

Enginyeria Mecànica

Anàlisi freqüencial d'un sistema electromecànic com a mitjà de detecció d'anomalies mecàniques.

Memòria final

JOSEP CASALS LLINÀS

PONENT: CARLES PAUL RECARENS

PRIMAVERA 2023

Resum

El projecte plantejat es basa en estudiar el comportament d'un sistema electromecànic des del punt de vista freqüencial a partir de dades elèctriques. L'anàlisi es realitzarà amb instrumentació IoT i les diferents tecnologies associades a la Indústria 4.0., amb el propòsit de detectar anomalies de caire mecànic.

La investigació experimental es centra en estudiar l'electricitat en el domini de la freqüència i correlacionar l'espectre harmònic de les ones de tensió i intensitat amb les conseqüència mecàniques reals que es manifesten en el sistema mecànic a estudiar.

Resumen

El proyecto planteado se basa en estudiar el comportamiento de un sistema electromecánico desde el punto de vista frecuencial a partir de datos eléctricos. El análisis se realizará con instrumentación IoT y las diferentes tecnologías asociadas a la Industria 4.0., con el propósito de detectar anomalías de cariz mecánico.

La investigación experimental se centra en estudiar la electricidad en el dominio de la frecuencia y correlacionar el espectro armónico de las ondas de tensión e intensidad con las consecuencias mecánicas reales que se manifiestan en el sistema mecánico a estudiar.

Abstract

The proposed project is based on studying the behavior of an electromechanical system from a frequency point of view based on electrical data. The analysis will be carried out with IoT instrumentation and the different technologies associated with Industry 4.0., with the aim of detecting mechanical anomalies.

The experimental research focuses on studying electricity in the frequency domain and correlating the harmonic spectrum of voltage and intensity waves with the real mechanical consequences that manifest themselves in the mechanical system to be studied.

Índex de continguts

1.	Objecte del projecte.....	1
2.	Antecedents i necessitats d'informació	2
2.1.	Manteniment predictiu	2
2.2.	Tecnologies 4.0. per al manteniment predictiu	5
2.3.	Qualitat de subministrament elèctric	6
2.4.	La tecnologia escollida	9
2.5.	Màquines rotatives	10
2.6.	MATLAB: <i>Predictive Maintenance Toolbox</i>	11
2.7.	Harmònics elèctrics.....	15
2.8.	Problemes mecànics en un motor elèctric.....	21
2.8.1.	Desequilibris.....	22
2.8.2.	Desalineaments.....	22
2.8.3.	Excentricitats	23
3.	Abast del projecte.....	26
4.	Objectius i especificacions tècniques	27
4.1.	El motor elèctric.....	27
4.2.	Equips d'anàlisi.....	28
4.3.	El software informàtic	29
4.3.1.	Servidor web per a l'adquisició de dades	29
4.3.2.	Tractament de dades	33
5.	Disseny i implementació	38
5.1.	Disseny de la instrumentació de mesura	38
5.2.	Disseny del sistema d'adquisició de dades	39
5.2.1.	Paràmetres elèctrics	39

5.2.2.	Freqüència de mostreig.....	39
5.3.	Disseny dels escenaris experimentals	39
5.3.1.	Motor en vibració accentuada.....	40
5.3.2.	Tall de subministrament elèctric.....	40
5.3.3.	Re-alimentació d'energia.....	40
5.3.4.	Infra-tensió d'alimentació.....	40
5.3.5.	Sobrecàrrega de l'eix del rotor	40
6.	Anàlisi de viabilitat	41
6.1.	Viabilitat tècnica	41
6.2.	Viabilitat mediambiental.....	41
6.3.	Viabilitat econòmica	42
7.	Planificació del projecte	44
8.	Experimentació.....	45
8.1.	Estat inicial del motor	45
9.	Tractament de dades.....	47
9.1.	Valors RMS	47
9.2.	Esdeveniments d'oscil·loscopi	47
9.2.1.	Comportament normal.....	48
9.2.2.	Vibració	53
9.2.3.	Tall d'alimentació.....	56
9.2.4.	Re-alimentació d'energia.....	64
9.2.5.	Infra-tensió d'alimentació.....	67
9.2.6.	Sobre-càrrega.....	76
10.	Resultats i conclusions	79
11.	Bibliografia.....	80

