489502	0,900022
Var32	0,488969	-0,932726	-0,265535	-0,182904	0,894373	0,984383	0,702208	0,982473	0,539948	0,874416
Var33	0,798436	-0,973797	-0,643563	-0,556244	0,932977	0,90147	0,913508	0,923302	0,146887	0,923163
Var34	-0,671325	0,986506	0,483775	0,395893	-0,921094	-0,981233	-0,841975	-0,99023	-0,356409	-0,941639
Var35	-0,75462	0,997907	0,582719	0,502675	-0,911219	-0,960583	-0,901105	-0,972817	-0,244554	-0,968683
Var36	0,727605	-0,136945	-0,848125	-0,900213	-0,000289545	-0,140608	0,527076	-0,108068	-0,924942	0,241533
Var37	0,823225	-0,993762	-0,66063	-0,589238	0,917895	0,916781	0,940966	0,93407	0,122962	0,966133
Var38	0,888366	-0,960905	-0,746766	-0,682044	0,905903	0,837383	0,96557	0,862201	-0,0283906	0,930962
Var39	-0,761839	0,911515	0,636598	0,540737	-0,863477	-0,848738	-0,86549	-0,872273	-0,141256	-0,862851
Var40	-0,349427	0,859745	0,132615	0,0322998	-0,846016	-0,959247	-0,581904	-0,955132	-0,673828	-0,781547
Var41	-0,47617	0,913421	0,271268	0,169158	-0,893673	-0,971854	-0,684417	-0,974926	-0,558391	-0,838502
Var42	0,759384	-0,999922	-0,583812	-0,508409	0,912147	0,958593	0,904965	0,970168	0,233403	0,973329
Var43	0,514083	-0,248972	-0,544409	-0,481773	0,418465	0,060091	0,408449	0,111307	-0,415728	0,145992
Var44	0,807762	-0,996629	-0,641468	-0,568487	0,919577	0,92841	0,932646	0,944469	0,151687	0,968107
Var45	-0,719267	0,312366	0,794602	0,853138	-0,0108764	-0,125756	-0,613314	-0,134542	0,655359	-0,484778
Var46	0,753189	-0,978821	-0,572794	-0,487074	0,971933	0,915917	0,883498	0,935833	0,204291	0,911296
Var47	0,21179	-0,752554	0,0396067	0,11965	0,844509	0,843761	0,43881	0,83833	0,678207	0,636172
Var48	-0,674255	0,987921	0,480668	0,407315	-0,89649	-0,981473	-0,847011	-0,986112	-0,34107	-0,961602
Var49	-0,573307	0,921768	0,370299	0,318405	-0,80831	-0,939691	-0,758168	-0,934392	-0,384307	-0,915622
Var50	-0,744123	0,998658	0,564641	0,491285	-0,905681	-0,964255	-0,89542	-0,973907	-0,252859	-0,974903

Figura 9.2.1. – Matriz de correlación Derivación Var (1-10)

Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10	Var11
0,300986	-0,884947	-0,97845	-0,960586	-0,985199	-0,941669	-0,992187	0,815856	-0,940268	0,939317	-0,818834
-0,702128	0,975695	0,618465	0,900496	0,680545	0,508037	0,692085	-0,996622	0,91619	-0,933107	0,292276
-0,0690109	0,753776	0,995053	0,865362	0,991722	0,99086	0,991384	-0,656003	0,827586	-0,826283	0,895052
-0,0271158	0,688979	0,984947	0,810717	0,977664	0,996858	0,973712	-0,583445	0,785219	-0,768674	0,929315
0,769324	-0,85559	-0,483652	-0,817981	-0,496379	-0,355224	-0,533133	0,90298	-0,809464	0,848469	-0,196673
0,728438	-0,877624	-0,372585	-0,734518	-0,463408	-0,250189	-0,468545	0,929833	-0,763209	0,786162	-0,00615843
0,475589	-0,976823	-0,8865	-0,988367	-0,922236	-0,818957	-0,928717	0,939538	-0,984665	0,988986	-0,644914
0,724519	-0,896711	-0,409178	-0,765017	-0,494162	-0,285989	-0,501645	0,945309	-0,787144	0,813397	-0,043326
0,439465	-0,0173023	0,622219	0,210986	0,5346	0,718436	0,534431	0,145119	0,172724	-0,135931	0,86007
0,62054	-0,974772	-0,673875	-0,894039	-0,753461	-0,584355	-0,751285	0,976243	-0,924736	0,92356	-0,363502
1.0	-0,575032	-0,140116	-0,484337	-0,158739	-0,0386263	-0,187128	0,661937	-0,598564	0,546785	-0,00605146
-0,575032	1.0	0,770717	0,966301	0,82294	0,679136	0,831357	-0,989995	0,96512	-0,981972	0,470418
-0,140116	0,770717	1.0	0,888926	0,987177	0,989538	0,992727	-0,679533	0,856329	-0,851895	0,907592
-0,484337	0,966301	0,888926	1.0	0,90531	0,814863	0,92125	-0,93232	0,980202	-0,996261	0,654931
-0,158739	0,82294	0,987177	0,90531	1.0	0,970559	0,997749	-0,736051	0,879894	-0,876161	0,849
-0,0386263	0,679136	0,989538	0,814863	0,970559	1.0	0,971574	-0,574685	0,784991	-0,770513	0,946571
-0,187128	0,831357	0,992727	0,92125	0,997749	0,971574	1.0	-0,747616	0,892885	-0,891751	0,856514
0,661937	-0,989995	-0,679533	-0,93232	-0,736051	-0,574685	-0,747616	1.0	-0,940413	0,958417	-0,362212
-0,598564	0,96512	0,856329	0,980202	0,879894	0,784991	0,892885	-0,940413	1.0	-0,987202	0,646847
0,546785	-0,981972	-0,851895	-0,996261	-0,876161	-0,770513	-0,891751	0,958417	-0,987202	1.0	-0,602845
-0,00505146	0,470418	0,907592	0,654931	0,849	0,946571	0,856514	-0,362212	0,646847	-0,602845	1.0
-0,721312	0,976197	0,712222	0,931976	0,760539	0,619929	0,771549	-0,981772	0,970235	-0,958852	0,449861
0,660356	-0,968755	-0,589951	-0,882088	-0,660089	-0,476652	-0,669323	0,990986	-0,886978	0,915065	-0,239926
-0,576796	0,997524	0,801908	0,975513	0,84869	0,716536	0,857185	-0,982076	0,980497	-0,988766	0,523554
-0,667436	0,511531	-0,148882	0,309448	-0,0572253	-0,281694	-0,0477893	-0,61839	0,33147	-0,379455	-0,502978
-0,640595	0,993201	0,742092	0,964274	0,783177	0,642522	0,798725	-0,993655	0,965065	-0,982635	0,44903
0,212301	0,295399	0,825017	0,485536	0,770809	0,895278	0,766246	-0,169931	0,472963	-0,42435	0,968055
0,542058	-0,992241	-0,729273	-0,949882	-0,784579	-0,629177	-0,79442	0,987764	-0,930081	0,965733	-0,398375
-0,712486	0,352494	-0,320831	0,13879	-0,23554	-0,443124	-0,226137	-0,476129	0,194748	-0,217825	-0,609267
-0,682225	0,592516	-0,0366436	0,419233	0,0398596	-0,176852	0,0570874	-0,691844	0,421892	-0,481566	-0,401569
0,844386	-0,85033	-0,343546	-0,714485	-0,420539	-0,221954	-0,431367	0,912802	-0,771088	0,771689	-0,0231222
0,829391	-0,831384	-0,298892	-0,690806	-0,375042	-0,170741	-0,38829	0,900166	-0,735105	0,7486	0,0375603
0,591482	-0,970538	-0,668562	-0,92975	-0,712264	-0,555997	-0,730823	0,980625	-0,902057	0,9484	-0,332825
-0,69287	0,93782	0,506698	0,836874	0,577466	0,384496	0,589627	-0,974228	0,84115	-0,875544	0,145425
-0,671194	0,97285	0,604492	0,893046	0,669968	0,491498	0,680898	-0,994231	0,898611	-0,924988	0,261936
-0,16588	-0,333106	-0,844515	-0,520568	-0,790996	-0,90945	-0,787966	0,210561	-0,511644	0,461668	-0,978355
0,686117	-0,987373	-0,689669	-0,94013	-0,737552	-0,584817	-0,752507	0,998033	-0,950523	0,965291	-0,387135
0,641983	-0,981925	-0,780761	-0,978131	-0,806072	-0,686454	-0,825923	0,976748	-0,978732	0,9912	-0,51936
-0,410638	0,923927	0,645673	0,88436	0,695593	0,536856	0,70984	-0,923529	0,817551	-0,893642	0,279634
-0,695682	0,742494	0,153969	0,578124	0,240763	0,0174506	0,252353	-0,821088	0,585211	-0,635732	-0,231188
-0,670804	0,823897	0,292724	0,687151	0,37135	0,157633	0,385064	-0,886106	0,679472	-0,735202	-0,0974311
0,707051	-0,973075	-0,609004	-0,89503	-0,672153	-0,497906	-0,683544	0,995533	-0,911936	0,928618	-0,281477
-0,180178	-0,356205	-0,562631	-0,517983	-0,485051	-0,527579	-0,522912	0,301863	-0,354905	0,462374	-0,466304
0,691784	-0,984932	-0,669774	-0,930293	-0,721129	-0,56284	-0,735487	0,998752	-0,941469	0,957483	-0,35999
-0,0159938	0,463607	0,771471	0,534384	0,794677	0,825559	0,766681	-0,36242	0,59422	-0,509035	0,818684
0,709647	-0,951718	-0,611021	-0,905518	-0,647022	-0,492234	-0,671192	0,977781	-0,899553	0,932443	-0,296595
0,920133	-0,596287	-0,0184466	-0,457718	-0,0623644	0,113442	-0,0904523	0,702201	-0,52051	0,525645	0,239621
-0,770395	0,934512	0,507389	0,8278	0,580696	0,392737	0,589918	-0,97266	0,865599	-0,872328	0,179774
-0,860303	0,846007	0,40158	0,719051	0,479677	0,298894	0,48414	-0,895994	0,806646	-0,775464	0,131207
-0,72668	0,966368	0,590187	0,881595	0,656161	0,479307	0,666555	-0,991857	0,90625	-0,917977	0,265508

Figura 9.2.2. – Matriz de correlación Derivación Var (11-21)

Var22	Var23	Var24	Var25	Var26	Var27	Var28	Var29	Var30	Var31	Var32
-0,839068	0,742288	-0,907943	-0,0543911	-0,86279	-0,700728	0,849922	0,118823	-0,161601	0,529033	0,488969
0,976731	-0,995848	0,964656	0,67622	0,982823	0,0952881	-0,975804	0,545522	0,741247	-0,942753	-0,932726
0,682195	-0,570858	0,783305	-0,169276	0,71437	0,831905	-0,714869	-0,348465	-0,0642308	-0,310585	-0,265535
0,627624	-0,490067	0,725156	-0,264804	0,644816	0,886753	-0,638406	-0,427702	-0,168938	-0,236273	-0,182904
-0,86886	0,901643	-0,839941	-0,698987	-0,906652	0,0443925	0,874375	-0,59091	-0,794673	0,880545	0,894373
-0,889336	0,966323	-0,851579	-0,850827	-0,884973	0,180491	0,89408	-0,750917	-0,878608	0,981676	0,984383
-0,94699	0,893368	-0,986989	-0,316262	-0,961161	-0,493036	0,953089	-0,15032	-0,407373	0,733973	0,702208
-0,903566	0,977269	-0,871653	-0,83489	-0,905799	0,148402	0,913748	-0,726983	-0,871538	0,979256	0,982473
-0,0654905	0,263809	0,0377208	-0,86382	-0,0497131	0,938856	0,0793967	-0,927203	-0,788543	0,489502	0,539948
-0,973027	0,969443	-0,970339	-0,583833	-0,958245	-0,203803	0,959762	-0,451686	-0,630495	0,900022	0,874416
-0,721312	0,660356	-0,576796	-0,667436	-0,640595	0,212301	0,542058	-0,712486	-0,682225	0,844386	0,829391
0,976197	-0,968755	0,997524	0,511531	0,993201	0,295399	-0,992241	0,352494	0,592516	-0,85033	-0,831384
0,712222	-0,589951	0,801908	-0,148882	0,742092	0,825017	-0,729273	-0,320831	-0,0366436	-0,343546	-0,298892
0,931976	-0,882088	0,975513	0,309448	0,964274	0,485536	-0,949882	0,13879	0,419233	-0,714485	-0,690806
0,760539	-0,660089	0,84869	-0,0572253	0,783177	0,770809	-0,784579	-0,23554	0,0398596	-0,420539	-0,375042
0,619929	-0,476652	0,716536	-0,281694	0,642522	0,895278	-0,629177	-0,443124	-0,176852	-0,221954	-0,170741
0,771549	-0,669323	0,857185	-0,0477893	0,798725	0,766246	-0,79442	-0,226137	0,0570874	-0,431367	-0,38829
-0,981772	0,990986	-0,982076	-0,61839	-0,993655	-0,169931	0,987764	-0,476129	-0,691844	0,912802	0,900166
0,970235	-0,886978	0,980497	0,33147	0,965065	0,472963	-0,930081	0,194748	0,421892	-0,771088	-0,735105
-0,958852	0,915065	-0,988766	-0,379455	-0,982635	-0,42435	0,965733	-0,217825	-0,481566	0,771689	0,7486
0,449861	-0,239926	0,523554	-0,502978	0,44903	0,968055	-0,398375	-0,609267	-0,401569	-0,0231222	0,0375603
1.0	-0,955426	0,980247	0,536819	0,981649	0,259028	-0,950774	0,420545	0,603982	-0,901065	-0,872981
-0,955426	1.0	-0,952168	-0,708573	-0,971537	-0,0497468	0,978479	-0,568757	-0,770674	0,938839	0,934599
0,980247	-0,952168	1.0	0,461811	0,990379	0,350862	-0,981782	0,306949	0,544298	-0,831837	-0,80731
0,536819	-0,708573	0,461811	1.0	0,543143	-0,667883	-0,566218	0,970751	0,986209	-0,837468	-0,876506
0,981649	-0,971537	0,990379	0,543143	1.0	0,254199	-0,986893	0,394322	0,630858	-0,872286	-0,857396
0,259028	-0,0497468	0,350862	-0,667883	0,254199	1.0	-0,221328	-0,762298	-0,589017	0,180654	0,244969
-0,950774	0,978479	-0,981782	-0,566218	-0,986893	-0,221328	1.0	-0,395211	-0,650615	0,851347	0,843526
0,420545	-0,568757	0,306949	0,970751	0,394322	-0,762298	-0,395211	1.0	0,930804	-0,771834	-0,806865
0,603982	-0,770674	0,544298	0,986209	0,630858	-0,589017	-0,650615	0,930804	1.0	-0,862356	-0,904133
-0,901065	0,938839	-0,831837	-0,837468	-0,872286	0,180654	0,851347	-0,771834	-0,862356	1.0	0,995601
-0,872981	0,934599	-0,80731	-0,876506	-0,857396	0,244969	0,843526	-0,806865	-0,904133	0,995601	1.0
-0,933473	0,976729	-0,95554	-0,624278	-0,981285	-0,134266	0,988229	-0,459743	-0,717478	0,867143	0,869957
0,929472	-0,993978	0,915775	0,776464	0,948691	-0,0535042	-0,955815	0,646802	0,834703	-0,956965	-0,960624
0,96228	-0,999405	0,957935	0,695588	0,978055	0,0679121	-0,980501	0,556569	0,761361	-0,937435	-0,932227
-0,301595	0,0895476	-0,388692	0,636593	-0,294657	-0,998814	0,257766	0,732231	0,555022	-0,136671	-0,201706
-0,986179	0,983403	-0,981999	-0,60107	-0,996688	-0,187502	0,981938	-0,463563	-0,679749	0,909147	0,895545
-0,975834	0,942	-0,984828	-0,474762	-0,994267	-0,32049	0,969177	-0,328928	-0,572771	0,835924	0,817871
0,839971	-0,932552	0,899641	0,599515	0,922164	0,109128	-0,963384	0,404043	0,696366	-0,773865	-0,789475
0,745265	-0,884964	0,701242	0,953806	0,765497	-0,420599	-0,787311	0,868767	0,976221	-0,933705	-0,961102
0,809893	-0,935991	0,786773	0,898895	0,843479	-0,293425	-0,866407	0,78541	0,942142	-0,937931	-0,961896
-0,975399	0,996073	-0,961565	-0,68445	-0,980494	-0,0842112	0,9735	-0,5555	-0,74796	0,946679	0,936975
-0,214827	0,258525	-0,350894	0,115462	-0,377905	-0,382615	0,407166	0,29915	-0,0413079	-0,0113898	0,0235446
-0,984063	0,98806	-0,977807	-0,623888	-0,994156	-0,160159	0,981502	-0,487879	-0,699463	0,919442	0,907256
0,470626	-0,272609	0,513113	-0,378972	0,396957	0,848317	-0,372243	-0,44866	-0,36246	-0,127593	-0,0441346
-0,946943	0,972411	-0,939093	-0,666343	-0,977365	-0,0774651	0,962173	-0,530998	-0,755361	0,910303	0,911663
-0,687054	0,744302	-0,570858	-0,892918	-0,659437	0,462738	0,611512	-0,896246	-0,9099	0,904857	0,922413
0,958707	-0,983877	0,920661	0,752369	0,945069	-0,018309	-0,932796	0,649895	0,796515	-0,981712	-0,971795
0,921312	-0,904828	0,840262	0,732334	0,858987	-0,0562344	-0,821334	0,685898	0,744892	-0,976825	-0,952791
0,976144	-0,993706	0,955243	0,69549	0,973909	0,0686296	-0,964224	0,57427	0,753402	-0,956859	-0,945519

Figura 9.2.3. – Matriz de correlación Derivación Var (22-32)