Índex de figures

Fig. 1. Evolució del manteniment.....	3
Fig. 2. Tensió elèctrica: Característiques.....	8
Fig. 3. Algoritmes de manteniment predictiu.....	12
Fig. 4. Diagrama de Blocs; Machine Learning.....	12
Fig. 5. Esquema: Models de manteniment predictiu.....	14
Fig. 6. Gràfica del valor eficaç, RMS.....	15
Fig. 7. Ones de tensió i intensitat amb càrregues lineals.....	17
Fig. 8. Ones de tensió i intensitat amb càrregues no lineals.....	17
Fig. 9. Transformada de Fourier FFT.....	19
Fig. 10. Forma d'ona en el domini del temps.....	19
Fig. 11. Espectre d'harmònics en el domini de la freqüència.....	20
Fig. 12. Ona i espectre harmònic.....	20
Fig. 13. Ona i espectre harmònic.....	21
Fig. 14. Esquema cas desalineament.....	22
Fig. 15. Excentricitat estàtica.....	23
Fig. 16. Excentricitat estàtica. Evolució trajectòria.....	23
Fig. 17. Excentricitat dinàmica.....	24
Fig. 18. Excentricitat dinàmica. Evolució trajectòria.....	25
Fig. 19. Excentricitat axial.....	25
Fig. 20. Analitzadors elèctrics.....	28
Fig. 21. Captura: Tensió RMS.....	29
Fig. 22. Captura: Oscil·loscopi.....	30
Fig. 23. Captura: Esdeveniment d'ona 1.....	30
Fig. 24. Captura: Esdeveniment d'ona 2.....	31
Fig. 25. Captura: Esdeveniment d'ona 3.....	31
Fig. 26. Captura: Historial de tensió 1.....	32
Fig. 27. Captura: Historial de tensió 2.....	32
Fig. 28. Tractament de dades.....	33
Fig. 29. Indicadors de condició.....	33
Fig. 30. Model predictiu.....	34

Fig. 31. Implementació i integració.....	34
Fig. 32. Mòdul: Anàlisi de dades.....	35
Fig. 33. Mòdul: Temps real 1.	36
Fig. 34. Mòdul: Temps real 2.	36
Fig. 35. Mòdul: Oscil·loscopi 1.....	37
Fig. 36. Mòdul: Oscil·loscopi 2.....	37
Fig. 37. Esquema elèctric de l'analitzador.	38
Fig. 38. Imatge de l'interior del motor (1)	45
Fig. 39. Imatge de l'interior del motor (2).	46
Fig. 40. Imatge de components del motor deteriorats.	46
Fig. 41. Ona de tensió: Comportament normal.	48
Fig. 42. Espectre harmònic de tensió: Comportament norma (1).....	49
Fig. 43. Espectre harmònic de tensió: Comportament normal (2).....	49
Fig. 44. Ona d'intensitat: Comportament normal.	50
Fig. 45. Espectre harmònic d'intensitat: Comportament normal (1).	50
Fig. 46. Espectre harmònic d'intensitat: Comportament normal (2).	51
Fig. 47. Ona d'intensitat diferencial: Comportament normal.....	52
Fig. 48. Espectre harmònic d'intensitat diferencial. Comportament normal.	52
Fig. 49. Ona de tensió: Vibració.....	53
Fig. 50. Espectre harmònic de tensió: Vibració.....	54
Fig. 51. Ona d'intensitat: Vibració.....	54
Fig. 52. Espectre harmònic d'intensitat: Vibració.....	55
Fig. 53. Ona de tensió: Tall d'alimentació I.....	56
Fig. 54. Ona de tensió: Tall d'alimentació III.	56
Fig. 55. Ona de tensió: Tall d'alimentació I.....	57
Fig. 56. Espectre harmònic: Tall d'alimentació I.....	58
Fig. 57. Ona d'intensitat: Tall d'alimentació I.....	58
Fig. 58. Espectre harmònic d'intensitat: Tall d'alimentació I.	59
Fig. 59. Ona de tensió: Tall d'alimentació II.	60
Fig. 60. Espectre harmònic: Tall d'alimentació II.	61
Fig. 61. Ona de tensió: Tall d'alimentació III.	62
Fig. 62. Espectre harmònic: Tall d'alimentació III.	63

Fig. 63. Ona de tensió: Re-alimentació d'energia.....	64
Fig. 64. Espectre harmònic de tensió: Re-alimentació d'energia.....	65
Fig. 65. Ona d'intensitat. Re-alimentació d'energia.....	65
Fig. 66. Espectre harmònic d'intensitat: Re-alimentació d'energia.....	66
Fig. 67. Ona de tensió: Infra-tensió I.....	67
Fig. 68. Ona de tensió: Infra-tensió III.	67
Fig. 69. Ona de tensió: Infra-tensió I.....	68
Fig. 70. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió I.....	69
Fig. 71. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió I.	69
Fig. 72. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió I.	70
Fig. 73. Ona de tensió: Infra-tensió II.	71
Fig. 74. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió II.	72
Fig. 75. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió II.	73
Fig. 76. Ona de tensió: Infra-tensió III.	74
Fig. 77. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió III.....	75
Fig. 78. Ona de tensió: Sobre-càrrega.	76
Fig. 79. Espectre harmònic de tensió: Sobre-càrrega.	77
Fig. 80. Ona d'intensitat: Sobre-càrrega.	77
Fig. 81. Espectre harmònic d'intensitat: Sobre-càrrega.	78

Índex de taules

Taula 1. Valors: Comportament normal	48
Taula 2. Valors: Vibració	53
Taula 3. Valors: Tall d'alimentació I.	57
Taula 4. Valors: Tall d'alimentació II.	60
Taula 5. Valors: Tall d'alimentació III.	62
Taula 6. Valors: Re-alimentació d'energia.	64
Taula 7. Valors: Infra-tensió I.	68
Taula 8. Valors: Infra-tensió II.	71
Taula 9. Valors: Infra-tensió III.....	74
Taula 10. Valors: Sobre-càrrega.....	76

1. Objecte del projecte

El projecte plantejat es basa en estudiar el comportament d'un sistema electromecànic des del punt de vista freqüencial a partir de dades elèctriques. L'anàlisi es realitzarà amb instrumentació IoT i les diferents tecnologies associades a la Indústria 4.0., amb el propòsit de detectar anomalies de caire mecànic.

La investigació experimental es centra en estudiar l'electricitat en el domini de la freqüència i correlacionar l'espectre harmònic de les ones de tensió i intensitat amb les conseqüència mecàniques reals que es manifesten en el sistema mecànic a estudiar, tot distingint els identificadors rellevants causants de mal funcionaments. La part pràctica es porta a terme al laboratori; es presenten diferents escenaris per obtenir uns resultats significatius i acabar comparant-los i demostrar l'eficiència d'aquesta tècnica d'anàlisi.

El global del projecte es tracta des d'una perspectiva sostenibilista, enfocada principalment als aspectes mediambientals i econòmics de les conseqüències reals d'un manteniment descontrolat, amb pèrdues econòmiques i de recursos, envers un manteniment conscient i eficient.

2. Antecedents i necessitats d'informació

A continuació, s'estudien els antecedents i les necessitats d'informació relacionades amb el manteniment predictiu i la seva aplicació al sector industrial i en especial a les màquines rotatives, per tal de contextualitzar els fonaments de la investigació.

2.1. Manteniment predictiu

Les tècniques de manteniment predictiu estan dissenyades per ajudar a determinar l'estat dels equips en servei per tal d'estimar quan s'ha de realitzar el manteniment. Aquest enfocament promet un estalvi de costos respecte al manteniment preventiu rutinari o basat en el temps, perquè les tasques només es realitzen quan es garanteixen. Per tant, es considera un manteniment basat en la condició realitzat tal com suggereixen les estimacions de l'estat de degradació d'un element.[3]

La principal promesa del manteniment predictiu és permetre una còmoda programació del manteniment correctiu i evitar fallades inesperades dels equips. Amb la informació adequada es pot augmentar la vida útil de l'equip, una major seguretat de la planta, menys accidents amb impacte negatiu en el medi ambient i una manipulació optimitzada dels recanvis pertinents.