Var33	Var34	Var35	Var36	Var37	Var38	Var39	Var40	Var41	Var42	Var43
0,798436	-0,671325	-0,75462	0,727605	0,823225	0,888366	-0,761839	-0,349427	-0,47617	0,759384	0,514083
-0,973797	0,986506	0,997907	-0,136945	-0,993762	-0,960905	0,911515	0,859745	0,913421	-0,999922	-0,248972
-0,643563	0,483775	0,582719	-0,848125	-0,66063	-0,746766	0,636598	0,132615	0,271268	-0,583812	-0,544409
-0,556244	0,395893	0,502675	-0,900213	-0,589238	-0,682044	0,540737	0,0322998	0,169158	-0,508409	-0,481773
0,932977	-0,921094	-0,911219	-0,000289545	0,917895	0,905903	-0,863477	-0,846016	-0,893673	0,912147	0,418465
0,90147	-0,981233	-0,960583	-0,140608	0,916781	0,837383	-0,848738	-0,959247	-0,971854	0,958593	0,060091
0,913508	-0,841975	-0,901105	0,527076	0,940966	0,96557	-0,86549	-0,581904	-0,684417	0,904965	0,408449
0,923302	-0,99023	-0,972817	-0,108068	0,93407	0,862201	-0,872273	-0,955132	-0,974926	0,970168	0,111307
0,146887	-0,356409	-0,244554	-0,924942	0,122962	-0,0283906	-0,141256	-0,673828	-0,558391	0,233403	-0,415728
0,923163	-0,941639	-0,968683	0,241533	0,966133	0,930962	-0,862851	-0,781547	-0,838502	0,973329	0,145992
0,591482	-0,69287	-0,671194	-0,16588	0,686117	0,641983	-0,410638	-0,695682	-0,670804	0,707051	-0,180178
-0,970538	0,93782	0,97285	-0,333106	-0,987373	-0,981925	0,923927	0,742494	0,823897	-0,973075	-0,356205
-0,668562	0,506698	0,604492	-0,844515	-0,689669	-0,780761	0,645673	0,153969	0,292724	-0,609004	-0,562631
-0,92975	0,836874	0,893046	-0,520568	-0,94013	-0,978131	0,88436	0,578124	0,687151	-0,89503	-0,517983
-0,712264	0,577466	0,669968	-0,790996	-0,737552	-0,806072	0,695593	0,240763	0,37135	-0,672153	-0,485051
-0,555997	0,384496	0,491498	-0,90945	-0,584817	-0,686454	0,536856	0,0174506	0,157633	-0,497906	-0,527579
-0,730823	0,589627	0,680898	-0,787966	-0,752507	-0,825923	0,70984	0,252353	0,385064	-0,683544	-0,522912
0,980625	-0,974228	-0,994231	0,210561	0,998033	0,976748	-0,923529	-0,821088	-0,886106	0,995533	0,301863
-0,902057	0,84115	0,898611	-0,511644	-0,950523	-0,978732	0,817551	0,585211	0,679472	-0,911936	-0,354905
0,9484	-0,875544	-0,924988	0,461668	0,965291	0,9912	-0,893642	-0,635732	-0,735202	0,928618	0,462374
-0,332825	0,145425	0,261936	-0,978355	-0,387135	-0,51936	0,279634	-0,231188	-0,0974311	-0,281477	-0,466304
-0,933473	0,929472	0,96228	-0,301595	-0,986179	-0,975834	0,839971	0,745265	0,809893	-0,975399	-0,214827
0,976729	-0,993978	0,999405	0,0895476	0,983403	0,942	-0,932552	-0,884964	-0,935991	0,996073	0,258525
-0,95554	0,915775	0,957935	-0,388692	-0,981999	-0,984828	0,899641	0,701242	0,786773	-0,961565	-0,350894
-0,624278	0,776464	0,695588	0,636593	-0,60107	-0,474762	0,599515	0,953806	0,898895	-0,68445	0,115462
-0,981285	0,948691	0,978055	-0,294657	-0,996688	-0,994267	0,922164	0,765497	0,843479	-0,980494	-0,377905
-0,134266	-0,0535042	0,0679121	-0,998814	-0,187502	-0,32049	0,109128	-0,420599	-0,293425	-0,0842112	-0,382615
0,988229	-0,955815	-0,980501	0,257766	0,981938	0,969177	-0,963384	-0,787311	-0,866407	0,9735	0,407166
-0,459743	0,646802	0,556569	0,732231	-0,463563	-0,328928	0,404043	0,868767	0,78541	-0,5555	0,29915
-0,717478	0,834703	0,761361	0,555022	-0,679749	-0,572771	0,696366	0,976221	0,942142	-0,74796	-0,0413079
0,867143	-0,956965	-0,937435	-0,136671	0,909147	0,835924	-0,773865	-0,933705	-0,937931	0,946679	-0,0113898
0,869957	-0,960624	-0,932227	-0,201706	0,895545	0,817871	-0,789475	-0,961102	-0,961896	0,936975	0,0235446
1.0	-0,967723	-0,980367	0,172718	0,979521	0,966635	-0,973264	-0,828526	-0,901993	0,971989	0,456558
-0,967723	1.0	0,992504	0,0129932	-0,966805	-0,915075	0,924139	0,928206	0,967401	-0,987753	-0,240436
-0,980367	0,992504	1.0	-0,108345	-0,988723	-0,952025	0,931721	0,876262	0,929777	-0,997899	-0,272618
0,172718	0,0129932	-0,108345	1.0	0,229273	0,361325	-0,140095	0,383897	0,255828	0,125963	0,3864
0,979521	-0,966805	-0,988723	0,229273	1.0	0,985776	-0,913416	-0,806559	-0,873675	0,99243	0,318679
0,966635	-0,915075	-0,952025	0,361325	0,985776	1.0	-0,897972	-0,708726	-0,79487	0,95769	0,421959
-0,973264	0,924139	0,931721	-0,140095	-0,913416	-0,897972	1.0	0,801895	0,881479	-0,909099	-0,552947
-0,828526	0,928206	0,876262	0,383897	-0,806559	-0,708726	0,801895	1.0	0,988444	-0,864996	-0,0745499
-0,901993	0,967401	0,929777	0,255828	-0,873675	-0,79487	0,881479	0,988444	1.0	-0,916899	-0,195697
0,971989	-0,987753	-0,997899	0,125963	0,99243	0,95769	-0,909099	-0,864996	-0,916899	1.0	0,239851
0,456558	-0,240436	-0,272618	0,3864	0,318679	0,421959	-0,552947	-0,0745499	-0,195697	0,239851	1.0
0,980021	-0,973843	-0,992548	0,201983	0,999539	0,980345	-0,915211	-0,823341	-0,886888	0,995638	0,303526
-0,244872	0,169793	0,279878	-0,855387	-0,360982	-0,421952	0,180377	-0,157386	-0,0689801	-0,305648	0,02619
0,986885	-0,972156	-0,978646	0,120127	0,983378	0,96783	-0,928835	-0,85075	-0,911855	0,978003	0,391355
0,683435	-0,801554	-0,746192	-0,419202	0,711578	0,631938	-0,570845	-0,891724	-0,856101	0,75903	-0,069504
-0,933794	0,984617	0,983837	-0,0246264	-0,968152	-0,91486	0,856028	0,899864	0,931413	-0,989693	-0,113101
-0,813455	0,906957	0,905215	0,0121434	-0,89441	-0,829439	0,691059	0,841623	0,847857	-0,925259	0,123425
-0,961486	0,986372	0,995217	-0,110833	-0,988566	-0,949724	0,892329	0,869396	0,916533	-0,999126	-0,20009

Figura 9.2.4. – Matriz de correlación Derivación Var (33-43)

Var44	Var45	Var46	Var47	Var48	Var49	Var50
0,807762	-0,719267	0,753189	0,21179	-0,674255	-0,573307	-0,744123
-0,996629	0,312366	-0,978821	-0,752554	0,987921	0,921768	0,998658
-0,641468	0,794602	-0,572794	0,0396067	0,480668	0,370299	0,564641
-0,568487	0,853138	-0,487074	0,11965	0,407315	0,318405	0,491265
0,919577	-0,0108764	0,971933	0,844509	-0,89649	-0,80831	-0,905681
0,92841	-0,125756	0,915917	0,843761	-0,981473	-0,939691	-0,964255
0,932646	-0,613314	0,883498	0,43881	-0,847011	-0,758168	-0,89542
0,944469	-0,134542	0,935833	0,83833	-0,986112	-0,934392	-0,973907
0,151687	0,655359	0,204291	0,678207	-0,34107	-0,384307	-0,252859
0,968107	-0,484778	0,911296	0,636172	-0,961602	-0,915622	-0,974903
0,691784	-0,0159938	0,709647	0,920133	-0,770395	-0,860303	-0,72668
-0,984932	0,463607	-0,951718	-0,596287	0,934512	0,846007	0,966368
-0,669774	0,771471	-0,611021	-0,0184466	0,507389	0,40158	0,590187
-0,930293	0,534384	-0,905518	-0,457718	0,8278	0,719051	0,881595
-0,721129	0,794677	-0,647022	-0,0623644	0,580696	0,479677	0,656161
-0,56284	0,825559	-0,492234	0,113442	0,392737	0,298894	0,479307
-0,735487	0,766681	-0,671192	-0,0904523	0,589918	0,48414	0,666555
0,998752	-0,36242	0,977781	0,702201	-0,97266	-0,895994	-0,991857
-0,941469	0,59422	-0,899553	-0,52051	0,865599	0,806646	0,90625
0,957483	-0,509035	0,932443	0,525645	-0,872328	-0,775464	-0,917977
-0,35999	0,818684	-0,296595	0,239621	0,179774	0,131207	0,265508
-0,984063	0,470626	-0,946943	-0,687054	0,958707	0,921312	0,976144
0,98806	-0,272609	0,972411	0,744302	-0,983877	-0,904828	-0,993706
-0,977807	0,513113	-0,939093	-0,570858	0,920661	0,840262	0,955243
-0,623888	-0,378972	-0,666343	-0,892918	0,752369	0,732334	0,69549
-0,994156	0,396957	-0,977365	-0,659437	0,945069	0,858987	0,973909
-0,160159	0,848317	-0,0774651	0,462738	-0,018309	-0,0562344	0,0686296
0,981502	-0,372243	0,962173	0,611512	-0,932796	-0,821334	-0,964224
-0,487879	-0,44866	-0,530998	-0,896246	0,649895	0,685898	0,57427
-0,699463	-0,36246	-0,755361	-0,9099	0,796515	0,744892	0,753402
0,919442	-0,127593	0,910303	0,904857	-0,981712	-0,976825	-0,956859
0,907256	-0,0441346	0,911663	0,922413	-0,971795	-0,952791	-0,945519
0,980021	-0,244872	0,986885	0,683435	-0,933794	-0,813455	-0,961486
-0,973843	0,169793	-0,972156	-0,801554	0,984617	0,906957	0,986372
-0,992548	0,279878	-0,978646	-0,746192	0,983837	0,905215	0,995217
0,201983	-0,855387	0,120127	-0,419202	-0,0246264	0,0121434	-0,110833
0,999539	-0,360982	0,983378	0,711578	-0,968152	-0,89441	-0,988566
0,980345	-0,421952	0,96783	0,631938	-0,91486	-0,829439	-0,949724
-0,915211	0,180377	-0,928835	-0,570845	0,856028	0,691059	0,892329
-0,823341	-0,157386	-0,85075	-0,891724	0,899864	0,841623	0,869396
-0,886888	-0,0689801	-0,911855	-0,856101	0,931413	0,847857	0,916533
0,995638	-0,305648	0,978003	0,75903	-0,989693	-0,925259	-0,999126
0,303526	0,02619	0,391355	-0,069504	-0,113101	0,123425	-0,20009
1.0	-0,343657	0,98438	0,725301	-0,974512	-0,901915	-0,992353
-0,343657	1.0	-0,198002	0,237559	0,256812	0,295909	0,307693
0,98438	-0,198002	1.0	0,775097	-0,954359	-0,862258	-0,971636
0,725301	0,237559	0,775097	1.0	-0,82156	-0,84447	-0,772576
-0,974512	0,256812	-0,954359	-0,82156	1.0	0,964883	0,994313
-0,901915	0,295909	-0,862258	-0,84447	0,964883	1.0	0,940176
-0,992353	0,307693	-0,971636	-0,772576	0,994313	0,940176	1.0

Figura 9.2.5. – Matriz de correlación Derivación Var (44-50)

Tras obtener las correlaciones entre las variables más importantes se realiza el análisis multivariante como se muestra en la siguiente figura:

Model Description

In order to predict **Var1**, the following variables are used: **Var13, Var15, Var17**

Analysis of Variance Information for Model

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F Value
Regression	0,17150239	3	0,05716746	151,3936
Error	0,00037761	1	0,00037761	
Total	0,17188000	4		

Anova Statistics

Prob > F	R ²	Adj R ²	Std Error	Durbin-Watson
0,0597	0,99780	0,99121	0,01943	3,516941

Parameter Estimates

The following table contains the estimates of the parameters for the model. For example, in the model $Y=B_0+B_1*Var1$, B_0 is the intercept and B_1 is the coefficient for $Var1$.

Parameter	Estimate	Std Estimate	t for H ₀ : Param=0	Std Err of Estimate	95% Confidence Interval		Prob > t
					Lower Limit	Upper Limit	
Intercept	9,83915		9,7506	1,00908	-2,98241	22,66072	0,0651
Var13 remove	1,00722	0,83195	1,9484	0,51693	-5,56105	7,57548	0,3019
Var15 remove	13,8738	1,67062	2,1794	6,36585	-67,01193	94,75948	0,2739
Var17 remove	-21,0979	-3,48495	-3,4288	6,15322	-99,28196	57,08607	0,1807

Model Equation

$$Var1 = 9,839152520688376 + 1,007215907001761 * Var13 + 13,87377070526287 * Var15 - 21,097944828359 * Var17$$

Residual Statistics

Statistic	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Residual	-0,014076	0,011030	0,000000	0,00971607
Std Residual	-0,724342	0,567619	0,000000	0,50000000
Stu Residual	-1,000000	1,000000	-0,200000	1,09544512
Cook's Dist	0,226489	210,584353	44,448997	92,94428492

Search Procedure

No Search Procedure Selected.

Figura 9.2.6. – Análisis multivariante de Derivación entre líneas.

Las variables significativas en este caso son la Var13 (THD A B-C), Var15 (Armónicos V3 A-B) y Var17 (Armónicos V3 C-A), que sirven para generar la siguiente ecuación, con un $R^2 = 0,99780$:

$$Var1 = 9,839152520688376 + 1,007215907001761 * Var13 + 13,87377070526287 * Var15 - 21,097944828359 * Var17$$

A partir de ella podemos realizar una comparativa entre los datos reales de derivación de corriente entre líneas y los valores calculados mediante la ecuación resultante del análisis:

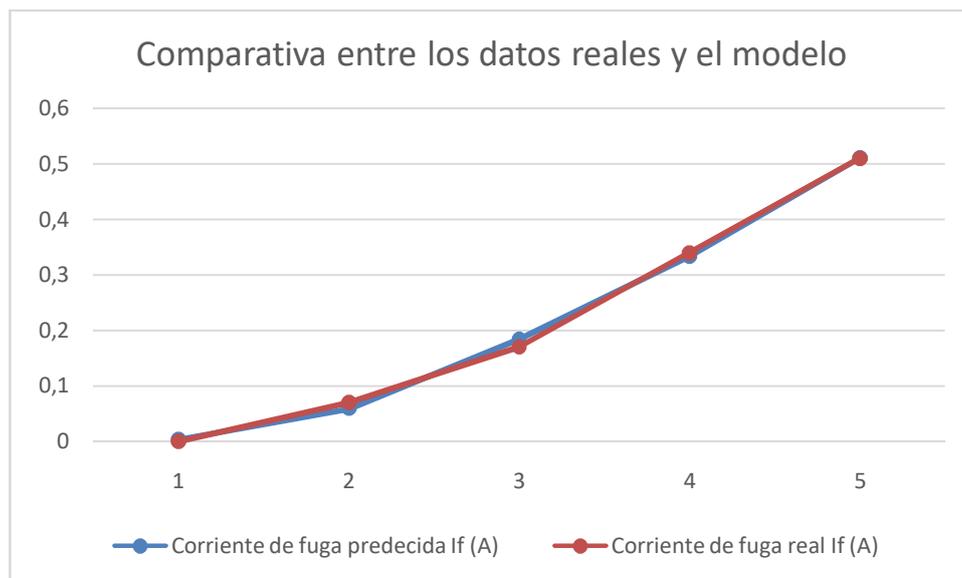


Figura 9.2.7. – Comparativa entre los datos reales y el modelo de derivación.

En la gráfica se puede ver como prácticamente las dos curvas, la obtenida experimentalmente y la calculada mediante la fórmula obtenida, quedan superpuestas la una sobre la otra. Esto demuestra la gran coincidencia entre los valores reales y el modelo teórico.

9.2.2. Desequilibrio del rotor

En las siguientes gráficas se muestra la matriz de correlación obtenida tras realizar el análisis estadístico para el experimento de desequilibrio del rotor.

	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10
Var1	1.0	-0,883606	0,792137	0,96522	0,903631	0,881015	0,869068	0,888021	0,983827	0,706509
Var2	-0,883606	1.0	-0,954262	-0,926597	-0,991197	-0,999985	-0,99542	-0,998539	-0,911444	-0,380641
Var3	0,792137	-0,954262	1.0	0,908208	0,906445	0,954898	0,926463	0,966193	0,871312	0,143494
Var4	0,96522	-0,926597	0,908208	1.0	0,912318	0,924898	0,895948	0,940042	0,996102	0,499894
Var5	0,903631	-0,991197	0,906445	0,912318	1.0	0,990834	0,996324	0,984244	0,907726	0,480999
Var6	0,881015	-0,999985	0,954898	0,924898	0,990834	1.0	0,995512	0,998466	0,909359	0,376197
Var7	0,869068	-0,99542	0,926463	0,895948	0,996324	0,995512	1.0	0,988801	0,884335	0,405766
Var8	0,888021	-0,998539	0,966193	0,940042	0,984244	0,998466	0,988801	1.0	0,92291	0,364469
Var9	0,983827	-0,911444	0,871312	0,996102	0,907726	0,909359	0,884335	0,92291	1.0	0,573971
Var10	0,706509	-0,380641	0,143494	0,499894	0,480999	0,376197	0,405766	0,364469	0,573971	1.0
Var11	0,872047	-0,610096	0,407377	0,714831	0,688302	0,606109	0,623845	0,599476	0,772989	0,962035
Var12	-0,73468	0,966807	-0,948584	-0,81455	-0,943916	-0,968197	-0,96872	-0,961932	-0,782803	-0,169269
Var13	0,895587	-0,702611	0,718542	0,918607	0,683641	0,699442	0,648839	0,729923	0,926394	0,538271
Var14	0,657304	-0,668622	0,419361	0,511634	0,757543	0,667699	0,730213	0,630954	0,550498	0,716927
Var15	0,862333	-0,967435	0,991761	0,954157	0,929977	0,967377	0,939168	0,979514	0,926995	0,259737
Var16	0,87951	-0,962471	0,985226	0,96638	0,926422	0,962162	0,932119	0,975729	0,941817	0,288701
Var17	0,916033	-0,937233	0,955708	0,98849	0,905353	0,936238	0,901423	0,95362	0,971126	0,364175
Var18	0,945892	-0,987613	0,928908	0,966683	0,98671	0,986739	0,97841	0,988742	0,961725	0,493507
Var19	-0,597155	0,866898	-0,770753	-0,618629	-0,878582	-0,868808	-0,902993	-0,843119	-0,599377	-0,21
Var20	-0,92585	0,994979	-0,936155	-0,951298	-0,99318	-0,994414	-0,989005	-0,994278	-0,943507	-0,461761
Var21	0,935431	-0,980682	0,883903	0,927823	0,996038	0,979834	0,984873	0,974257	0,929955	0,55144
Var22	-0,871647	0,990804	-0,983976	-0,943703	-0,965614	-0,990858	-0,973898	-0,996366	-0,92086	-0,305883
Var23	0,93003	-0,980266	0,880723	0,92111	0,996669	0,979474	0,986019	0,972963	0,923279	0,549598
Var24	-0,86263	0,998974	-0,953895	-0,909193	-0,989362	-0,999193	-0,996715	-0,996225	-0,891912	-0,353364
Var25	-0,788181	0,984542	-0,9623	-0,860456	-0,963913	-0,985491	-0,982695	-0,981685	-0,832879	-0,230243
Var26	-0,872611	0,999456	-0,962919	-0,924113	-0,986464	-0,999568	-0,993135	-0,998994	-0,906132	-0,351089
Var27	0,91286	-0,986049	0,892074	0,912067	0,999302	0,98552	0,992627	0,97828	0,910771	0,513072
Var28	0,938302	-0,97207	0,863943	0,919872	0,992785	0,971093	0,978903	0,964172	0,925463	0,581886
Var29	-0,923496	0,994809	-0,949113	-0,959121	-0,987372	-0,994277	-0,984731	-0,996435	-0,948572	-0,43625
Var30	-0,900826	0,99448	-0,917761	-0,916886	-0,999617	-0,994188	-0,997577	-0,988669	-0,909886	-0,460804
Var31	0,936384	-0,991711	0,933973	0,960283	0,989915	0,99099	0,983753	0,992132	0,953714	0,476177
Var32	0,922125	-0,995558	0,933056	0,945527	0,995188	0,995039	0,991332	0,993869	0,938005	0,462819
Var33	0,828187	-0,690291	0,453842	0,669927	0,777377	0,687615	0,728118	0,665832	0,721106	0,896699
Var34	-0,898823	0,946628	-0,807099	-0,857558	-0,980938	-0,945828	-0,966586	-0,931419	-0,868116	-0,606438
Var35	-0,90218	0,986898	-0,975921	-0,965477	-0,964527	-0,986555	-0,967186	-0,994028	-0,946959	-0,355596
Var36	-0,242017	0,302936	-0,0301966	-0,0649824	-0,409602	-0,303063	-0,3912	-0,251743	-0,10786	-0,52838
Var37	0,963764	-0,974984	0,918078	0,980361	0,974481	0,973774	0,961786	0,978396	0,978288	0,523963
Var38	0,916432	-0,943491	0,959104	0,988034	0,912508	0,942554	0,909156	0,959023	0,970726	0,364389
Var39	-0,668252	0,704678	-0,466181	-0,536729	-0,787423	-0,704006	-0,764586	-0,66784	-0,570535	-0,682345
Var40	-0,904159	0,990762	-0,97243	-0,962466	-0,971369	-0,990431	-0,973609	-0,996429	-0,945133	-0,36759
Var41	-0,897933	0,998434	-0,961568	-0,944983	-0,986342	-0,998243	-0,988951	-0,999741	-0,929737	-0,385102
Var42	0,824618	-0,992992	0,95001	0,87744	0,981745	0,993591	0,994261	0,988303	0,856593	0,305819
Var43	-0,937825	0,98649	-0,949045	-0,975582	-0,976385	-0,985713	-0,971101	-0,991136	-0,965825	-0,447427
Var44	-0,98633	0,860966	-0,814498	-0,982542	-0,862679	-0,85833	-0,831059	-0,874172	-0,993631	-0,630286
Var45	0,981945	-0,931485	0,815374	0,941886	0,958953	0,929579	0,931804	0,927356	0,958017	0,685728
Var46	0,961716	-0,976571	0,92062	0,979695	0,975521	0,975402	0,963455	0,979933	0,97705	0,518355
Var47	0,969567	-0,967425	0,878773	0,959816	0,980977	0,966049	0,963407	0,965654	0,965322	0,592451
Var48	-0,900165	0,998818	-0,957611	-0,943693	-0,988612	-0,998601	-0,990538	-0,999439	-0,929468	-0,395134
Var49	-0,796988	0,982968	-0,983079	-0,884296	-0,953165	-0,983813	-0,972408	-0,985041	-0,853463	-0,204375
Var50	-0,867669	0,996738	-0,975274	-0,930661	-0,977345	-0,99689	-0,985758	-0,998929	-0,909575	-0,321026

Figura 9.2.8. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (1-10)

Var1	Var12	Var13	Var14	Var15	Var16	Var17	Var18	Var19	Var20	Var21
0,872047	-0,73468	0,895587	0,657304	0,862333	0,87951	0,916033	0,945892	-0,597155	-0,92585	0,935431
-0,610096	0,966807	-0,702611	-0,668622	-0,967435	-0,962471	-0,937233	-0,987613	0,866898	0,994979	-0,980682
0,407377	-0,948584	0,718542	0,419361	0,991761	0,985226	0,955708	0,928908	-0,770753	-0,936155	0,883903
0,714831	-0,81455	0,918607	0,511634	0,954157	0,96638	0,98849	0,966683	-0,618629	-0,951298	0,927823
0,688302	-0,943916	0,683641	0,757543	0,929977	0,926422	0,905353	0,98671	-0,878582	-0,99318	0,996038
0,606109	-0,968197	0,699442	0,667699	0,967377	0,962162	0,936238	0,986739	-0,868808	-0,994414	0,979834
0,623845	-0,96872	0,648839	0,730213	0,939168	0,932119	0,901423	0,97841	-0,902993	-0,989005	0,984873
0,599476	-0,961932	0,729923	0,630954	0,979514	0,975729	0,95362	0,988742	-0,843119	-0,994278	0,974257
0,772989	-0,782803	0,926394	0,550498	0,926995	0,941817	0,971296	0,961725	-0,599377	-0,943507	0,929955
0,962035	-0,169269	0,538271	0,716927	0,259737	0,288701	0,364175	0,493507	-0,21	-0,461761	0,55144
1.0	-0,410539	0,705283	0,763987	0,513348	0,539022	0,602588	0,709338	-0,39274	-0,680997	0,747981
-0,410539	1.0	-0,52673	-0,615007	-0,929549	-0,91291	-0,856223	-0,914799	0,932517	0,936547	-0,911406
0,705283	-0,52673	1.0	0,259336	0,79081	0,819005	0,886939	0,790771	-0,258963	-0,754049	0,723497
0,763987	-0,615007	0,259336	1.0	0,464739	0,459511	0,438813	0,673326	-0,779631	-0,685837	0,770685
0,513348	-0,929549	0,79081	0,464739	1.0	0,99886	0,983955	0,961151	-0,745945	-0,961956	0,918543
0,539022	-0,91291	0,819005	0,459511	0,99886	1.0	0,991349	0,963597	-0,721052	-0,961507	0,918959
0,602588	-0,856223	0,886939	0,438813	0,983955	0,991349	1.0	0,958695	-0,643654	-0,948659	0,908867
0,709338	-0,914799	0,790771	0,673326	0,961151	0,963597	0,958695	1.0	-0,795411	-0,998136	0,989917
-0,39274	0,932517	-0,258963	-0,779631	-0,745945	-0,721052	-0,643654	-0,795411	1.0	0,829619	-0,841457
-0,680997	0,936547	-0,754049	-0,685837	-0,961956	-0,961507	-0,948659	-0,998136	0,829619	1.0	-0,991559
0,747981	-0,911406	0,723497	0,770685	0,918543	0,918959	0,908867	0,989917	-0,841457	-0,991559	1.0
-0,55147	0,959108	-0,745707	-0,562731	-0,992524	-0,988793	-0,966767	-0,978958	0,815394	0,983827	-0,953051
0,745047	-0,913844	0,71118	0,779249	0,91438	0,914138	0,902285	0,987645	-0,849861	-0,990198	0,999841
-0,584089	0,97686	-0,670866	-0,672498	-0,96207	-0,954969	-0,923938	-0,979712	0,886487	0,989814	-0,97525
-0,471781	0,996377	-0,594698	-0,623657	-0,953083	-0,94031	-0,893923	-0,945205	0,911834	0,962071	-0,938093
-0,585351	0,971855	-0,69878	-0,647428	-0,972654	-0,966938	-0,93961	-0,983869	0,866205	0,991987	-0,973729
0,713931	-0,931573	0,688253	0,774669	0,919797	0,917362	0,899453	0,985944	-0,871237	-0,991189	0,998214
0,77032	-0,897584	0,717134	0,792493	0,90213	0,903233	0,895178	0,98449	-0,837418	-0,985515	0,999154
-0,661719	0,937283	-0,769397	-0,651997	-0,973156	-0,973016	-0,960925	-0,997804	0,81558	0,998963	-0,984862
-0,673035	0,95004	-0,688706	-0,740037	-0,939177	-0,93533	-0,913378	-0,988358	0,877349	0,995015	-0,994292
0,694286	-0,925968	0,774447	0,67707	0,96294	0,963996	0,955265	0,999575	-0,811426	-0,999477	0,99069
0,680737	-0,939529	0,74244	0,697099	0,958162	0,957101	0,942607	0,997081	-0,839118	-0,99982	0,992943
0,94597	-0,55201	0,535765	0,931679	0,535484	0,547116	0,571822	0,747641	-0,620809	-0,738155	0,816866
-0,77483	0,883134	-0,625145	-0,866094	-0,843792	-0,84183	-0,825962	-0,952027	0,873613	0,957735	-0,985774
-0,596196	0,936707	-0,790738	-0,561024	-0,993163	-0,992942	-0,980516	-0,986614	0,781401	0,987063	-0,958239
-0,478321	0,313211	0,202266	-0,889229	-0,0518489	-0,0368075	0,00596623	-0,278584	0,609841	0,30431	-0,411655
0,735703	-0,886562	0,829821	0,65276	0,95717	0,962866	0,966923	0,997587	-0,752237	-0,9915	0,982959
0,603345	-0,865163	0,879455	0,451325	0,986413	0,993115	0,999829	0,962991	-0,657691	-0,953912	0,915137
-0,744758	0,661094	-0,26937	-0,997986	-0,505751	-0,498601	-0,472187	-0,702293	0,817666	0,717022	-0,795981
-0,605805	0,941406	-0,780792	-0,582871	-0,990034	-0,989341	-0,975631	-0,98961	0,795145	0,990839	-0,965056
-0,617361	0,956426	-0,739213	-0,639674	-0,977763	-0,974871	-0,955215	-0,99188	0,838039	0,996373	-0,978315
0,538014	-0,989067	0,617269	0,673769	0,949902	0,939371	0,899093	0,962609	-0,913669	-0,977076	0,961783
-0,673353	0,917106	-0,809398	-0,61914	-0,977573	-0,980143	-0,975457	-0,997416	0,775702	0,994895	-0,977536
-0,810815	0,70825	-0,95332	-0,524943	-0,881882	-0,901684	-0,945324	-0,927712	0,516469	0,903239	-0,894179
0,855415	-0,814769	0,800795	0,766732	0,873458	0,882943	0,898169	0,971358	-0,730284	-0,961789	0,98032
0,73115	-0,889973	0,826937	0,652185	0,958791	0,964149	0,967265	0,998012	-0,755992	-0,992337	0,983327
0,786683	-0,873142	0,797957	0,728013	0,923801	0,929549	0,934034	0,992965	-0,772153	-0,987557	0,992981
-0,625343	0,955856	-0,736242	-0,650683	-0,974676	-0,971807	-0,952236	-0,992715	0,841712	0,997281	-0,981083
-0,455358	0,988702	-0,642021	-0,56105	-0,974283	-0,963546	-0,922564	-0,948176	0,872132	0,961898	-0,928338
-0,561813	0,97027	-0,714446	-0,607196	-0,982965	-0,977611	-0,951201	-0,980988	0,848054	0,988288	-0,963618

Figura 9.2.9. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (11-21)

Var22	Var23	Var24	Var25	Var26	Var27	Var28	Var29	Var30	Var31	Var32
-0,871647	0,93003	-0,86263	-0,788181	-0,872611	0,91286	0,938302	-0,923496	-0,900826	0,936384	0,922125
0,990804	-0,980266	0,998974	0,984542	0,999456	-0,986049	-0,97207	0,994809	0,99448	-0,991711	-0,995558
-0,983976	0,880723	-0,953895	-0,9623	-0,962919	0,892074	0,863943	-0,949113	-0,917761	0,933973	0,933056
-0,943703	0,92111	-0,909193	-0,860456	-0,924113	0,912067	0,919872	-0,959121	-0,916686	0,960283	0,945527
-0,965614	0,996669	-0,989362	-0,963913	-0,986464	0,999302	0,992785	-0,987372	-0,999617	0,989915	0,995188
-0,990858	0,979474	-0,999193	-0,985491	-0,999568	0,98552	0,971093	-0,994277	-0,994188	0,99099	0,995039
-0,973898	0,986019	-0,996715	-0,982695	-0,993135	0,992627	0,978903	-0,984731	-0,997577	0,983753	0,991332
-0,996366	0,972963	-0,996225	-0,981685	-0,998994	0,97828	0,964172	-0,996435	-0,988669	0,992132	0,993869
-0,92086	0,923279	-0,891912	-0,832879	-0,906132	0,910771	0,925463	-0,948572	-0,909886	0,953714	0,938005
-0,305883	0,549598	-0,353364	-0,230243	-0,351089	0,513072	0,581886	-0,43625	-0,460804	0,476177	0,462819
-0,55147	0,745047	-0,584089	-0,471781	-0,585351	0,713931	0,77032	-0,661719	-0,673035	0,694286	0,680737
0,959108	-0,913844	0,97686	0,996377	0,971855	-0,931573	-0,897584	0,937283	0,95004	-0,925968	-0,939529
-0,745707	0,71118	-0,670866	-0,594698	-0,69878	0,688253	0,717134	-0,769397	-0,688706	0,774447	0,74244
-0,562731	0,779249	-0,672498	-0,623657	-0,647428	0,774669	0,792493	-0,651997	-0,740037	0,67707	0,697099
-0,992524	0,91438	-0,96207	-0,953083	-0,972654	0,919797	0,90213	-0,973156	-0,939177	0,96294	0,958162
-0,988793	0,914138	-0,954969	-0,94031	-0,966938	0,917362	0,903233	-0,973016	-0,93533	0,963996	0,957101
-0,966767	0,902285	-0,923938	-0,893923	-0,93961	0,899453	0,895178	-0,960925	-0,913378	0,955265	0,942607
-0,978958	0,987645	-0,979712	-0,945205	-0,983869	0,985944	0,98449	-0,997804	-0,988358	0,999575	0,997081
0,815394	-0,849861	0,886487	0,911834	0,866205	-0,871237	-0,837418	0,81558	0,877349	-0,811426	-0,839118
0,983827	-0,990198	0,989814	0,962071	0,991987	-0,991189	-0,985515	0,998963	0,995015	-0,999477	-0,99982
-0,953051	0,999841	-0,97525	-0,938093	-0,973729	0,998214	0,999154	-0,984862	-0,994292	0,99069	0,992943
1.0	-0,950808	0,988168	0,978736	0,993713	-0,95724	-0,939822	0,989813	0,972292	-0,982325	-0,982224
-0,950808	1.0	-0,975502	-0,93937	-0,973211	0,998849	0,999233	-0,982908	-0,994702	0,988815	0,991916
0,988168	-0,975502	1.0	0,990821	0,999041	-0,983286	-0,966175	0,989184	0,992805	-0,985107	-0,991023
0,978736	-0,93937	0,990821	1.0	0,988253	-0,953404	-0,925255	0,963335	0,969605	-0,954044	-0,963997
0,993713	-0,973211	0,999041	0,988253	1.0	-0,980116	-0,963811	0,993017	0,990614	-0,988429	-0,992366
-0,95724	0,998849	-0,983286	-0,953404	-0,980116	1.0	0,996413	-0,984226	-0,997991	0,988456	0,993301
-0,939822	0,999233	-0,966175	-0,925255	-0,963811	0,996413	1.0	-0,977201	-0,989914	0,984829	0,987248
0,989813	-0,982908	0,989184	0,963335	0,993017	-0,984226	-0,977201	1.0	0,990379	-0,998967	-0,998071
0,972292	-0,994702	0,992805	0,969605	0,990614	-0,997991	-0,989914	0,990379	1.0	-0,99175	-0,996725
-0,982325	0,988815	-0,985107	-0,954044	-0,988429	0,988456	0,984829	-0,998967	-0,99175	1.0	0,998793
-0,982224	0,991916	-0,991023	-0,963997	-0,992366	0,993301	0,987248	-0,998071	-0,996725	0,998793	1.0
-0,605387	0,81943	-0,67768	-0,590777	-0,666075	0,799964	0,839844	-0,710779	-0,760338	0,741182	0,743556
0,897192	-0,988118	0,94423	0,904781	0,936028	-0,986575	-0,99041	0,943654	0,975196	-0,954176	-0,961967
0,997275	-0,955034	0,980967	0,962389	0,98849	-0,95802	-0,946238	0,993292	0,970625	-0,987842	-0,984587
0,172102	-0,425633	0,318857	0,295016	0,281008	-0,427793	-0,439608	0,261425	0,38784	-0,287863	-0,320832
-0,96981	0,979619	-0,96402	-0,92233	-0,970548	0,974961	0,97807	-0,992177	-0,976037	0,995176	0,989399
-0,971228	0,908862	-0,930857	-0,901815	-0,945783	0,906557	0,901602	-0,965615	-0,920353	0,959986	0,948188
0,602481	-0,804625	0,710037	0,66732	0,685123	-0,802441	-0,815574	0,684613	0,771247	-0,707253	-0,728257
0,997484	-0,962266	0,985352	0,966366	0,991769	-0,965358	-0,953855	0,99586	0,976852	-0,991124	-0,988843
0,995023	-0,976903	0,995319	0,977744	0,998219	-0,981184	-0,968972	0,998072	0,990313	-0,994725	-0,995902
-0,98	0,963085	-0,997323	-0,996856	-0,994127	0,974111	0,95189	-0,975833	-0,985508	0,970081	0,979261
0,98746	-0,974429	0,978213	0,947685	0,984785	-0,973603	-0,969432	0,997817	0,979943	-0,996931	-0,992806
0,871151	-0,886324	0,837052	0,765726	0,853625	-0,868757	-0,892095	0,908218	0,863653	-0,916616	-0,896658
-0,902429	0,978148	-0,917899	-0,856066	-0,920189	0,967086	0,984276	-0,954093	-0,954647	0,966556	0,961442
-0,971552	0,980054	-0,965909	-0,92519	-0,972319	0,975757	0,978233	-0,993085	-0,977192	0,995809	0,990291
-0,947943	0,990846	-0,956855	-0,908821	-0,95986	0,984634	0,992257	-0,983362	-0,979602	0,990492	0,986958
0,993486	-0,979826	0,995733	0,977228	0,998175	-0,983885	-0,972293	0,998329	0,992192	-0,995543	-0,997005
0,98896	-0,928123	0,987023	0,995839	0,988331	-0,941316	-0,913042	0,967071	0,960767	-0,955793	-0,962151
0,998029	-0,962427	0,995805	0,987219	0,998652	-0,969693	-0,951879	0,99168	0,982822	-0,985337	-0,987856

Figura 9.2.10. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (22-32)