El manteniment predictiu difereix del manteniment preventiu perquè es basa en l'estat real de l'equip, més que en les estadístiques de vida mitjana o esperada, per predir quan serà necessari el manteniment. S'acostumen a adoptar els enfocaments d'aprenentatge automàtic per a la definició de l'estat real del sistema i per a la previsió dels seus estats futurs.

Probablement, una de les tasques més antigues associades a processos industrials és el manteniment de la maquinària que es fa servir. Sens dubte, cal invertir en recursos i mecanismes amb la finalitat d'assegurar que els actius industrials produeixin de manera contínua i predictable. Amb això, també es pretén estendre la vida útil tant com sigui possible.

Tradicionalment, el manteniment ha tingut com a única eina la resposta reactiva a les fallades de la maquinària. És a dir, reparar allò que es fa malbé amb la major celeritat possible. En un bon pla de manteniment tradicional cal incloure tant la identificació de les peces crítiques de la maquinària com assegurar un estoc de recanvis.

El manteniment tradicional va evolucionar fins a convertir-se en el conegut manteniment preventiu.

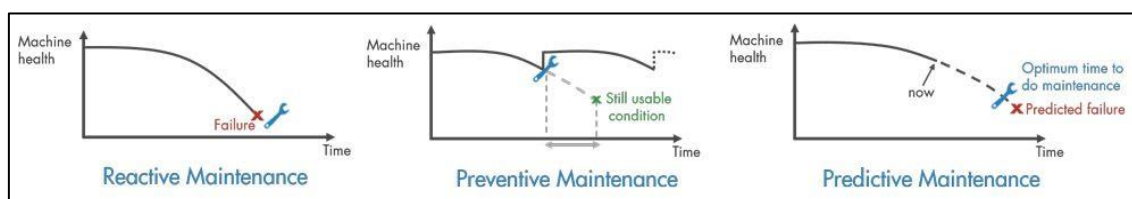


Fig. 1. Evolució del manteniment.

El coneixement de la maquinària al llarg dels anys i els històrics de comportament que tant empreses com a fabricants han pogut documentar, permeten elaborar estimats de vida útil de certes màquines i planificar accions de manteniment amb l'objectiu de reemplaçar peces o mecanismes que, segons l'estadística, fallaran a curt termini. Com que el cost de reemplaçar una peça en concret sol ser més econòmic que reparar una maquinària completa, aquest aspecte del manteniment és rendible.

El manteniment preventiu té un desafiament clar, que és considerar les diferents variables que influeixen en el desgast d'una peça o mecanisme i sovint s'inverteix en manteniment preventiu sense realment esgotar tota la vida útil de la maquinària, ja sigui a causa de la particularitat del procés productiu o del volum de producció. Per tant, la conseqüència és que s'està assumint un cost que es podria evitar.

Gràcies a l'impacte de la indústria 4.0, el manteniment ha evolucionat fins a donar pas al manteniment predictiu. És una modalitat del manteniment industrial que permet conèixer el funcionament de màquines i equips mitjançant mesuraments no destructors per tal d'avançar-se a possibles errors i optimitzar-ne el rendiment.

El manteniment predictiu fa servir tot el potencial de les noves tecnologies de la indústria 4.0. per aportar informació rellevant sobre el rendiment de la maquinària.

Aquest tipus de manteniment és altament recomanable ja que proposa accions de manteniment que en garanteixen el funcionament i la vida útil. Un sistema de manteniment predictiu té com a màxim objectiu la prescripció d'accions concretes i precises de manteniment.

Un exemple d'aquest cas seria que mitjançant l'anàlisi del comportament d'un motor, es detecta una anomalia en un component. Aquesta anomalia provocarà una fallada real en un futur. Es procedeix a la revisió i la substitució d'aquest component en concret.