Var33	Var34	Var35	Var36	Var37	Var38	Var39	Var40	Var41	Var42	Var43
0,828187	-0,898823	-0,90218	-0,242017	0,963764	0,916432	-0,668252	-0,904159	-0,897933	0,824618	-0,937825
-0,690291	0,946628	0,986898	0,302936	-0,974984	-0,943491	0,704678	0,990762	0,998434	-0,992992	0,98649
0,453842	-0,807099	-0,975921	-0,0301966	0,918078	0,959104	-0,466181	-0,97243	-0,961568	0,95001	-0,949045
0,669927	-0,857558	-0,965477	-0,0649824	0,980361	0,988034	-0,536729	-0,962466	-0,944983	0,87744	-0,975582
0,777377	-0,980938	-0,964527	-0,409602	0,974481	0,912508	-0,787423	-0,971369	-0,986342	0,981745	-0,976385
0,687615	-0,945828	-0,986555	-0,303063	0,973774	0,942554	-0,704006	-0,990431	-0,998243	0,993591	-0,985713
0,728118	-0,966586	-0,967186	-0,3912	0,961786	0,909156	-0,764586	-0,973609	-0,988951	0,994261	-0,971101
0,665832	-0,931419	-0,994028	-0,251743	0,978396	0,959023	-0,66784	-0,996429	-0,999741	0,988303	-0,991136
0,721106	-0,868116	-0,946959	-0,10786	0,978288	0,970726	-0,570535	-0,945133	-0,929737	0,856593	-0,965825
0,896699	-0,606438	-0,355596	-0,52838	0,523963	0,364389	-0,682345	-0,36759	-0,385102	0,305819	-0,447427
0,94597	-0,77483	-0,596196	-0,478321	0,735703	0,603345	-0,744758	-0,605805	-0,617361	0,538014	-0,673353
-0,55201	0,883134	0,936707	0,313211	-0,886562	-0,865163	0,661094	0,941406	0,956426	-0,989067	0,917106
0,535765	-0,625145	-0,790738	0,202266	0,829821	0,879455	-0,26937	-0,780792	-0,739213	0,617269	-0,809398
0,931679	-0,866094	-0,561024	-0,889229	0,65276	0,451325	-0,997986	-0,582871	-0,639674	0,673769	-0,61914
0,535484	-0,843792	-0,993163	-0,0518489	0,95717	0,986413	-0,505751	-0,990034	-0,977763	0,949902	-0,977573
0,547116	-0,84183	-0,992942	-0,0368075	0,962866	0,993115	-0,498601	-0,989341	-0,974871	0,939371	-0,980143
0,571822	-0,825962	-0,980516	0,00596623	0,966923	0,999829	-0,472187	-0,975631	-0,955215	0,899093	-0,975457
0,747641	-0,952027	-0,986614	-0,278584	0,997587	0,962991	-0,702293	-0,98961	-0,99188	0,962609	-0,997416
-0,620809	0,873613	0,781401	0,609841	-0,752237	-0,657691	0,817666	0,795145	0,838039	-0,913669	0,775702
-0,738155	0,957735	0,987063	0,30431	-0,9915	-0,953912	0,717022	0,990839	0,996373	-0,977076	0,994895
0,816866	-0,985774	-0,958239	-0,411655	0,982959	0,915137	-0,795981	-0,965056	-0,978315	0,961783	-0,977536
-0,605387	0,897192	0,997275	0,172102	-0,96981	-0,971228	0,602481	0,997484	0,995023	-0,98	0,98746
0,81943	-0,988118	-0,955034	-0,425633	0,979619	0,908862	-0,804625	-0,962266	-0,976903	0,963085	-0,974429
-0,67768	0,94423	0,980967	0,318857	-0,96402	-0,930857	0,710037	0,985352	0,995319	-0,997323	0,978213
-0,590777	0,904781	0,962389	0,295016	-0,92233	-0,901815	0,66732	0,966366	0,977744	-0,996856	0,947685
-0,666075	0,936028	0,98849	0,281008	-0,970548	-0,945783	0,685123	0,991769	0,998219	-0,994127	0,984785
0,799964	-0,986575	-0,95802	-0,427793	0,974961	0,906557	-0,802441	-0,965358	-0,981184	0,974111	-0,973603
0,839844	-0,99041	-0,946238	-0,439608	0,97807	0,901602	-0,815574	-0,953855	-0,968972	0,95189	-0,969432
-0,710779	0,943654	0,993292	0,261425	-0,992177	-0,965615	0,684613	0,99586	0,998072	-0,975833	0,997817
-0,760338	0,975196	0,970625	0,38784	-0,976037	-0,920353	0,771247	0,976852	0,990313	-0,985508	0,979943
0,741182	-0,954176	-0,987842	-0,287863	0,995176	0,959986	-0,707253	-0,991124	-0,994725	0,970081	-0,996931
0,743556	-0,961967	-0,984587	-0,320832	0,989399	0,948188	-0,728257	-0,988843	-0,995902	0,979261	-0,992806
1.0	-0,877969	-0,62939	-0,710094	0,751955	0,578528	-0,920756	-0,645564	-0,680082	0,652496	-0,700938
-0,877969	1.0	0,899382	0,558722	-0,939916	-0,834401	0,886323	0,910553	0,936481	-0,935367	0,928327
-0,62939	0,899382	1.0	0,154683	-0,982385	-0,983983	0,597741	0,999624	0,994134	-0,967481	0,994929
-0,710094	0,558722	0,154683	1.0	-0,24408	-0,00941411	0,876817	0,181699	0,258043	-0,340686	0,212218
0,751955	-0,939916	-0,982385	-0,24408	1.0	0,970072	-0,67928	-0,984369	-0,982634	0,942062	-0,996096
0,578528	-0,834401	-0,983983	-0,00941411	0,970072	1.0	-0,485047	-0,979521	-0,96049	0,907022	-0,978959
-0,920756	0,886323	0,597741	0,876817	-0,67928	-0,485047	1.0	0,619133	0,675389	-0,713649	0,650646
-0,645564	0,910553	0,999624	0,181699	-0,984369	-0,979521	0,619133	1.0	0,996682	-0,97262	0,99607
-0,680082	0,936481	0,994134	0,258043	-0,982634	-0,96049	0,675389	0,996682	1.0	-0,986069	0,993397
0,652496	-0,935367	-0,967481	-0,340686	0,942062	0,907022	-0,713649	-0,97262	-0,986069	1.0	-0,96071
-0,700938	0,928327	0,994929	0,212218	-0,996096	-0,978959	0,650646	0,99607	0,993397	-0,96071	1.0
-0,728532	0,831284	0,904856	0,0791127	-0,951389	-0,943222	0,538894	0,902302	0,883087	-0,794831	0,930936
0,873727	-0,965466	-0,921728	-0,388363	0,976872	0,902056	-0,78161	-0,927827	-0,935542	0,891341	-0,955969
0,74917	-0,9402	-0,983596	-0,244197	0,999971	0,970493	-0,679113	-0,985586	-0,984008	0,94444	-0,996687
0,817179	-0,967082	-0,961132	-0,340074	0,994121	0,938263	-0,750229	-0,965834	-0,97129	0,935262	-0,983713
-0,689948	0,941475	0,99271	0,271205	-0,983315	-0,957657	0,685853	0,995623	0,999895	-0,986488	0,993191
-0,550827	0,880196	0,975341	0,209077	-0,929211	-0,929009	0,606083	0,976855	0,980867	-0,9897	0,956552
-0,633129	0,917595	0,993088	0,231413	-0,968844	-0,956718	0,646433	0,994981	0,997632	-0,990213	0,985613

Figura 9.2.11. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (33-43)

Var44	Var45	Var46	Var47	Var48	Var49	Var50
-0,98633	0,981945	0,961716	0,969567	-0,900165	-0,796988	-0,867669
0,860966	-0,931485	-0,976571	-0,967425	0,998818	0,982968	0,996738
-0,814498	0,815374	0,92062	0,878773	-0,957611	-0,983079	-0,975274
-0,982542	0,941886	0,979695	0,959816	-0,943693	-0,884296	-0,930661
-0,862679	0,958953	0,975521	0,980977	-0,988612	-0,953165	-0,977345
-0,85833	0,929579	0,975402	0,966049	-0,998601	-0,983813	-0,99689
-0,831059	0,931804	0,963455	0,963407	-0,990538	-0,972408	-0,985758
-0,874172	0,927356	0,979933	0,965654	-0,999439	-0,985041	-0,998929
-0,993631	0,958017	0,97705	0,965322	-0,929468	-0,853463	-0,909575
-0,630286	0,685728	0,518355	0,592451	-0,395134	-0,204375	-0,321026
-0,810815	0,855415	0,73115	0,786683	-0,625343	-0,455358	-0,561813
0,70825	-0,814769	-0,889973	-0,873142	0,955856	0,988702	0,97027
-0,95332	0,800795	0,826937	0,797957	-0,736242	-0,642021	-0,714446
-0,524943	0,766732	0,652185	0,728013	-0,650683	-0,56105	-0,607196
-0,881882	0,873458	0,958791	0,923801	-0,974676	-0,974283	-0,982965
-0,901684	0,882943	0,964149	0,929549	-0,971807	-0,963546	-0,977611
-0,945324	0,898169	0,967265	0,934034	-0,952236	-0,922564	-0,951201
-0,927712	0,971358	0,998012	0,992965	-0,992715	-0,948176	-0,980988
0,516469	-0,730284	-0,755992	-0,772153	0,841712	0,872132	0,848054
0,903239	-0,961789	-0,992337	-0,987557	0,997281	0,961898	0,988288
-0,894179	0,98032	0,983327	0,992981	-0,981083	-0,928338	-0,963618
0,871151	-0,902429	-0,971552	-0,947943	0,993486	0,98896	0,998029
-0,886324	0,978148	0,980054	0,990846	-0,979826	-0,928123	-0,962427
0,837052	-0,917899	-0,965909	-0,956855	0,995733	0,987023	0,995805
0,765726	-0,856066	-0,92519	-0,908821	0,977228	0,995839	0,987219
0,853625	-0,920189	-0,972319	-0,95986	0,998175	0,988331	0,998652
-0,868757	0,967086	0,975757	0,984634	-0,983885	-0,941316	-0,969693
-0,892095	0,984276	0,978233	0,992257	-0,972293	-0,913042	-0,951879
0,908218	-0,954093	-0,993085	-0,983362	0,998329	0,967071	0,99168
0,863653	-0,954647	-0,977192	-0,979602	0,992192	0,960767	0,982822
-0,916616	0,966556	0,995809	0,990492	-0,995543	-0,955793	-0,985337
-0,896658	0,961442	0,990291	0,986958	-0,997005	-0,962151	-0,987856
-0,728532	0,873727	0,74917	0,817179	-0,689948	-0,550827	-0,633129
0,831284	-0,965466	-0,9402	-0,967082	0,941475	0,880196	0,917595
0,904856	-0,921728	-0,983596	-0,961132	0,99271	0,975341	0,993088
0,0791127	-0,388363	-0,244197	-0,340074	0,271205	0,209077	0,231413
-0,951389	0,976872	0,999971	0,994121	-0,983315	-0,929211	-0,968844
-0,943222	0,902056	0,970493	0,938263	-0,957657	-0,929009	-0,956718
0,538894	-0,78161	-0,679113	-0,750229	0,685853	0,606083	0,646433
0,902302	-0,927827	-0,985586	-0,965834	0,995623	0,976855	0,994981
0,883087	-0,935542	-0,984008	-0,97129	0,999895	0,980867	0,997632
-0,794831	0,891341	0,94444	0,935262	-0,986488	-0,9897	-0,990213
0,930936	-0,955969	-0,996687	-0,983713	0,993191	0,956552	0,985613
1.0	-0,94404	-0,949338	-0,940612	0,883089	0,789321	0,85709
-0,94404	1.0	0,975744	0,992625	-0,9391	-0,850374	-0,909053
-0,949338	0,975744	1.0	0,993799	-0,984648	-0,93198	-0,970692
-0,940612	0,992625	0,993799	1.0	-0,973537	-0,907009	-0,952625
0,883089	-0,9391	-0,984648	-0,973537	1.0	0,979203	0,996845
0,789321	-0,850374	-0,93198	-0,907009	0,979203	1.0	0,991751
0,85709	-0,909053	-0,970692	-0,952625	0,996845	0,991751	1.0

Figura 9.2.12. – Matriz de correlación Desequilibrio Var (44-50)

Tras obtener las correlaciones entre las variables más importantes se realiza el análisis multivariante como se muestra en la siguiente figura:

Model Description

In order to predict **Var1**, the following variables are used: **Var9**, **Var44**

Analysis of Variance Information for Model

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F Value
Regression	90,76942332	2	45,38471166	18,7097
Error	2,42572668	1	2,42572668	
Total	93,19515000	3		

Anova Statistics

Prob > F	R ²	Adj R ²	Std Error	Durbin-Watson
0,1613	0,97397	0,92191	1,55747	3,144109

Parameter Estimates

The following table contains the estimates of the parameters for the model. For example, in the model $Y=B_0+B_1*Var1$, B_0 is the intercept and B_1 is the coefficient for $Var1$.

Parameter	Estimate	Std Estimate	t for H ₀ : Param=0	Std Err of Estimate	95% Confidence Interval		Prob > t
					Lower Limit	Upper Limit	
Intercept	-116,39		-0,1469	792,53343	-10186,46659	9953,68656	0,9072
Var9 remove	56,0733	0,29764	0,2079	269,72861	-3371,14839	3483,29495	0,8695
Var44 remove	-139,535	-0,69059	-0,4823	289,28487	-3815,24238	3536,17202	0,7139

Model Equation

$$Var1 = -116,3900181568247 + 56,07327789850316 * Var9 -139,5351802711778 * Var44$$

Residual Statistics

Statistic	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Residual	-1,265735	0,824536	0,000000	0,89920830
Std Residual	-0,812684	0,529405	0,000000	0,57735027
Stu Residual	-1,000000	1,000000	0,500000	1,00000000
Cook's Dist	0,171369	173,532311	45,009476	85,71430141

Search Procedure

No Search Procedure Selected.

Figura 9.2.13. – Análisis multivariante de Desequilibrio en el rotor.

Las variables significativas en este caso son la Var9 (THD V A-B) y Var44 (Armónicos V21 C-A), que sirven para generar la siguiente ecuación, con un $R^2 = 0,97397$:

$$\begin{aligned}
 Var1 = & -116,3900181568247 + 56,07327789850316 * Var9 \\
 & - 139,5351802711778 * Var44
 \end{aligned}$$

A partir de ella podemos realizar una comparativa entre los datos reales de desequilibrio del rotor y los valores calculados mediante la ecuación resultante del análisis:

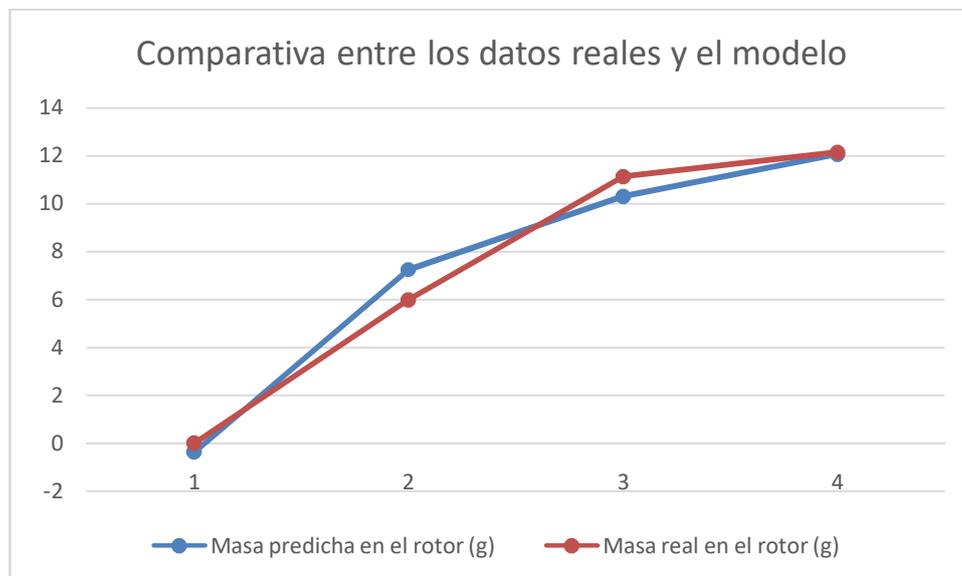


Figura9.2.14. – Comparativa entre la masa real en el rotor y la predicha.

Al igual que en el primer caso, en la gráfica se puede ver como prácticamente las dos curvas, la obtenida experimentalmente y la calculada mediante la fórmula obtenida, quedan superpuestas la una sobre la otra. En este caso existe una mayor diferencia entre los datos reales y el modelo que en el caso de derivación entre líneas.

9.2.3. Rodamiento dañado

Dado que se realizaron pruebas a diferentes tensiones y con distinto grado de deterioro en el rodamiento, se ha separado el análisis estadístico en dos apartados. El primero de ellos con los datos a 220 V y un porcentaje de daño hasta el 20 % y el segundo con los datos a 380 V y daño al 100%.

En las siguientes gráficas se muestra la matriz de correlación obtenida tras realizar el análisis estadístico para el experimento con el rodamiento en mal estado con una tensión de 220 V.

	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10
Var1	1.0	-0,612102	0,605248	0,0794815	-0,704809	-0,602468	-0,638312	-0,725107	-0,304182	-0,475424
Var2	-0,612102	1.0	-0,135941	0,246204	0,796515	0,785244	0,796391	0,803389	0,707628	0,740285
Var3	0,605248	-0,135941	1.0	0,286239	-0,15361	-0,0115017	-0,0584908	-0,166415	0,200214	0,13389
Var4	0,0794815	0,246204	0,286239	1.0	0,371691	0,446073	0,412532	0,321728	0,539694	0,488251
Var5	-0,704809	0,796515	-0,15361	0,371691	1.0	0,981524	0,991928	0,984817	0,874035	0,913794
Var6	-0,602468	0,785244	-0,0115017	0,446073	0,981524	1.0	0,991221	0,961674	0,917967	0,968811
Var7	-0,638312	0,796391	-0,0584908	0,412532	0,991928	0,991221	1.0	0,985559	0,912594	0,945936
Var8	-0,725107	0,803389	-0,166415	0,321728	0,984817	0,961674	0,985559	1.0	0,862688	0,907786
Var9	-0,304182	0,707628	0,200214	0,539694	0,874035	0,917967	0,912594	0,862688	1.0	0,941192
Var10	-0,475424	0,740285	0,13389	0,488251	0,913794	0,968811	0,945936	0,907786	0,941192	1.0
Var11	-0,454023	0,27752	-0,257964	-0,0447616	0,45428	0,412062	0,386663	0,337841	0,162172	0,240808
Var12	-0,306088	0,15716	-0,298431	-0,167903	0,248435	0,187314	0,169972	0,12476	-0,0293308	-0,00510146
Var13	-0,575874	0,347208	-0,377681	-0,108635	0,4546	0,395387	0,374895	0,348991	0,103118	0,215875
Var14	-0,695429	0,307526	-0,400324	-0,035557	0,510721	0,469968	0,45183	0,456839	0,129573	0,341186
Var15	-0,61122	0,186741	-0,454865	-0,169985	0,377136	0,311323	0,299832	0,303678	-0,0284	0,14052
Var16	-0,757457	0,361102	-0,553297	-0,154961	0,460948	0,379957	0,383263	0,414569	0,0270946	0,211257
Var17	-0,349036	0,135838	-0,18472	-0,113716	0,188628	0,200795	0,157549	0,145987	-0,0633441	0,139068
Var18	-0,212814	0,584665	-0,263548	0,139009	0,325925	0,271096	0,293366	0,265921	0,21418	0,12636
Var19	0,247093	-0,106205	0,165328	0,198124	-0,0610805	0,0196291	-0,0419486	-0,135651	-0,0563652	0,0104561
Var20	-0,747762	0,410797	-0,625145	-0,191494	0,530383	0,419577	0,447075	0,483815	0,116225	0,206592
Var21	-0,718563	0,447185	-0,641347	-0,196328	0,526527	0,408028	0,442267	0,479106	0,137372	0,189044
Var22	-0,723805	0,428309	-0,585532	-0,175184	0,538205	0,432343	0,458621	0,488654	0,140362	0,221822
Var23	0,170058	-0,124361	0,24663	0,104692	0,0666945	0,109479	0,045346	-0,0734735	0,0597566	0,0547819
Var24	0,189161	-0,185279	0,132749	-0,0567167	-0,0923211	-0,0762193	-0,132808	-0,2354	-0,161606	-0,169712
Var25	0,176182	-0,112853	0,290017	0,0716421	-0,0577651	0,00493861	-0,0779923	-0,186035	-0,0418246	0,00714834
Var26	0,322176	0,118878	0,372662	0,283119	-0,0500543	0,025078	-0,0109574	-0,0578451	0,237663	0,172345
Var27	0,427185	0,103619	0,385974	0,248815	-0,0674447	0,000658442	0,016219	0,0176918	0,309732	0,165925
Var28	0,248191	-0,110983	0,219105	0,122799	-0,369965	-0,373244	-0,35518	-0,329793	-0,214253	-0,282647
Var29	0,23665	0,102993	0,268489	0,147775	-0,146002	-0,0788124	-0,0680305	-0,025019	0,137167	0,118382
Var30	0,234651	0,10906	0,293938	0,105105	-0,136075	-0,0687635	-0,0613314	-0,0206488	0,158772	0,131127
Var31	0,0751103	0,139239	0,102736	0,0812347	-0,067048	-0,031189	-0,0051957	0,0645298	0,140824	0,132697
Var32	0,165368	-0,200132	0,212955	-0,0692903	-0,111912	-0,154166	-0,0919623	-0,0833513	-0,101683	-0,24373
Var33	-0,153213	-0,0779684	-0,201381	-0,12634	0,109192	0,0294064	0,0580214	0,0358108	-0,129477	-0,181062
Var34	-0,111891	-0,0990343	-0,343595	-0,480557	-0,15851	-0,263341	-0,201072	-0,136776	-0,328749	-0,414052

Figura 9.2.15. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (1-10)

Var11	Var12	Var13	Var14	Var15	Var16	Var17	Var18	Var19	Var20
-0,454023	-0,306088	-0,575874	-0,695429	-0,61122	-0,757457	-0,349036	-0,212814	0,247093	-0,747762
0,27752	0,15716	0,347208	0,307526	0,186741	0,361102	0,135838	0,584665	-0,106205	0,410797
-0,257964	-0,298431	-0,377681	-0,400324	-0,454865	-0,553297	-0,18472	-0,263548	0,165328	-0,625145
-0,0447616	-0,167903	-0,108635	-0,035557	-0,169985	-0,154961	-0,113716	0,139009	0,198124	-0,191494
0,45428	0,248435	0,4546	0,510721	0,377136	0,460948	0,188628	0,325925	-0,0610805	0,530383
0,412062	0,187314	0,395387	0,469968	0,311323	0,379957	0,200795	0,271096	0,0196291	0,419577
0,386663	0,169972	0,374895	0,45183	0,299832	0,383263	0,157549	0,293366	-0,0419486	0,447075
0,337841	0,12476	0,348991	0,456839	0,303678	0,414569	0,145987	0,265921	-0,135651	0,483815
0,162172	-0,0293308	0,103118	0,129573	-0,0284	0,0270946	-0,0633441	0,21418	-0,0563652	0,116225
0,240808	-0,00510146	0,215875	0,341186	0,14052	0,211257	0,139068	0,12636	0,0104561	0,206592
1.0	0,949997	0,971999	0,803468	0,892736	0,818712	0,532908	0,504497	0,377006	0,799584
0,949997	1.0	0,927015	0,668983	0,834607	0,736236	0,485434	0,592223	0,392577	0,776869
0,971999	0,927015	1.0	0,850463	0,909683	0,881361	0,599013	0,512994	0,330625	0,866568
0,803468	0,668983	0,850463	1.0	0,931917	0,944196	0,800556	0,244512	0,433387	0,826457
0,892736	0,834607	0,909683	0,931917	1.0	0,958422	0,682742	0,347987	0,375236	0,868497
0,818712	0,736236	0,881361	0,944196	0,958422	1.0	0,665992	0,392157	0,260033	0,901568
0,532908	0,485434	0,599013	0,800556	0,682742	0,665992	1.0	0,154774	0,737259	0,582591
0,504497	0,592223	0,512994	0,244512	0,347987	0,392157	0,154774	1.0	0,250522	0,493595
0,377006	0,392577	0,330625	0,433387	0,375236	0,260033	0,737259	0,250522	1.0	0,19838
0,799584	0,776869	0,866568	0,826457	0,868497	0,901568	0,582591	0,493595	0,19838	1.0
0,769107	0,769181	0,842985	0,744542	0,79285	0,837605	0,508208	0,553575	0,147018	0,987076
0,800595	0,781753	0,869146	0,824074	0,848764	0,879759	0,62242	0,52244	0,252663	0,993739
0,72136	0,699803	0,584551	0,329167	0,467919	0,281018	0,168109	0,266451	0,395056	0,174096
0,741205	0,811649	0,633176	0,345949	0,549471	0,351834	0,28567	0,385446	0,482668	0,280848
0,543134	0,504385	0,453265	0,18978	0,305503	0,167975	0,0228295	0,110702	0,177756	-0,0309569
-0,275322	-0,325702	-0,348558	-0,401199	-0,4035	-0,372976	-0,481278	-0,000830083	-0,246668	-0,600116
-0,743375	-0,730579	-0,795636	-0,671727	-0,764221	-0,709141	-0,425207	-0,0870642	-0,152874	-0,688822
-0,51646	-0,482152	-0,512186	-0,573897	-0,520597	-0,435292	-0,664662	-0,125437	-0,580657	-0,614226
-0,87081	-0,924329	-0,830122	-0,606231	-0,793303	-0,644245	-0,398533	-0,350216	-0,339572	-0,720317
-0,857029	-0,914827	-0,817787	-0,64017	-0,814043	-0,665329	-0,473101	-0,399666	-0,439168	-0,732169
-0,838333	-0,893336	-0,755547	-0,485206	-0,716014	-0,536034	-0,258099	-0,375424	-0,336686	-0,543272
0,00716718	0,0852867	-0,0526745	-0,0798263	-0,0253164	-0,0555287	-0,00254306	0,0025605	0,0664493	0,142624
0,691625	0,78489	0,64273	0,478632	0,647636	0,534706	0,380514	0,420333	0,381618	0,704561
0,132593	0,273794	0,163536	-0,0667469	0,110517	0,121505	-0,142513	0,124879	-0,28967	0,383399

Figura 9.2.16. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (11-20)

Var21	Var22	Var23	Var24	Var25	Var26	Var27	Var28	Var29	Var30
-0,718563	-0,723805	0,170058	0,189161	0,176182	0,322176	0,427185	0,248191	0,23665	0,234651
0,447185	0,428309	-0,124361	-0,185279	-0,112853	0,118878	0,103619	-0,110983	0,102993	0,10906
-0,641347	-0,585532	0,24663	0,132749	0,290017	0,372662	0,385974	0,219105	0,268489	0,293938
-0,196328	-0,175184	0,104692	-0,0567167	0,0716421	0,283119	0,248815	0,122799	0,147775	0,105105
0,526527	0,538205	0,0666945	-0,0923211	-0,0577651	-0,0500543	-0,0674447	-0,369965	-0,146002	-0,136075
0,408028	0,432343	0,109479	-0,0762193	0,00493861	0,025078	0,000658442	-0,373244	-0,0788124	-0,0687635
0,442267	0,458621	0,045346	-0,132808	-0,0779923	-0,0109574	0,016219	-0,35518	-0,0680305	-0,0613314
0,479106	0,488654	-0,0734735	-0,2354	-0,186035	-0,0578451	0,0176918	-0,329793	-0,025019	-0,0206488
0,137372	0,140362	0,0597566	-0,161606	-0,0418246	0,237663	0,309732	-0,214253	0,137167	0,158772
0,189044	0,221822	0,0547819	-0,169712	0,00714834	0,172345	0,165925	-0,282647	0,118382	0,131127
0,769107	0,800595	0,72136	0,741205	0,543134	-0,275322	-0,743375	-0,51646	-0,87081	-0,857029
0,769181	0,781753	0,699803	0,811649	0,504385	-0,325702	-0,730579	-0,482152	-0,924329	-0,914827
0,842985	0,869146	0,584551	0,633176	0,453265	-0,348558	-0,795636	-0,512186	-0,830122	-0,817787
0,744542	0,824074	0,329167	0,345949	0,18978	-0,401199	-0,671727	-0,573897	-0,606231	-0,64017
0,79285	0,848764	0,467919	0,549471	0,305503	-0,4035	-0,764221	-0,520597	-0,793303	-0,814043
0,837605	0,879759	0,281018	0,351834	0,167975	-0,372976	-0,709141	-0,435292	-0,644245	-0,665329
0,508208	0,62242	0,168109	0,28567	0,0228295	-0,481278	-0,425207	-0,664662	-0,398533	-0,473101
0,553575	0,52244	0,266451	0,385446	0,110702	-0,000830083	-0,0870642	-0,125437	-0,350216	-0,399666
0,147018	0,252663	0,395056	0,482668	0,177756	-0,246668	-0,152874	-0,580657	-0,339572	-0,439168
0,987076	0,993739	0,174096	0,280848	-0,0309569	-0,600116	-0,688822	-0,614226	-0,720317	-0,732169
1.0	0,986694	0,144282	0,253773	-0,0596354	-0,598899	-0,656717	-0,598571	-0,69991	-0,703675
0,986694	1.0	0,181506	0,290366	-0,0402978	-0,617455	-0,663179	-0,648025	-0,713462	-0,732359
0,144282	0,181506	1.0	0,934414	0,89969	0,171012	-0,446837	-0,170119	-0,669755	-0,639463
0,253773	0,290366	0,934414	1.0	0,805983	0,0237336	-0,506116	-0,212851	-0,771799	-0,761637
-0,0596354	-0,0402978	0,89969	0,805983	1.0	0,386914	-0,415854	0,116901	-0,451688	-0,386643
-0,598899	-0,617455	0,171012	0,0237336	0,386914	1.0	0,548432	0,705605	0,493444	0,531887
-0,656717	-0,663179	-0,446837	-0,506116	-0,415854	0,548432	1.0	0,392284	0,82725	0,786909
-0,598571	-0,648025	-0,170119	-0,212851	0,116901	0,705605	0,392284	1.0	0,519136	0,551058
-0,69991	-0,713462	-0,669755	-0,771799	-0,451688	0,493444	0,82725	0,519136	1.0	0,984457
-0,703675	-0,732359	-0,639463	-0,761637	-0,386643	0,531887	0,786909	0,551058	0,984457	1.0
-0,514614	-0,528295	-0,813476	-0,890863	-0,640309	0,258474	0,732519	0,351863	0,949303	0,928775
0,163031	0,16158	-0,0840489	-0,00499223	-0,329819	-0,493347	-0,0715753	-0,172946	-0,215368	-0,223169
0,700597	0,7128	0,413912	0,567782	0,0878462	-0,657615	-0,622712	-0,551295	-0,867301	-0,887913
0,448505	0,358353	-0,141989	-0,000560885	-0,232798	-0,600764	-0,400279	-0,192473	-0,366268	-0,314014

Figura 9.2.17. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (21-30)

Var31	Var32	Var33	Var34
0,0751103	0,165368	-0,153213	-0,111891
0,139239	-0,200132	-0,0779684	-0,0990343
0,102736	0,212955	-0,201381	-0,343595
0,0812347	-0,0692903	-0,12634	-0,480557
-0,067048	-0,111912	0,109192	-0,15851
-0,031189	-0,154166	0,0294064	-0,263341
-0,0051957	-0,0919623	0,0580214	-0,201072
0,0645298	-0,0833513	0,0358108	-0,136776
0,140824	-0,101683	-0,129477	-0,328749
0,132697	-0,24373	-0,181062	-0,414052
-0,838333	0,00716718	0,691625	0,132593
-0,893336	0,0852867	0,78489	0,273794
-0,755547	-0,0526745	0,64273	0,163536
-0,485206	-0,0798263	0,478632	-0,0667469
-0,716014	-0,0253164	0,647636	0,110517
-0,536034	-0,0555287	0,534706	0,121505
-0,258099	-0,00254306	0,380514	-0,142513
-0,375424	0,0025605	0,420333	0,124879
-0,336686	0,0664493	0,381618	-0,28967
-0,543272	0,142624	0,704561	0,383399
-0,514614	0,163031	0,700597	0,448505
-0,528295	0,16158	0,7128	0,358353
-0,813476	-0,0840489	0,413912	-0,141989
-0,890863	-0,00499223	0,567782	-0,000560885
-0,640309	-0,329819	0,0878462	-0,232798
0,258474	-0,493347	-0,657615	-0,600764
0,732519	-0,0715753	-0,622712	-0,400279
0,351863	-0,172946	-0,551295	-0,192473
0,949303	-0,215368	-0,867301	-0,366268
0,928775	-0,223169	-0,887913	-0,314014
1.0	-0,109462	-0,768595	-0,239289
-0,109462	1.0	0,619379	0,621209
-0,768595	0,619379	1.0	0,564698
-0,239289	0,621209	0,564698	1.0

Figura9.2.18. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 220 V Var (31-34)

Tras obtener las correlaciones entre las variables más importantes se realiza el análisis multivariante como se muestra en la siguiente figura:

Model Description

In order to predict Var1, the following variables are used: Var2, Var3, Var5, Var7, Var8, Var14, Var15, Var16, Var20, Var21, Var22

Analysis of Variance Information for Model

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F Value
Regression	514,15750496	11	46,74159136	5,7707
Error	16,19963790	2	8,09981895	
Total	530,35714286	13		

Anova Statistics

Prob > F	R ²	Adj R ²	Std Error	Durbin-Watson
0,1569	0,96946	0,80146	2,84602	2,376726

Parameter Estimates

The following table contains the estimates of the parameters for the model. For example, in the model $Y=B_0+B_1*Var1$, B_0 is the intercept and B_1 is the coefficient for Var1.

Parameter	Estimate	Std Estimate	t for H ₀ : Param=0	Std Err of Estimate	95% Confidence Interval		Prob > t
					Lower Limit	Upper Limit	
Intercept	-1871,19		-1,3975	1338,92740	-7632,14111	3889,75619	0,2971
Var2 remove	-0,553464	-0,31236	-0,6638	0,83381	-4,14107	3,03414	0,5751
Var3 remove	-1,25007	-0,20737	-0,7027	1,77901	-8,90453	6,40439	0,5550
Var5 remove	-11,4764	-3,19035	-1,5821	7,25370	-42,68655	19,73383	0,2544
Var7 remove	23,1728	5,86397	2,2295	10,39384	-21,54830	67,89400	0,1556
Var8 remove	-161,29	-2,96243	-1,5328	105,22729	-614,04733	291,46708	0,2650
Var14 remove	-14,194	-0,88465	-0,7997	17,74940	-90,56365	62,17558	0,5078
Var15 remove	2,61511	0,15229	0,1231	21,24837	-88,80938	94,03961	0,9133
Var16 remove	6,73091	0,42687	0,2443	27,54648	-111,79221	125,25403	0,8297
Var20 remove	-33,0943	-1,47455	-0,4748	69,69808	-332,98143	266,79282	0,6817
Var21 remove	-3,52564	-0,16679	-0,0613	57,52467	-251,03472	243,98345	0,9567
Var22 remove	31,3564	1,61797	0,6290	49,85470	-183,15138	245,86418	0,5936

Model Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Var1} = & -1871,192459252381920000 - 0,553463589714627280 * \text{Var2} - 1,250071647034837860 * \text{Var3} \\
 & - 11,476364385868228300 * \text{Var5} + 23,172849084341994100 * \text{Var7} - 161,290124155832302000 * \\
 & \text{Var8} - 14,194033741468212300 * \text{Var14} + 2,615113783639398730 * \text{Var15} + \\
 & 6,730911077444194920 * \text{Var16} - 33,094305969156465600 * \text{Var20} - 3,525635106777852190 * \text{Var21} \\
 & + 31,356402850198236400 * \text{Var22}
 \end{aligned}$$

Residual Statistics

Statistic	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Residual	-2,221669	1,711083	0,000000	1,11630014
Std Residual	-0,780624	0,601220	0,000000	0,39223227
Stu Residual	-1,371051	1,411038	-0,078794	1,07559436
Cook's Dist	0,009269	16,284066	2,935157	5,57466017

Search Procedure

No Search Procedure Selected.

Figura 9.2.19. – Análisis multivariante de Daños en el rodamiento a 220 V.

Las variables significativas en este caso son la Var2 (Temperatura °C), Var3 (Vibraciones mm/s²), Var5 (Voltaje A-B), Var7 (Voltaje C-A), Var8 (Corriente A-B), Var14 (THD A A-B), Var15 (THD A B-C), Var16 (THD A C-A), Var20 (Armónicos V5 A-B), Var21 (Armónicos V5 B-C) y Var22 (Armónicos V5 C-A), que sirven para generar la siguiente ecuación, con un $R^2 = 0,96946$:

$$\begin{aligned}
 Var1 = & -1871,19245925238 - 0,553463589714627 * Var2 - 1,25007164703483 * Var3 \\
 & - 11,4763643858682 * Var5 + 23,1728490843419 * Var7 - 161,290124155832 * Var8 \\
 & - 14,1940337414682 * Var14 + 2,61511378363939 * Var15 + 6,73091107744419 \\
 & * Var16 - 33,0943059691564 * Var20 - 3,52563510677785 * Var21 \\
 & + 31,3564028501982 * Var22
 \end{aligned}$$

A partir de ella podemos realizar una comparativa entre los datos reales de desequilibrio del rotor y los valores calculados mediante la ecuación resultante del análisis:

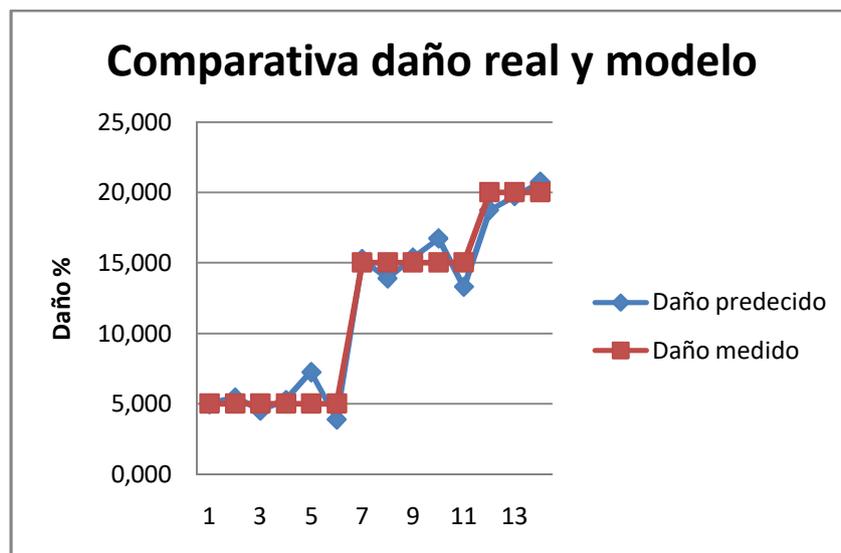


Figura 9.2.20. – Comparativa entre daño y daño predicho a 220 V.

En este caso el modelo no se ajusta tan perfectamente a los datos reales como en los casos anteriores. Hay que señalar que en este caso la medición de los datos del daño en el rodamiento es aproximada, dada la dificultad para medirlos experimentalmente. El motivo es que se realizaron tres pruebas distintas donde gradualmente se introducía arena en el rodamiento y se producían daños en la jaula del rodamiento, resultando inviable cuantificar los daños producidos de forma exacta.

En las siguientes gráficas se muestra la matriz de correlación obtenida tras realizar el análisis estadístico para el experimento con el rodamiento en mal estado con una tensión de 380 V.