Alguns dels components principals que són necessaris per implementar el aquest tipus de manteniment són la recollida de dades i el seu pre-processament, la detecció precoç d'errors, la detecció d'errors, la predicció del temps fins a la fallada, la programació de manteniment i l'optimització de recursos. També s'ha considerat que el manteniment predictiu és un dels motors per millorar la productivitat i una de les maneres d'aconseguir el "*Just In Time*" en el sector industrial.

En aquest projecte, s'ha apostat pel manteniment predictiu a partir de l'anàlisi elèctric, ja que monitoritzar l'electricitat de forma contínua i considerant els paràmetres correctes, amb la precisió que cada projecte requereix, permet evitar sobre-consums i reduir costos d'operació, manteniment i reparacions.

Alguns sobre-consums es produeixen quan un aparell elèctric o el cable que l'alimenta excedeix els límits d'operació per al que el van fabricar. Aquestes anomalies només es poden saber si hi ha un control de la situació; Detectant les fallades de les màquines abans que succeeixin, es poden prendre les accions necessàries i programar-les per al moment que menys afecti els seus cicles productius. D'aquesta manera, es pot assegurar allargar la vida i disponibilitat de la maquinària.

2.2. Tecnologies 4.0. per al manteniment predictiu

A continuació, se citen les diferents tecnologies que permeten fer realitat el manteniment predictiu com a solució industrial:

- Internet Of Things (IoT)

Xarxa d'objectes físics; des de vehicles, electrodomèstics i “wearables” fins a màquines industrials, que tenen components electrònics integrats, programari, sensors i connectivitat de xarxa que permet recopilar i intercanviar dades a través d'Internet.

Un estudi calcula que el cost dels sensors ha disminuït un 60% i el cost de processar dades ha disminuït 60 vegades. L'IoT està intrínsecament relacionat amb el Big Data ja que permet transformar les dades en informació.

- Big Data (dades massives)

És la gestió i anàlisi de dades les quantitats de les quals resultarien impossibles de processar amb les eines i recursos humans convencionals.

El Big Data aconsegueix proporcionar informació de valor sobre el comportament de diferents processos i serveis, que pot ser utilitzada per prevenir problemes, entre d'altres finalitats.

- Intel·ligència Artificial

És el terme general per definir un conjunt de sistemes informàtics que poden sentir, pensar aprendre i prendre accions en resposta a allò que estan sentint i als seus objectius. Això s'aconsegueix mitjançant l'ús d'eines com els algoritmes bio-inspirats, el raonament probabilístic i les xarxes neuronals artificials.

El valor de la intel·ligència artificial es troba en la capacitat d'aquesta tecnologia per augmentar la productivitat, la força laboral i la demanda personalitzada.

- **Machine Learning**

És la branca de la intel·ligència artificial que fa referència a la capacitat d'una màquina equipada amb intel·ligència artificial d'administrar i, sobretot, d'aprendre automàticament.

En base a la identificació i l'extracció de patrons complexos d'entre milions de dades, un algorisme és capaç d'extreure informació i obtenir prediccions d'alt valor sobre comportaments futurs per a una presa de decisions millor. Això implica que, automàticament, els sistemes es milloren de manera autònoma amb el temps, sense intervenció humana.

2.3. Qualitat de subministrament elèctric [3]

No hi ha dubte que des de la revolució de la microelectrònica i el seu gran avenç en aplicacions per a la indústria als anys 80, hi ha hagut una major preocupació sobre la qualitat de l'energia elèctrica lliurada a les fàbriques, indústries, establiments comercials i habitatges.

El terme de qualitat energia elèctrica en aquest context fa referència a una gran varietat de fenòmens electromagnètics que caracteritzen la tensió i la intensitat de corrent que es donen en un determinat temps i lloc en un sistema elèctric. I la raó per la qual cal conèixer les característiques relacionades amb la qualitat del subministrament elèctric són diverses, però les principals són les següents:

- Actualment, les càrregues dels sistemes elèctrics són cada cop més sensibles a les variacions del subministrament elèctric. A les indústries, comerços i habitatges són cada vegada més els sistemes elèctrics controlats per microprocessadors, en aplicacions robòtiques, domòtica, ordinadors personals, etc. Fins i tot l'electrònica de potència utilitza microcontroladors per a motors elèctrics, que han anat substituint els controls electromagnètics menys sensibles a les alteracions del subministrament elèctric.

- La necessitat de les empreses de produir en menor temps, ha comportat l'aplicació d'una major eficiència en els sistemes elèctrics. Aquesta situació ha donat com a resultat un increment continu en l'aplicació de dispositius més eficients com són els controladors de velocitat als motors elèctrics, la utilització de banc de condensadors en paral·lel per a la correcció del factor de potència i reduir pèrdues. No obstant això, la conseqüència d'aplicar aquests recursos comporta un increment en la quantitat d'harmònics presents a la línia elèctrica, generant nous problemes.
- D'altra banda, aquesta mateixa preocupació en una major eficiència en la producció és sensible a les interrupcions del servei elèctric, els transitoris produïts per maniobres a la xarxa, les sobretensions, etc.
- La creixent aplicació de la Intel·ligència Artificial (IA) obliga a la interconnexió dels sistemes elèctrics i per tant a un augment en la quantitat de processos integrats, la qual cosa significa que un error o una fallada en qualsevol component d'un sistema comporta conseqüències a tots els sistemes connectats.

En definitiva, la necessitat de l'increment de la productivitat en menys temps requereix una major qualitat del subministrament de l'energia elèctrica. És per això que ja el 1995 l'Institut d'Enginyeria Elèctrica i Electrònica (IEEE) fes les seves recomanacions en un "paper" titulat "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality".

Convé destacar la dependència tecnològica en què ha arribat la societat actual i aquesta depèn en exclusiva de la disponibilitat d'un subministrament elèctric continu. Aquest es troba associat a una àmplia i complexa xarxa de distribució i justament aquesta complexitat de la xarxa la fa més vulnerable a fallades a causa de condicions climàtiques adverses, a fallades dels equips elèctrics connectats a la xarxa hi ha defectes en els contactes metàl·lics a les connexions.

Per establir una definició estàndard, la qualitat elèctrica es caracteritza per mantenir i corregir les distorsions i variacions de tensió subministrats al consumidor i proposar les solucions adequades per corregir els defectes que succeeixen en quant a la companyia subministradora.

Les distorsions i les variacions que poden succeir en una xarxa elèctrica depenen d'una gran varietat de fenòmens electromagnètics que caracteritzen la tensió i la intensitat en un temps i en un lloc determinat.

El monitoratge constant de l'anàlisi elèctric ofereix una atenció contínua a les condicions de qualitat elèctrica i així determinar i avaluar amb rapidesa la distorsió en la qualitat elèctrica, actuant amb rapidesa i precisió per evitar danys als actius de la instal·lació elèctrica.

Amb l'objectiu de mantenir un criteri únic s'estableix la normativa Europea UNE-EN-50160. Consisteix a definir, descriure i especificar les característiques de la tensió d'alimentació subministrada, com ara:

- Freqüència.
- Amplitud.
- Forma d'ona.
- Simetria de les tensions de línia.