	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10
Var1	1.0	0,0625803	0,809916	0,211058	0,0107806	0,012974	0,0228342	-0,0158332	-0,0296131	0,014693
Var2	0,0625803	1.0	0,0120242	0,237834	-0,0589166	-0,117585	-0,0799976	-0,18164	-0,0640556	-0,283392
Var3	0,809916	0,0120242	1.0	0,406014	0,289855	0,308373	0,315456	0,231563	0,237145	0,331385
Var4	0,211058	0,237834	0,406014	1.0	0,00963878	0,00632371	0,00973327	-0,0931054	0,0171088	-0,0479244
Var5	0,0107806	-0,0589166	0,289855	0,00963878	1.0	0,986814	0,992775	0,96779	0,987209	0,920322
Var6	0,012974	-0,117585	0,308373	0,00632371	0,986814	1.0	0,983263	0,94595	0,967411	0,962503
Var7	0,0228342	-0,0799976	0,315456	0,00973327	0,992775	0,983263	1.0	0,96942	0,972128	0,936261
Var8	-0,0158332	-0,18164	0,231563	-0,0931054	0,96779	0,94595	0,96942	1.0	0,935874	0,8812
Var9	-0,0296131	-0,0640556	0,237145	0,0171088	0,987209	0,967411	0,972128	0,935874	1.0	0,897089
Var10	0,014693	-0,283392	0,331385	-0,0479244	0,920322	0,962503	0,936261	0,8812	0,897089	1.0
Var11	0,154658	-0,0332087	0,389388	-0,0322498	0,708492	0,700602	0,758432	0,644943	0,714901	0,755373
Var12	-0,0118968	-0,162887	0,274968	-0,0351317	0,992345	0,99163	0,991518	0,974458	0,975271	0,951703
Var13	-0,0058419	-0,160466	0,280998	-0,0357182	0,992143	0,991201	0,9931	0,972571	0,975699	0,954281
Var14	0,558693	-0,280713	0,392423	0,166587	0,136336	0,139236	0,16437	0,177389	0,0977797	0,172256
Var15	0,466451	-0,322103	0,293002	0,15774	0,0854169	0,0933029	0,0958911	0,151098	0,042138	0,099935
Var16	0,230023	0,117342	0,260432	-0,0115385	0,0713248	0,0578213	0,140987	-0,00233497	0,0882854	0,168065
Var17	0,358134	-0,202549	0,348539	0,0270411	0,0276557	-0,00342974	0,0120301	0,0374628	0,063419	0,00242682
Var18	-0,129121	-0,101439	-0,0349662	-0,147798	0,792559	0,788408	0,798611	0,809891	0,789992	0,731524
Var19	-0,138971	-0,168211	-0,0277895	-0,151627	0,768367	0,786512	0,777465	0,785779	0,756674	0,754943
Var20	-0,108841	-0,142827	0,0258714	-0,133502	0,806666	0,808383	0,827447	0,833422	0,790939	0,774255
Var21	-0,0585446	-0,115437	0,0461644	-0,0698792	0,789675	0,773787	0,811175	0,836288	0,766207	0,716692
Var22	-0,260961	-0,149043	-0,196734	-0,238852	0,735712	0,731402	0,725845	0,756579	0,752785	0,671376
Var23	-0,193287	-0,345714	-0,0126027	-0,193441	0,728526	0,77642	0,753573	0,747027	0,71404	0,816231
Var24	-0,515382	-0,359181	-0,154661	0,0533267	0,359261	0,385156	0,346606	0,389619	0,358401	0,36727
Var25	-0,571639	-0,139587	-0,378902	-0,129276	0,22615	0,209555	0,189683	0,224466	0,260643	0,14972
Var26	-0,410172	-0,416081	-0,297166	-0,276267	0,199283	0,183232	0,186847	0,330964	0,199421	0,14548
Var27	-0,520371	-0,144453	-0,260706	0,023852	0,447074	0,403837	0,441261	0,547988	0,443004	0,309807
Var28	-0,562081	-0,0109365	-0,258865	0,0999467	0,505893	0,461784	0,492657	0,551033	0,514832	0,354013
Var29	-0,504777	-0,0451025	-0,248613	0,0732234	0,517416	0,456627	0,500666	0,572328	0,534427	0,335528
Var30	0,226471	-0,261215	0,195109	-0,0620985	-0,173324	-0,158468	-0,142554	-0,220889	-0,123032	-0,0583431
Var31	-0,188679	0,0458316	0,0316139	0,454329	0,457735	0,411999	0,48865	0,485183	0,440565	0,351913
Var32	0,339397	0,226688	-0,010352	-0,541664	-0,272767	-0,28578	-0,324742	-0,251501	-0,284802	-0,33144
Var33	-0,182054	-0,15723	-0,327112	0,103138	-0,295673	-0,256483	-0,347249	-0,229768	-0,30491	-0,295327
Var34	-0,596398	0,318013	-0,561502	0,102533	-0,435544	-0,473035	-0,463719	-0,447263	-0,387913	-0,537218
Var35	-0,37741	0,144228	-0,473934	0,0793683	-0,550275	-0,50615	-0,591662	-0,59551	-0,524556	-0,508925
Var36	-0,0971606	-0,0109119	-0,129403	-0,0111955	0,0782263	0,0687188	0,0278976	-0,0283342	0,133164	0,052573
Var37	-0,258009	-0,134693	-0,226769	0,00316196	0,122123	0,101011	0,0669115	0,0483017	0,178288	0,0741783
Var38	-0,20107	-0,398557	-0,406556	-0,377724	-0,502133	-0,488998	-0,50796	-0,427171	-0,500122	-0,412318
Var39	-0,43097	-0,0142435	-0,211394	0,0608544	0,424116	0,356484	0,421739	0,533309	0,414451	0,23571
Var40	-0,405816	-0,0563	-0,182368	0,108784	0,486303	0,415207	0,486672	0,586338	0,484503	0,298921
Var41	-0,531478	-0,105236	-0,268892	0,102277	0,411246	0,357852	0,398574	0,501116	0,415295	0,248579
Var42	-0,466166	-0,199832	-0,356291	-0,139541	0,258049	0,246475	0,20812	0,220814	0,31362	0,207287
Var43	-0,353726	-0,347743	-0,239091	-0,108741	0,287433	0,282012	0,246725	0,245109	0,346929	0,294675
Var44	-0,423605	0,00740496	-0,382906	0,0780156	0,337027	0,254964	0,289076	0,302796	0,432102	0,139144
Var45	-0,164157	-0,344911	0,100892	0,1297	0,0934921	0,166804	0,0949691	0,0090177	0,106754	0,255003
Var46	-0,240657	-0,125073	-0,0232216	0,192555	-0,103517	-0,0520022	-0,118628	-0,224921	-0,070854	0,0110262
Var47	-0,135743	-0,621164	0,152229	0,0621	0,0556105	0,132628	0,071041	0,0482002	0,0474248	0,257086
Var48	-0,182083	-0,647509	0,150781	0,247855	0,429307	0,447041	0,469634	0,480136	0,434446	0,527804
Var49	-0,449671	-0,676003	-0,106355	-0,0409171	0,504901	0,523657	0,516631	0,544021	0,539492	0,602892
Var50	-0,579697	0,0752818	-0,121059	0,294263	0,382917	0,389835	0,413028	0,334671	0,392631	0,38854
Var51	0,337149	0,0554863	-0,0638361	-0,47008	-0,139852	-0,190433	-0,159269	-0,0653633	-0,124499	-0,252156
Var52	0,105682	0,036057	-0,179729	-0,226361	-0,69348	-0,716901	-0,683309	-0,661644	-0,662968	-0,633211
Var53	0,201338	0,190581	0,015608	0,0853078	-0,476923	-0,53059	-0,487885	-0,450357	-0,439172	-0,547155
Var54	0,213915	-0,185944	-0,13117	-0,452761	-0,402287	-0,401657	-0,422767	-0,27473	-0,421502	-0,393129
Var55	0,228098	-0,031854	-0,102435	-0,563909	-0,0662925	-0,0938119	-0,0776477	0,0457678	-0,0891	-0,13073
Var56	0,198683	0,00654673	-0,160912	-0,537648	-0,175044	-0,208454	-0,190675	-0,0579263	-0,188429	-0,254332
Var57	0,019726	0,0359421	-0,29021	-0,544086	-0,127679	-0,168183	-0,136647	-0,0166632	-0,13673	-0,211624
Var58	0,0319078	0,0355311	-0,257375	-0,394624	-0,111066	-0,159251	-0,103988	-0,0477531	-0,0979065	-0,186671
Var59	0,110787	0,103911	-0,198088	-0,496642	-0,10813	-0,161769	-0,107128	-0,027503	-0,104791	-0,207952

Figura 9.2.21. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (1-10)

Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var20	Var21
0,154658	-0,0116968	-0,0058419	0,556693	0,466451	0,230023	0,358134	-0,129121	-0,138971	-0,108841	-0,0585446
-0,0320087	-0,162887	-0,160466	-0,280713	-0,322103	0,117342	-0,202549	-0,101439	-0,166211	-0,142827	-0,115437
0,369368	0,274968	0,280998	0,392423	0,293002	0,260432	0,348539	-0,0349662	-0,0277895	0,0258714	0,0461644
-0,0322498	-0,0351317	-0,0357182	0,166587	0,15774	-0,0115385	0,0270411	-0,147798	-0,151627	-0,133502	-0,098792
0,708492	0,992345	0,992143	0,135336	0,0854169	0,0713248	0,0276557	0,792559	0,768367	0,806666	0,789675
0,700602	0,99163	0,991201	0,139236	0,0933029	0,0578213	-0,00342974	0,788408	0,786512	0,808383	0,773787
0,758432	0,991518	0,9931	0,16437	0,0958911	0,140987	0,0120301	0,798611	0,777465	0,827447	0,811175
0,644943	0,974458	0,972571	0,177389	0,151098	-0,00233497	0,0374628	0,809891	0,785779	0,833422	0,836288
0,714901	0,975271	0,975699	0,0977797	0,042138	0,0982854	0,063419	0,789992	0,756674	0,790939	0,766207
0,755373	0,951703	0,954281	0,172256	0,099935	0,168065	0,00242682	0,731524	0,754943	0,774255	0,716692
1,0	0,709514	0,726719	0,114598	-0,104432	0,747966	0,121812	0,539939	0,4986	0,59248	0,560122
0,709514	1,0	0,999694	0,155553	0,109269	0,063471	0,0286899	0,803797	0,792447	0,825964	0,801138
0,726719	0,999694	1,0	0,155927	0,103143	0,0881039	0,0324623	0,802427	0,789938	0,825906	0,800561
0,114598	0,155553	0,159927	1,0	0,962579	0,000127248	0,119727	-0,0171154	-0,00508793	0,0488846	0,111103
-0,104432	0,109269	0,103143	0,962579	1,0	-0,266413	0,0855795	-0,0424223	-0,0167148	0,00926969	0,0747319
0,747966	0,063471	0,0881039	0,000127248	-0,266413	1,0	0,151196	0,0133728	-0,0375438	0,0634735	0,0430464
0,121812	0,0286899	0,0324623	0,119727	0,0855795	0,151196	1,0	-0,0592726	-0,086524	-0,0509515	-0,0640482
0,539939	0,803797	0,802427	-0,0171154	-0,0424223	0,0133728	-0,0592726	1,0	0,988439	0,988538	0,970273
0,4986	0,792447	0,789938	-0,00508793	-0,0167148	-0,0375438	-0,086524	0,988439	1,0	0,984309	0,951799
0,59248	0,825964	0,825906	0,0488846	0,00926969	0,0634735	-0,0509515	0,988538	0,984309	1,0	0,980507
0,560122	0,801138	0,800561	0,111103	0,0747319	0,0430464	-0,0640482	0,970273	0,951799	0,980507	1,0
0,441997	0,75161	0,748131	-0,131973	-0,126923	-0,0739344	-0,0804771	0,973	0,962219	0,938382	0,905065
0,527347	0,78091	0,779761	0,0300331	0,00913201	0,0075628	-0,0920387	0,914553	0,95599	0,93695	0,872023
-0,0125907	0,389826	0,379587	-0,383039	-0,264898	-0,385476	-0,202436	0,429905	0,467251	0,426523	0,392591
-0,0304782	0,219798	0,213183	-0,579705	-0,492702	-0,241598	-0,274168	0,329306	0,318637	0,279097	0,257321
-0,0658551	0,235817	0,227756	-0,443027	-0,334911	-0,304798	-0,0515445	0,424538	0,415541	0,387514	0,408288
0,093002	0,457749	0,449347	-0,406987	-0,317413	-0,287341	-0,0921402	0,600678	0,572806	0,580618	0,614834
0,159712	0,497851	0,490677	-0,493521	-0,422171	-0,22993	-0,146262	0,638113	0,60798	0,611298	0,626408
0,17042	0,504896	0,497951	-0,420881	-0,355626	-0,219699	-0,136987	0,645157	0,59884	0,611153	0,648356
0,220821	-0,1614	-0,149455	-0,152707	-0,263387	0,467279	0,247509	0,0263659	0,0168887	0,0325296	0,00534116
0,382304	0,443733	0,44578	0,130875	0,088287	0,126276	-0,379071	0,320386	0,271772	0,348685	0,429559
-0,317719	-0,293457	-0,297077	-0,0983044	-0,0535277	-0,164752	0,26515	-0,262859	-0,271699	-0,325363	-0,350991
-0,635104	-0,271127	-0,286499	-0,286564	-0,0942623	-0,635646	0,00364047	-0,0431649	0,0102987	-0,116759	-0,10648
-0,531754	-0,464114	-0,471546	-0,666367	-0,561685	-0,304525	-0,275934	-0,178864	-0,185866	-0,239053	-0,24537
-0,73727	-0,549431	-0,561705	-0,326605	-0,174133	-0,528617	-0,354267	-0,330043	-0,259772	-0,385281	-0,437575
0,0549782	0,0482895	0,0491001	0,142157	0,130271	0,0310588	0,0524732	-0,190868	-0,217502	-0,215707	-0,206918
-0,0343378	0,101598	0,0979252	0,167767	0,203733	-0,147143	-0,0907271	-0,193347	-0,216715	-0,216214	-0,20153
-0,440415	-0,466751	-0,469981	0,141281	0,22054	-0,195483	-0,196293	-0,513246	-0,491089	-0,504493	-0,500943
0,121716	0,418108	0,411689	-0,367728	-0,300013	-0,206789	-0,0202017	0,550584	0,497396	0,532934	0,59295
0,194922	0,480725	0,475295	-0,30697	-0,255014	-0,162736	0,00176759	0,588313	0,532316	0,575772	0,635139
0,03562	0,412446	0,403118	-0,406804	-0,308482	-0,324883	-0,107591	0,546883	0,513545	0,520823	0,565466
-0,00500808	0,25634	0,24979	0,0566172	0,120785	-0,252209	-0,18269	0,048586	0,0334317	0,0207265	0,0250038
0,134297	0,299931	0,297264	0,16955	0,192813	-0,0971804	0,158452	0,047798	0,0402212	0,0443159	0,0337807
0,075625	0,303584	0,29842	0,0485279	0,0840523	-0,172821	0,0132216	0,288753	0,227938	0,2429	0,246408
0,000431445	0,122735	0,119757	0,0262377	0,0601786	-0,131429	-0,185647	0,000333594	0,0774376	0,0369528	-0,0496698
-0,167142	-0,10077	-0,104165	-0,0464855	-0,00496764	-0,15569	-0,244957	-0,240814	-0,17922	-0,221716	-0,299856
-0,0684043	0,117162	0,112052	0,128086	0,19176	-0,225799	-0,0367744	-0,0203296	0,0702425	0,0408798	-0,0253936
0,334593	0,490718	0,490142	0,227577	0,216941	0,00601899	0,0884598	0,448388	0,473364	0,50797	0,532951
0,354334	0,572468	0,570605	0,0391372	0,052949	-0,0425876	0,161484	0,428179	0,449755	0,466007	0,431546
0,3583	0,382531	0,385174	-0,330702	-0,360572	0,144305	-0,181963	0,347276	0,34319	0,389751	0,370746
0,000652206	-0,157891	-0,153437	-0,11549	-0,149015	0,166765	0,215258	0,064331	-0,00802944	-0,00909672	0,0427412
-0,216033	-0,687066	-0,677224	-0,086919	-0,155986	0,346499	0,231215	-0,675834	-0,704849	-0,691166	-0,668042
-0,252518	-0,495338	-0,491853	-0,0307072	-0,0555386	0,12051	0,342092	-0,519105	-0,568737	-0,553933	-0,501221
-0,394854	-0,372975	-0,377113	-0,0219031	0,0494943	-0,200132	0,187282	-0,27784	-0,282161	-0,324935	-0,288158
0,0115542	-0,0628006	-0,0604775	-0,180072	-0,187648	0,0901914	0,130324	0,119235	0,0721706	0,0632488	0,105513
-0,0956298	-0,173829	-0,172499	-0,188294	-0,180623	0,0434048	0,155841	0,0234279	-0,0268303	-0,039569	0,00572985
0,0014681	-0,129752	-0,126155	-0,343339	-0,355713	0,141067	0,0524378	0,114741	0,0575444	0,0515054	0,0965512
0,166893	-0,126516	-0,117177	-0,271827	-0,344639	0,369123	-0,0260044	0,124127	0,0524923	0,076986	0,120841
0,130071	-0,125978	-0,117976	-0,279852	-0,342165	0,318791	0,0641678	0,102928	0,0239897	0,0497885	0,0997021

Figura 9.2.22. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (11-21)