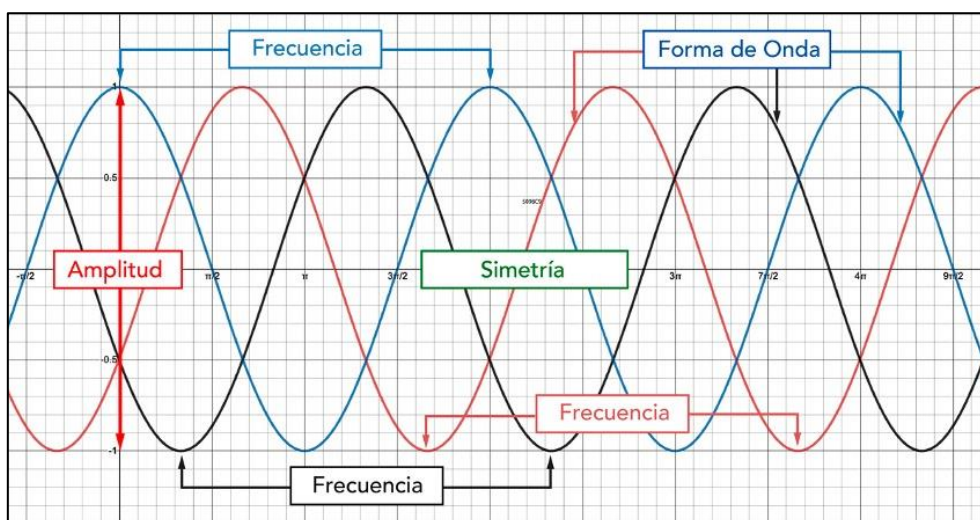


Fig. 2. Tensió elèctrica: Característiques.

Aquestes característiques de la funció d'ona de la tensió o intensitat estan subjectes a variacions durant l'explotació normal d'un sistema d'alimentació elèctrica, per modificacions de la càrrega, perturbacions emeses per certs equips i per l'aparició de falles degudes principalment a causes externes.

Les distorsions més comunes acceptades que afecten la qualitat elèctrica es poden resumir en les següents:

- Fluctuacions de Voltatge
- Transitoris
- Interrupcions d'Energia
- Soroll Elèctric
- Harmònics
- Variacions de freqüència

2.4. La tecnologia escollida

La tecnologia escollida és la següent:

- **Monitorització elèctrica en temps real a través de IoT**

Utilització de sensors de molt alta resolució capaços de recollir centenars de paràmetres elèctrics de manera automàtica, connectats al núvol.

- **Machine Learning per a la generació de models de funcionament**

Les dades, recollides de manera contínua, s'utilitzen per generar, models de funcionament òptim a partir de la comparació del funcionament de si mateix en el temps.

- **Anàlisi elèctrica avançada i comunicacions machine to machine (M2M)**

El propi analitzador fa l'anàlisi d'ona elèctrica i distorsions d'alta freqüència i emmagatzema informació instantània.

- **Intel·ligència artificial per a la comparació de funcionament**

Les dades s'emmagatzemen i es comparen contínuament els models de funcionament d'un equip al llarg del temps.

- **Detecció de fallades a través d'intel·ligència artificial**

Els algorismes permeten detectar desviacions o tendències negatives en el comportament òptim de la maquinària en estats molt prematurs, i fins i tot poden identificar la causa d'aquesta tendència.

2.5. Màquines rotatives

Són màquines elèctriques que transformen un corrent elèctric en un treball mecànic rotatiu. Són gran part de les màquines elèctriques que es poden trobar en qualsevol procés industrial. A les indústries que manegen fluids o gasos es troben principalment com a bombes o compressors, mentre que en indústries pesades o de mineria són el cor dels sistemes de transport de matèries.

Els problemes principals que es poden trobar a les màquines rotatives poden ser:

- **Sobreescalfament del motor**

Pot ser degut al seu treball en sobrecàrrega, treballant molt de temps per sobre de les característiques de disseny, o també pot ser per desbalanceig entre les fases o treballant una tensió menor a la tensió d'excitació corresponent, llavors es pot produir que el motor rellisqui augmentant-ne la temperatura, però també disminuint-ne el rendiment de treball i generant vibracions que podrien destruir la màquina si es prolonguen en el temps.

- **Curtcircuits**

Es poden ocasionar quan els components d'aïllament intern del motores deterioren, davant d'una mala connexió en bornes o en rebre un corrent molt superior al nominal, que sobrepassi la capacitat d'aïllament dels components interns del motor.

- **Fuites constants de corrent a terra**

Les fuites constants a terra poden causar un efecte d'electroerosió al ferro del motor arribant a deformar-lo i distorsionant el camp electromagnètic de disseny, afectant al funcionament del motor. El deteriorament al ferro del motor és irreparable i comporta la deixalla de l'equip i la corresponent substitució.

Conèixer l'estat de la màquina rotativa és clau per a un manteniment eficaç i per a mantenir el rendiment de l'actiu, ja que el fet de poder detectar amb antelació el deteriorament dels actius i programar de manera intel·ligent el manteniment permet realitzar les actuacions en el moment oportú.

Disposar de l'estat de la màquina de manera contínua i d'alertes que indiquin la necessitat de manteniment permet evitar les parades no desitjades, estalviant milers d'euros en pèrdues per producció, manteniments no necessaris o destrucció d'actius. Conèixer en temps real l'estat per diferenciar dins d'una instal·lació els actius que pateixin un desgast més gran en funció de la càrrega, així com la qualitat de tensió que estan subministrant a la sortida.

2.6. MATLAB: *Predictive Maintenance Toolbox*

L'eina de MATLAB *Predictive Maintenance Toolbox* permet gestionar dades de sensors, dissenyar indicadors de condició i estimar la vida útil restant d'una màquina.

Aquesta *toolbox* proporciona funcions i una *app* interactiva per explorar, extreure i classificar característiques mitjançant tècniques basades en dades i en models, incloses anàlisis estadístiques, espectrals i de sèries temporals. També permet organitzar i analitzar les dades de sensors importades des de fitxers locals, emmagatzematge al núvol i sistemes de fitxers distribuïts.

L'eina de manteniment predictiu proporciona capacitats i exemples de referència per dissenyar i provar algorismes de control de condicions i manteniment predictiu per a coixinets de boles, bombes, bateries i altres màquines. També permet dissenyar funcions de diagnòstic per extreure característiques de les dades del sensor sense escriure cap codi MATLAB.

Els senyals de dades del sensor es poden filtrar processar, de manera que s'extreuen característiques del domini temporal com la mitjana i la desviació estàndard. En quant a la freqüència, es pot estimar la potència d'un senyal, ordenar els espectres i extreure característiques del domini de freqüència, com ara els valors pics espectrals.

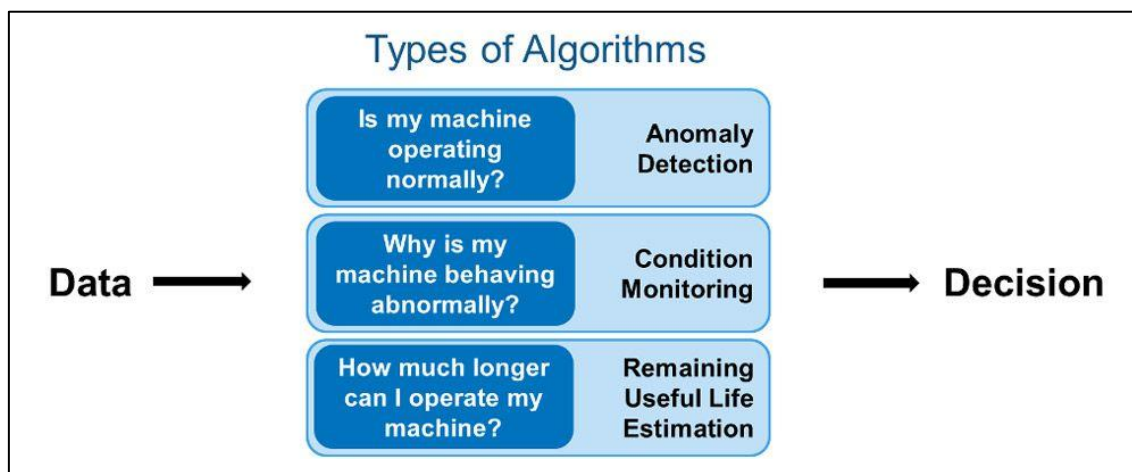


Fig. 3. Algoritmes de manteniment predictiu.

Una solució de manteniment predictiu se centra en un algorisme que analitza les dades dels sensors d'una màquina i les utilitza per detectar anomalies, diagnosticar problemes de l'equip o predir la vida útil restant de l'actiu.

Desenvolupar aquest algorisme requereix recopilar les dades apropiades, tractar-les i extreure'n les característiques, per després utilitzar-les com a entrada en un model de Machine Learning o Deep Learning, el qual fa una predicció.