Var22	Var23	Var24	Var25	Var26	Var27	Var28	Var29	Var30	Var31	Var32
-0,260961	-0,193287	-0,515382	-0,571639	-0,410172	-0,520371	-0,562061	-0,504777	0,226471	-0,196679	0,339397
-0,149043	-0,345714	-0,359181	-0,139587	-0,416081	-0,144453	-0,0109365	-0,0451025	-0,261215	0,0458316	0,226688
-0,196734	-0,0126027	-0,154661	-0,378602	-0,297166	-0,260706	-0,258865	-0,248613	0,195109	0,0316139	-0,010352
-0,238852	-0,193441	0,0533267	-0,129276	-0,276267	0,023852	0,0999467	0,0732234	-0,0620985	0,454329	-0,541664
0,735712	0,728526	0,359261	0,22615	0,199283	0,447074	0,505893	0,517416	-0,173324	0,457735	-0,272767
0,731402	0,77642	0,385156	0,209555	0,183232	0,403837	0,461784	0,456627	-0,158468	0,411999	-0,28578
0,725845	0,753573	0,346606	0,189683	0,186847	0,441261	0,492657	0,500666	-0,142554	0,48965	-0,324742
0,756579	0,747027	0,389619	0,224466	0,330964	0,547988	0,551033	0,572328	-0,220889	0,485183	-0,251501
0,752785	0,71404	0,358401	0,260843	0,199421	0,443004	0,514832	0,534427	-0,123032	0,440565	-0,284802
0,671376	0,816231	0,36727	0,14972	0,14548	0,309807	0,354013	0,335528	-0,0583431	0,351913	-0,33144
0,441997	0,527347	-0,0125907	-0,0304762	-0,0658551	0,093002	0,159721	0,17042	0,220821	0,382304	-0,317719
0,75161	0,78091	0,389826	0,219798	0,235817	0,457749	0,497851	0,504896	-0,1614	0,443733	-0,293457
0,748131	0,779761	0,379587	0,213183	0,227756	0,449347	0,490677	0,497951	-0,149455	0,44578	-0,297077
-0,131973	0,0300331	-0,383039	-0,579705	-0,443027	-0,406987	-0,493521	-0,420881	-0,152707	0,130875	-0,0983044
-0,126923	0,00913201	-0,264898	-0,492702	-0,334911	-0,317413	-0,422171	-0,355626	-0,263387	0,088287	-0,0535277
-0,0739344	0,0075628	-0,385476	-0,241598	-0,304798	-0,287341	-0,22993	-0,219699	0,467279	0,126276	-0,164752
-0,0804771	-0,0920387	-0,202436	-0,274168	-0,0515445	-0,0921402	-0,146262	-0,136987	0,247509	-0,379071	0,26515
0,973	0,914553	0,429905	0,329306	0,424538	0,606078	0,638113	0,645157	0,0263659	0,320386	-0,262859
0,962219	0,95599	0,467251	0,318637	0,415541	0,572806	0,60798	0,59884	0,0168887	0,271772	-0,271699
0,938382	0,93695	0,426523	0,279097	0,387514	0,580618	0,611298	0,611153	0,0325296	0,348685	-0,325363
0,905065	0,872023	0,392591	0,257321	0,408288	0,614834	0,626408	0,648356	0,00534116	0,429559	-0,350991
1.0	0,893923	0,479247	0,419097	0,515238	0,647923	0,677933	0,684528	-0,0109427	0,275782	-0,196017
0,893923	1.0	0,498596	0,272774	0,376451	0,505821	0,527523	0,497486	0,0416027	0,235161	-0,343231
0,479247	0,498596	1.0	0,840588	0,755828	0,717413	0,7781	0,753428	0,0597451	0,248364	-0,506906
0,419097	0,272774	0,840588	1.0	0,719486	0,585307	0,712415	0,727529	0,186223	0,124209	-0,281625
0,515238	0,376451	0,755828	0,719486	1.0	0,814307	0,734047	0,766062	0,133867	0,187916	-0,176001
0,647923	0,505821	0,717413	0,585307	0,814307	1.0	0,95407	0,947074	-0,127387	0,527354	-0,406643
0,677933	0,527523	0,7781	0,712415	0,734047	0,95407	1.0	0,98219	-0,0891933	0,51125	-0,457984
0,684528	0,497486	0,753428	0,727529	0,766062	0,947074	0,98219	1.0	-0,0526635	0,528032	-0,447706
-0,0109427	0,0416027	0,0597451	0,186223	0,133867	-0,127387	-0,0891933	-0,0526635	1.0	-0,314984	-0,0997419
0,275782	0,235161	0,248364	0,124209	0,187916	0,527354	0,51125	0,528032	-0,314984	1.0	-0,677975
-0,196017	-0,343231	-0,506906	-0,281625	-0,176001	-0,406643	-0,457984	-0,447706	-0,0997419	-0,677975	1.0
0,0789704	-0,0316305	0,26794	0,18312	0,412918	0,298985	0,2238	0,176057	-0,268803	-0,101066	0,190399
-0,0691093	-0,225284	0,251035	0,400977	0,197925	0,313946	0,395212	0,349236	-0,0512996	-0,0509141	-0,0441558
-0,215553	-0,225284	0,14377	0,196292	-0,0838645	-0,133315	-0,0430373	-0,108523	-0,204499	-0,346112	0,128698
-0,177081	-0,236347	-0,152638	0,0953388	-0,293269	-0,337426	-0,252435	-0,200099	0,0897345	-0,146206	0,00727992
-0,145023	-0,208497	0,0400391	0,240523	-0,154799	-0,178558	-0,104624	-0,0408768	-0,0880051	0,032576	-0,117289
-0,438126	-0,408142	-0,0285862	0,150049	0,0430149	-0,314356	-0,373537	-0,328731	0,133705	-0,261401	0,132024
0,57537	0,39251	0,557543	0,459807	0,732597	0,969496	0,905436	0,906019	-0,142734	0,570274	-0,347855
0,606617	0,436035	0,588188	0,475403	0,721868	0,968897	0,920264	0,930931	-0,130192	0,619941	-0,423301
0,596825	0,435914	0,725722	0,615345	0,786601	0,989413	0,962833	0,963642	-0,14701	0,543685	-0,434019
0,119322	0,0454716	0,307658	0,409394	0,140396	0,0930872	0,140453	0,207723	-0,197509	0,0815834	-0,240607
0,0926826	0,0912648	0,170226	0,234935	0,00165352	-0,00762874	0,0329503	0,0823733	-0,0745544	-0,0250505	-0,214189
0,365487	0,169417	0,282348	0,390102	0,114832	0,294849	0,404319	0,468114	-0,271925	0,280047	-0,28854
-0,0078774	0,214576	0,586913	0,482734	0,0463631	-0,108067	0,0533008	0,0300195	0,2352	-0,135408	-0,412447
-0,22889	-0,0599263	0,392684	0,406265	-0,176224	-0,259775	-0,0659581	-0,092864	0,163502	-0,201463	-0,312574
-0,0332652	0,248313	0,625146	0,398466	0,198574	0,09651826	0,067674	0,0516123	0,271503	-0,143281	-0,424051
0,401141	0,575282	0,518967	0,194452	0,391219	0,524349	0,462128	0,485235	0,206773	0,446595	-0,740398
0,465347	0,58492	0,551626	0,298218	0,437702	0,541163	0,485742	0,488009	0,0189575	0,328711	-0,565781
0,304204	0,377797	0,502889	0,35739	0,209367	0,540829	0,615019	0,547817	0,0545174	0,47335	-0,74587
0,110555	-0,15984	-0,323397	-0,0496	0,292713	-0,0191531	-0,135268	-0,0428222	0,280883	-0,240003	0,58735
-0,611972	-0,664216	-0,671188	-0,451641	-0,26751	-0,461259	-0,569316	-0,545836	0,0752813	-0,316507	0,445721
-0,46389	-0,59151	-0,591523	-0,542453	-0,216442	-0,199836	-0,335146	-0,307556	-0,194917	-0,0883923	0,368759
-0,189353	-0,310827	-0,378502	-0,322731	0,201173	-0,0837105	-0,3203	-0,284967	-0,03383	-0,322921	0,6593
0,168743	-0,0470867	-0,210009	0,00120134	0,406244	0,100222	-0,0428369	0,0159365	0,15931	-0,180249	0,583918
0,0903689	-0,146755	-0,271752	-0,0691358	0,373241	0,0796046	-0,0834854	-0,0267464	0,0915543	-0,20075	0,615995
0,185192	-0,0702982	-0,112584	0,163313	0,487662	0,193931	0,091241	0,144998	0,127026	-0,109357	0,469441
0,157799	-0,0737774	-0,0355712	0,323481	0,411834	0,0965492	0,0863193	0,159903	0,378558	-0,00598842	0,2031
0,137157	-0,118437	-0,184603	0,146694	0,384394	0,0970664	0,0229564	0,0954257	0,320967	-0,0919359	0,396658

Figura 9.2.23. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (22-32)

Var33	Var34	Var35	Var36	Var37	Var38	Var39	Var40	Var41	Var42	Var43
-0,182054	-0,596398	-0,37741	-0,0971606	-0,258009	-0,20107	-0,43097	-0,405816	-0,531478	-0,466166	-0,353726
-0,15723	0,318013	0,144228	-0,0109119	-0,134693	-0,398557	-0,0142435	-0,0563	-0,105236	-0,199832	-0,347743
-0,327112	-0,561502	-0,479394	-0,129403	-0,226769	-0,406556	-0,211394	-0,162368	-0,268892	-0,356291	-0,239091
0,103138	0,102533	0,0793683	-0,0111955	0,00316196	-0,377724	0,0608544	0,108784	0,102277	-0,139541	-0,108741
-0,295673	-0,435544	-0,550275	0,0782263	0,122123	-0,502133	0,424116	0,486303	0,411246	0,258049	0,287433
-0,256483	-0,473035	-0,50615	0,0687188	0,101011	-0,488998	0,356484	0,415207	0,357852	0,246475	0,282012
-0,347249	-0,463719	-0,591662	0,0278976	0,0669115	-0,50796	0,421739	0,486672	0,398574	0,20812	0,246725
-0,229768	-0,447263	-0,59551	-0,0283342	0,0483017	-0,427171	0,533309	0,586338	0,501116	0,220814	0,245109
-0,30491	-0,387913	-0,524556	0,133164	0,178288	-0,500122	0,414451	0,484503	0,415295	0,31362	0,346929
-0,295327	-0,537218	-0,506925	0,0525273	0,0741783	-0,412318	0,235371	0,298921	0,248579	0,207287	0,294875
-0,635104	-0,531754	-0,73727	0,0549782	-0,0343378	-0,440415	0,121716	0,194922	0,03562	-0,00500808	0,134297
-0,271127	-0,464114	-0,549431	0,0482895	0,101598	-0,466751	0,418108	0,480725	0,412446	0,25634	0,299931
-0,286499	-0,471546	-0,561705	0,0491001	0,0979252	-0,469981	0,411689	0,475295	0,403118	0,24979	0,297264
-0,286564	-0,666367	-0,326605	0,142157	0,167767	0,141281	-0,367728	-0,30697	-0,406804	0,0566172	0,16955
-0,0942623	-0,561685	-0,174133	0,130271	0,203733	0,22054	-0,300013	-0,255014	-0,308482	0,120785	0,192813
-0,635646	-0,304525	-0,528617	0,0310588	-0,147143	-0,195483	-0,206789	-0,162736	-0,324883	-0,252209	-0,0971804
0,00364047	-0,275934	-0,354267	0,0524732	-0,0907271	-0,196293	-0,0202017	0,00176759	-0,107591	-0,18269	0,158452
-0,0431649	-0,178864	-0,330043	-0,190868	-0,193347	-0,513246	0,550584	0,588313	0,546883	0,048586	0,047798
0,0102987	-0,185866	-0,259772	-0,217502	-0,216715	-0,491089	0,497396	0,532316	0,513545	0,0334317	0,0402212
-0,116759	-0,239053	-0,385281	-0,215707	-0,216214	-0,504493	0,532934	0,575772	0,520823	0,0207265	0,0443159
-0,10648	-0,24537	-0,437575	-0,206918	-0,20153	-0,500943	0,59295	0,635139	0,565466	0,0250038	0,0337807
0,0789704	-0,0691093	-0,215553	-0,177081	-0,145023	-0,438126	0,57537	0,605617	0,596825	0,119322	0,0926826
-0,0316305	-0,225284	-0,225852	-0,236347	-0,208497	-0,408142	0,39251	0,436035	0,435914	0,0454716	0,0912648
0,26794	0,251035	0,14377	-0,152638	0,0400391	-0,0285862	0,557543	0,588188	0,725722	0,307658	0,170226
0,18312	0,400977	0,196292	0,0953388	0,240523	0,150049	0,459807	0,475403	0,615345	0,409394	0,234935
0,412918	0,197925	-0,0838645	-0,293269	-0,154799	0,0430149	0,732597	0,721858	0,786601	0,140396	0,00165352
0,298985	0,313946	-0,133315	-0,337426	-0,178558	-0,314356	0,969496	0,968897	0,989413	0,0930872	-0,00762874
0,2238	0,395212	-0,0430373	-0,252435	-0,104624	-0,373537	0,905436	0,920264	0,962833	0,140453	0,0329503
0,176057	0,349236	-0,108523	-0,200099	-0,0408768	-0,328731	0,906019	0,930931	0,963642	0,207723	0,0823733
-0,268803	-0,0512996	-0,204499	0,0897345	-0,0880051	0,133705	-0,142734	-0,130192	-0,14701	-0,197509	-0,0745544
-0,101066	-0,0509141	-0,346112	-0,146206	0,032576	-0,261401	0,570274	0,619941	0,543685	0,0815834	-0,0250505
0,190399	-0,0441558	0,128698	0,00727992	-0,117289	0,132024	-0,347855	-0,423301	-0,434019	-0,240607	-0,214189
1,0	0,359618	0,5342	-0,306075	-0,240694	0,0159778	0,231696	0,17757	0,306124	-0,177722	-0,222389
0,359618	1,0	0,728321	-0,200781	-0,0938481	-0,00701941	0,277583	0,239406	0,389993	-0,0570759	-0,201273
0,5342	0,728321	1,0	-0,102795	-0,00144978	0,197028	-0,253758	-0,285189	-0,0655388	0,00631562	-0,133435
-0,306075	-0,200781	-0,102795	1,0	0,92406	0,421377	-0,325616	-0,324729	-0,301295	0,729656	0,818528
-0,240694	-0,0938481	-0,00144978	0,92406	1,0	0,510856	-0,205702	-0,183774	-0,120691	0,856775	0,870018
0,0159778	-0,00701941	0,197028	0,421377	0,510856	1,0	-0,350745	-0,386022	-0,305521	0,363779	0,326587
0,231696	0,277583	-0,253758	-0,325616	-0,205702	-0,350745	1,0	0,988546	0,958048	0,0123701	-0,0654702
0,17757	0,239406	-0,285189	-0,324729	-0,183774	-0,386022	0,988546	1,0	0,964843	0,0430198	-0,0257514
0,306124	0,389993	-0,0655388	-0,301295	-0,120691	-0,305521	0,958048	0,964843	1,0	0,131977	0,0177897
-0,177722	-0,0570759	0,00631562	0,729656	0,856775	0,363779	0,0123701	0,0430198	0,131977	1,0	0,890337
-0,222389	-0,201273	-0,133435	0,818528	0,870018	0,326587	-0,0654702	-0,0257514	0,0177897	0,890337	1,0
-0,0956376	0,243051	0,118519	0,266443	0,46878	-0,0513983	0,24841	0,335564	0,371504	0,58891	0,533267
-0,12791	0,00502491	0,309561	0,186646	0,302073	0,250067	-0,295843	-0,225816	-0,0728472	0,357229	0,312481
-0,16514	0,23095	0,497884	0,356064	0,465712	0,335344	-0,414506	-0,362718	-0,188816	0,410083	0,358806
-0,0538626	-0,074053	0,188772	0,0941517	0,233093	0,333737	-0,172273	-0,113302	0,0255438	0,302942	0,32414
-0,0874254	-0,154219	-0,319273	-0,0512158	0,0647947	-0,158826	0,444717	0,516211	0,517383	0,207687	0,322034
-0,0677079	-0,136488	-0,280638	0,1281	0,275568	-0,0490464	0,43731	0,496798	0,517673	0,473706	0,595587
-0,25059	0,201963	-0,159657	0,114122	0,129084	-0,280048	0,520675	0,529903	0,536556	0,288475	0,276739
0,132577	-0,191016	-0,330539	-0,0913723	-0,23751	0,0723432	0,0765557	0,027211	-0,0698532	-0,224704	-0,270931
0,048175	0,103915	0,0566236	0,0388367	-0,0530341	0,300323	-0,368316	-0,410973	-0,460885	-0,212043	-0,114117
0,177843	0,173272	0,0375058	-0,200536	-0,223743	-0,137986	-0,08481	-0,105202	-0,174661	-0,276335	-0,239064
0,425099	-0,111987	-0,0649905	-0,150731	-0,212504	0,280615	-0,0180915	-0,10971	-0,140554	-0,233316	-0,239699
0,233171	-0,229	-0,350625	-0,154836	-0,279351	0,108803	0,180155	0,108947	0,0234872	-0,246764	-0,284281
0,29284	-0,152488	-0,274542	-0,191291	-0,303517	0,114518	0,189365	0,0928542	0,0106203	-0,257645	-0,30996
0,274157	-0,0430008	-0,243972	-0,175678	-0,271553	0,109407	0,262154	0,19853	0,133927	-0,187579	-0,259176
0,0394004	-0,0757883	-0,290367	-0,0286763	-0,126396	0,219785	0,153542	0,130811	0,0593451	-0,112995	-0,179758
0,0305673	-0,122259	-0,38368	-0,0515465	-0,193862	0,145424	0,194648	0,140529	0,0400111	-0,168115	-0,230581

Figura 9.2.24. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (33-43)

Var44	Var45	Var46	Var47	Var48	Var49	Var50	Var51	Var52	Var53	Var54
-0,423605	-0,164157	-0,240657	-0,135743	-0,162083	-0,449671	-0,579697	0,337149	0,105682	0,201338	0,213915
0,00740496	-0,344911	-0,125073	-0,621164	-0,647509	-0,676003	0,0752818	0,0554863	0,036057	0,190581	-0,185944
-0,382906	0,100892	-0,0232216	0,15229	0,150781	-0,106355	-0,121059	-0,0638361	-0,179729	0,015608	-0,13117
0,0780156	0,1297	0,192555	0,0621	0,247855	-0,0409171	0,294263	-0,47008	-0,226361	0,0853078	-0,452761
0,337027	0,0934921	-0,103517	0,0556105	0,429307	0,504901	0,382917	-0,139852	-0,69348	-0,476923	-0,402287
0,254964	0,166804	-0,0520022	0,132628	0,447041	0,523657	0,389835	-0,190433	-0,716901	-0,53059	-0,401657
0,289076	0,0949691	-0,118528	0,071041	0,469634	0,516631	0,413028	-0,159269	-0,683309	-0,487885	-0,422767
0,302796	0,0090177	-0,224921	0,0482002	0,480136	0,544021	0,334671	-0,0653633	-0,661644	-0,450357	-0,27473
0,432102	0,106754	-0,0700854	0,0474248	0,434446	0,539492	0,392831	-0,124499	-0,662968	-0,439172	-0,421502
0,139144	0,255003	0,0110262	0,257086	0,527804	0,602892	0,38854	-0,252156	-0,633211	-0,547155	-0,393129
0,075625	0,000431445	-0,167142	-0,0684043	0,334593	0,354334	0,3583	0,000652206	-0,216033	-0,252518	-0,394854
0,303584	0,122735	-0,10077	0,117162	0,490718	0,572468	0,382531	-0,157691	-0,687066	-0,495338	-0,372975
0,29842	0,119757	-0,104165	0,112052	0,490142	0,570605	0,385174	-0,153437	-0,677224	-0,491853	-0,377113
0,0485279	0,0262377	-0,0464855	0,128086	0,227577	0,0391372	-0,330702	-0,11549	-0,086919	-0,0307072	-0,0219031
0,0840523	0,0601786	-0,00496764	0,19176	0,216941	0,052949	-0,360572	-0,149015	-0,155986	-0,0553386	0,0494943
-0,172821	-0,131429	-0,15569	-0,225799	0,00601899	-0,0425876	0,144305	0,166765	0,346499	0,12051	-0,200132
0,0132216	-0,185647	-0,244957	-0,0367744	0,0884598	0,161484	-0,181963	0,215258	0,231215	0,342092	0,187282
0,288753	0,000333594	-0,240814	-0,0203296	0,448388	0,428179	0,347276	0,064331	-0,675834	-0,519105	-0,27784
0,227938	0,0774376	-0,17922	0,0702425	0,473364	0,449755	0,34319	-0,00802944	-0,704849	-0,568737	-0,282161
0,2429	0,0369528	-0,221716	0,0408798	0,50797	0,466007	0,389751	-0,00909672	-0,691166	-0,553933	-0,324935
0,246408	-0,0496698	-0,299856	-0,0253936	0,532951	0,431546	0,370746	0,0427412	-0,668042	-0,501221	-0,288158
0,365487	-0,0078774	-0,22889	-0,0332652	0,401141	0,465347	0,304204	0,110555	-0,611972	-0,46389	-0,189353
0,169417	0,214576	-0,0599263	0,248313	0,575282	0,58492	0,377797	-0,15984	-0,664216	-0,59151	-0,310827
0,282348	0,586913	0,392684	0,625146	0,518967	0,551626	0,502889	-0,323397	-0,671188	-0,591523	-0,378502
0,390102	0,482734	0,406265	0,398466	0,194452	0,298218	0,35739	-0,0496	-0,451641	-0,542453	-0,322731
0,114832	0,0463631	-0,176224	0,198574	0,391129	0,437702	0,209367	0,292713	-0,26751	-0,216442	0,201173
0,294849	-0,108067	-0,259775	0,00951826	0,524349	0,541163	0,540829	-0,0191531	-0,461259	-0,199836	-0,0837105
0,404319	0,0533008	-0,0659581	0,067674	0,462128	0,485742	0,615019	-0,135268	-0,569316	-0,335146	-0,3203
0,468114	0,0300195	-0,092864	0,0516123	0,485235	0,488009	0,547817	-0,0428222	-0,545836	-0,307556	-0,284967
-0,271925	0,2352	0,163502	0,271503	0,206773	0,0189575	0,0545174	0,280883	0,0752813	-0,194917	-0,03383
0,280047	-0,135408	-0,201463	-0,143281	0,446595	0,328711	0,47335	-0,240003	-0,316507	-0,0883923	-0,322921
-0,28854	-0,412447	-0,312574	-0,424051	-0,740398	-0,565781	-0,74587	0,58735	0,445721	0,368759	0,6593
-0,0956376	-0,12791	-0,16514	-0,0538626	-0,0874254	-0,0677079	-0,25059	0,132577	0,048175	0,177843	0,425099
0,243051	0,00502491	0,23095	-0,074053	-0,154219	-0,136488	0,201963	-0,191016	0,103915	0,173272	-0,111987
0,118519	0,309561	0,497884	0,188772	-0,319273	-0,280638	-0,159657	-0,330539	0,0566236	0,0375058	-0,0649905
0,266443	0,186646	0,356064	0,0941517	-0,0512158	0,1281	0,114122	-0,0913723	0,0388367	-0,200536	-0,150731
0,46878	0,302073	0,465712	0,233093	0,0647947	0,275568	0,129084	-0,23751	-0,0530341	-0,223743	-0,212504
-0,0513983	0,250067	0,335344	0,333737	-0,158826	-0,0480464	-0,280048	0,0723432	0,300323	-0,137986	0,280615
0,24841	-0,295843	-0,414506	-0,172273	0,444717	0,43731	0,520675	0,0765557	-0,368316	-0,08481	-0,0180915
0,335564	0,225816	0,362718	-0,113302	0,516211	0,496798	0,529903	0,027211	0,410973	0,105202	-0,10971
0,371504	-0,0728472	-0,188816	0,0255438	0,517383	0,517673	0,536556	-0,0698532	-0,460885	-0,174661	-0,140554
0,58891	0,357229	0,410083	0,302942	0,207687	0,473706	0,288475	-0,224704	-0,212043	-0,276335	-0,233316
0,533267	0,312481	0,358806	0,32414	0,322034	0,595587	0,276739	-0,270931	-0,114117	-0,239064	-0,239699
1.0	0,20433	0,268547	0,0731863	0,198614	0,383933	0,183142	-0,241377	-0,279045	-0,0826939	-0,463476
0,20433	1.0	0,914891	0,91298	0,27584	0,27158	0,211672	-0,592041	-0,499833	-0,652805	-0,62849
0,268547	0,914891	1.0	0,771544	0,0791352	0,107211	0,188153	-0,661211	-0,320082	-0,49172	-0,635637
0,0731863	0,91298	0,771544	1.0	0,496335	0,457189	0,19738	-0,557889	-0,443068	-0,580455	-0,424229
0,198614	0,27584	0,0791352	0,496335	1.0	0,847459	0,527996	-0,374588	-0,423464	-0,29472	-0,310718
0,383933	0,27158	0,107211	0,457189	0,847459	1.0	0,550179	-0,364023	-0,328491	-0,253872	-0,233917
0,183142	0,211672	0,188153	0,19738	0,527996	0,550179	1.0	-0,52434	-0,453569	-0,388005	-0,584042
-0,241377	-0,592041	-0,661211	-0,557889	-0,374588	-0,364023	-0,52434	1.0	0,416415	0,338441	0,720335
-0,279045	-0,499833	-0,320082	-0,443068	-0,423464	-0,328491	-0,453569	0,416415	1.0	0,791933	0,5893
-0,0826939	-0,652805	-0,49172	-0,580455	-0,29472	-0,253872	-0,388005	0,338441	0,791933	1.0	0,546611
-0,463476	-0,62849	-0,635637	-0,424229	-0,310718	-0,233917	-0,584042	0,720335	0,5893	0,546611	1.0
-0,379936	-0,597652	-0,712252	-0,512278	-0,331024	-0,278047	-0,451771	0,93955	0,357698	0,226569	0,776827
-0,351251	-0,665988	-0,74641	-0,574872	-0,384914	-0,312608	-0,487557	0,944501	0,453893	0,369739	0,842124
-0,24172	-0,558793	-0,650826	-0,526115	-0,347782	-0,263874	-0,34337	0,891368	0,399409	0,234089	0,657182
-0,104269	-0,278761	-0,374224	-0,338926	-0,276439	-0,273877	-0,229536	0,779637	0,283592	-0,00642807	0,320578
-0,241915	-0,51597	-0,590663	-0,516908	-0,343964	-0,310984	-0,27482	0,914005	0,374219	0,158536	0,548376

Figura 9.2.25. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (44-54)

Var55	Var56	Var57	Var58	Var59
0,228098	0,198683	0,019726	0,0319078	0,110787
-0,031854	0,00654673	0,0359421	0,0355311	0,103911
-0,102435	-0,160912	-0,29021	-0,257375	-0,198088
-0,563909	-0,537648	-0,544086	-0,394624	-0,496642
-0,0662925	-0,175044	-0,127679	-0,111066	-0,10813
-0,0938119	-0,208454	-0,168183	-0,159251	-0,161769
-0,0776477	-0,190575	-0,136647	-0,103988	-0,107128
0,0457678	-0,0579263	-0,0166632	-0,0477531	-0,027503
-0,0891	-0,188429	-0,13673	-0,0979065	-0,104791
-0,13073	-0,254332	-0,211624	-0,186671	-0,207952
0,0115542	-0,0956298	0,0014681	0,166893	0,130071
-0,0628006	-0,173829	-0,129752	-0,126516	-0,125978
-0,0604775	-0,172499	-0,126155	-0,117177	-0,117976
-0,180072	-0,188294	-0,343339	-0,271827	-0,279852
-0,187648	-0,180623	-0,355713	-0,344639	-0,342165
0,0901914	0,0434048	0,141067	0,369123	0,318791
0,130324	0,155841	0,0524378	-0,0260044	0,0641678
0,119235	0,0234279	0,114741	0,124127	0,102928
0,0721706	-0,0268303	0,0575444	0,0524923	0,0239897
0,0632488	-0,039569	0,0515054	0,076986	0,0497885
0,105513	0,00572985	0,0965512	0,120841	0,0997021
0,168743	0,0903689	0,185192	0,157799	0,137157
-0,0470867	-0,146755	-0,0702982	-0,0737774	-0,118437
-0,210009	-0,271752	-0,112584	-0,0355712	-0,184603
0,00120134	-0,0691358	0,163313	0,323481	0,146694
0,406244	0,373241	0,487662	0,411834	0,384394
0,100222	0,0796046	0,193931	0,0965492	0,0970664
-0,0428369	-0,0834854	0,091241	0,0863193	0,0229564
0,0159365	-0,0267464	0,144998	0,159903	0,0954257
0,15931	0,0915543	0,127026	0,378558	0,320967
-0,180249	-0,20075	-0,109357	-0,00598842	-0,0919359
0,583918	0,615995	0,469441	0,2031	0,396658
0,233171	0,29284	0,274157	0,0394004	0,0306673
-0,229	-0,152488	-0,0430008	-0,0757883	-0,122259
-0,350625	-0,274542	-0,243972	-0,290367	-0,38368
-0,154836	-0,191291	-0,175678	-0,0286763	-0,0515465
-0,279351	-0,303517	-0,271553	-0,126396	-0,193662
0,108803	0,114518	0,109407	0,219785	0,145424
0,180155	0,169365	0,262154	0,153542	0,194648
0,108947	0,0928542	0,19853	0,130811	0,140529
0,0234872	0,0106203	0,133927	0,0593451	0,0400111
-0,246764	-0,257645	-0,187579	-0,112995	-0,168115
-0,284281	-0,30996	-0,259176	-0,179758	-0,230581
-0,379936	-0,351251	-0,24172	-0,104269	-0,241915
-0,597652	-0,665988	-0,558793	-0,278761	-0,51597
-0,712252	-0,74641	-0,650826	-0,374224	-0,590663
-0,512278	-0,574872	-0,526115	-0,338926	-0,516908
-0,331024	-0,384914	-0,347782	-0,276439	-0,343964
-0,278047	-0,312608	-0,263874	-0,273877	-0,310984
-0,451771	-0,487557	-0,34337	-0,229536	-0,27482
0,93955	0,944501	0,891368	0,779637	0,914005
0,357698	0,453893	0,399409	0,283592	0,374219
0,226569	0,369739	0,234089	-0,00642807	0,158536
0,776827	0,842124	0,657182	0,320578	0,548376
1.0	0,982563	0,947631	0,766657	0,912483
0,982563	1.0	0,940259	0,722275	0,887923
0,947631	0,940259	1.0	0,871373	0,948916
0,766657	0,722275	0,871373	1.0	0,934124
0,912483	0,887923	0,948916	0,934124	1.0

Figura9.2.26. – Matriz de correlación Daño en el rodamiento a 380 V Var (55-59)

Tras obtener las correlaciones entre las variables más importantes se realiza el análisis multivariante como se muestra en la siguiente figura:

Model Description

In order to predict **Var1**, the following variables are used: **Var3, Var25, Var28, Var34, Var50**

Analysis of Variance Information for Model

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F Value
Regression	8.807,59500825	5	1.761,51900165	20,9495
Error	840,84249175	10	84,08424917	
Total	9.648,43750000	15		

Anova Statistics

Prob > F	R ²	Adj R ²	Std Error	Durbin-Watson
0,0001	0,91285	0,86928	9,16975	2,299968

Parameter Estimates

The following table contains the estimates of the parameters for the model. For example, in the model $Y=B_0+B_1*Var1$, B_0 is the intercept and B_1 is the coefficient for $Var1$.

Parameter	Estimate	Std Estimate	t for H ₀ : Param=0	Std Err of Estimate	95% Confidence Interval		Prob > t
					Lower Limit	Upper Limit	
Intercept	69,0401		3,0124	22,91829	17,97502	120,10524	0,0131
Var3 remove	1,80363	0,65834	5,6767	0,31772	1,09570	2,51156	0,0002
Var25 remove	-17,7478	-0,13921	-0,9922	17,88649	-57,60140	22,10572	0,3445
Var28 remove	0,646338	0,01288	0,0794	8,13561	-17,48093	18,77361	0,9382
Var34 remove	-31,9514	-0,08703	-0,7317	43,67026	-129,25474	65,35202	0,4812
Var50 remove	-2634,12	-0,44059	-3,6798	715,82517	-4229,08019	-1039,16547	0,0042

Model Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Var1} = & 69,040129839946970900 + 1,803631051559373870 * \text{Var3} - 17,747836649313256900 * \\
 & \text{Var25} + 0,646337633773340414 * \text{Var28} - 31,951357202906578400 * \text{Var34} - \\
 & 2634,122827142635290000 * \text{Var50}
 \end{aligned}$$

Residual Statistics

Statistic	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Residual	-11,304392	16,790148	0,000000	7,48706659
Std Residual	-1,232792	1,831037	0,000000	0,81649658
Stu Residual	-1,450314	2,025169	-0,068755	1,00626568
Cook's Dist	0,000009	0,485525	0,105227	0,14904998

Search Procedure

No Search Procedure Selected.

Figura 9.2.27. – Análisis multivariante de Daños en el rodamiento a 380 V.

Las variables significativas en este caso son la Var3 (Vibraciones mm/s²), Var25 (THD V B-C), Var28 (THD A B-C), Var34 (Armónicos V3 B-C), y Var50 (Armónicos V8 C-A), que sirven para generar la siguiente ecuación, con un $R^2 = 0,91285$:

$$\begin{aligned}
 Var1 = & 69,040129839947 + 1,803631051559373870 * Var3 - 17,747836649313256900 \\
 & * Var25 + 0,646337633773340414 * Var28 - 31,951357202906578400 * Var34 \\
 & - 2634,122827142635290000 * Var50
 \end{aligned}$$

A partir de ella podemos realizar una comparativa entre los datos reales de desequilibrio del rotor y los valores calculados mediante la ecuación resultante del análisis:

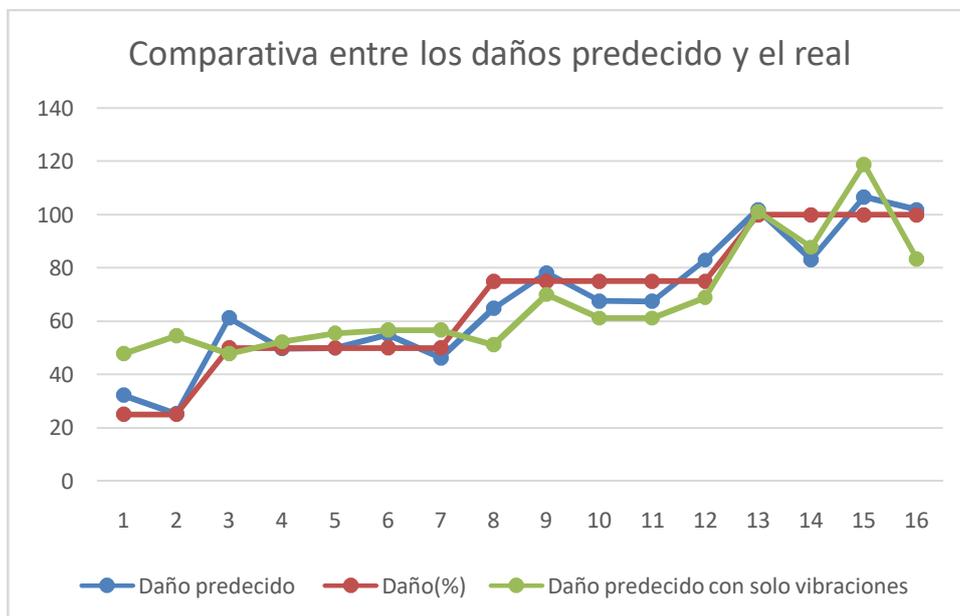


Figura9.2.28. – Comparativa entre daño y daño predicho.

En este último caso se han comparado los datos experimentales con dos curvas diferentes, una calculada teniendo en cuenta todos los valores significativos y otra únicamente con las vibraciones. Se puede observar como al aumentar el daño en el rodamiento las vibraciones suponen un factor muy acertado a la hora de tratar de conocer el estado del equipo.

9.3. Líneas futuras de trabajo

Para finalizar, se puede sugerir que la continuación de este trabajo podría realizarse estudiando otros fallos relativamente comunes como la rotura de barras de la jaula de ardilla o la sobrecarga de rodamientos sometiéndolos a distintos esfuerzos.

Además, sería recomendable realizar este tipo de experimentos con un mayor número de motores de prueba. Así mismo, sería interesante contar con equipo experimental de mayor actualidad, como un analizador FAG SmartCheck, del que hemos hablado en capítulos anteriores.

CONCLUSIONES

Conclusiones

A continuación, se exponen las conclusiones obtenidas de los diferentes experimentos mostrados en los capítulos anteriores.

- La derivación entre solo una fase y tierra no mostró cambios apreciables en ninguna de las variables monitorizadas respecto a la condición normal de funcionamiento sin derivación a tierra. Esto coincide con lo esperado, ya que no circula corriente en esta disposición.

- La prueba consistente en la derivación entre dos fases del bobinado, para mostrar un posible deterioro del aislamiento de este, da unos resultados más significativos que los de la derivación entre solo una fase y tierra. En el análisis de las variaciones producidas en los diferentes parámetros, no son de gran consideración. Sin embargo, el análisis estadístico y multivariante, permite diferenciar claramente entre los diferentes estados de este fallo, con una $R^2 = 0,99780$.

- El caso estudiado del desequilibrio del rotor añadiendo diferentes masas, tampoco muestra ningún efecto en las variables analizadas, siendo el único resultado notable el aumento de la intensidad de corriente al aumentar la masa añadida al ventilador. Al igual que en el caso anterior, tras realizar el análisis estadístico y multivariante se obtiene una ecuación que permite conocer el estado de desequilibrio del rotor de una forma precisa con una $R^2 = 0,97397$.

- La última condición estudiada, consistente en el estudio de las variables como consecuencia de un rodamiento en mal estado, tampoco muestra variaciones significativas a simple vista. Únicamente se pudo observar un leve aumento de las vibraciones y de la temperatura alcanzada por el motor. Por el contrario, el análisis estadístico y multivariante de las variables, permite obtener una ecuación que caracteriza a esta anomalía con una $R^2 = 0,90051$.

Por lo que se puede concluir, que con el método desarrollado en este trabajo, se ha podido deducir una serie de ecuaciones que predicen tres de los fallos más comunes en los motores eléctricos: la derivación entre fases debido a fallos de aislamiento, el desequilibrio del rotor por variación de su masa y daños en el rodamiento debido a contaminación con arena. Este método de mantenimiento predictivo, puede ser utilizado para monitorizar y detectar la evolución de fallos incipientes y de esta forma anticiparse a los efectos producidos por las averías. Con ello se pretende reducir costes de mantenimiento, pérdidas económicas debidas a paradas imprevistas de las instalaciones y sobre todo tratar de evitar fallos catastróficos que puedan acabar con vidas humanas a bordo.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1] Tavner, P.J. (2007). *Review of condition monitoring of rotating electrical machines*. School of Engineering, Durham University.
- [2] Kim, H. (2018). *Experience with Stator Insulation Testing and Turn/Phase Insulation Failures in the Power Generation Industry*. IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED)
- [3] Stief, A. (2017). *Two Stage Data Fusion of Acoustic, Electric and Vibration Signals for Diagnosing Faults in Induction Motors*. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA
- [4] Bayram, D (2017). *Redundancy-Based Predictive Fault Detection on Electric Motors by Stationary Wavelet Transform*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS
- [5] Gardel Sotomayor, P. (2013). *Aportaciones al mantenimiento predictivo de motores de inducción mediante una metodología de diagnóstico basada en el uso combinado de técnicas estadísticas y redes neuronales artificiales*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales.
- [6] Javier Gil, C. (2010). *Aproximación al mantenimiento eléctrico predictivo de un motor impulsor de una bomba centrífuga utilizando inteligencia artificial*
- [7] *FAG SmartCheck. Monitorización para todo tipo de máquinas*. Schaeffler Technologies.
- [8] *Resumen de productos Isometer, www.bender.de*

[9] *Isometer 685. Vigilante de aislamiento para sistemas IT de tensión alterna con rectificadores o convertidores conectados galvánicamente y para sistemas IT de tensión continua, www.bender.de*

[10] Belén Muñoz, M (2010). *Mantenimiento Industrial*. Universidad Carlos III de Madrid, Área de Ingeniería Mecánica.

[11] *Detección y filtrado de armónicos, Schneider Electric.*

[12] Fernández, C. M., García, M. M., Alonso, O G., Cano, R. J.M., Solares, S. J., (2000). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*, ABB Service S.A.-MarcomboBoixareu Editores, España.

[13] García Santamaría, C. (2017). *Análisis espectral de señales para la detección de fallos en motores de inducción*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid.

[14] Duque Pérez, Ó. y Pérez Alonso, M. (2005). *Motores de inducción: técnicas de mantenimiento predictivo*. Editorial @becedario.

[15] Radu, C. (2010). *The most common causes of bearing failure and the importance of bearing lubrication*. RKB TechnicalReview.

[16] de la Rosa López, R. (2015). *Estudio sobre la viabilidad de los estadísticos de orden superior de la corriente de alimentación como indicadores para determinar el estado de un motor de inducción*. Trabajo fin de Grado, Universidad de Valladolid.

[17] *Fluke 1735 Three-PhasePowerLogger, Datos Técnicos.*

[18] *Curso de vibraciones, www.sinais.es*

1957-19.05.2011



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO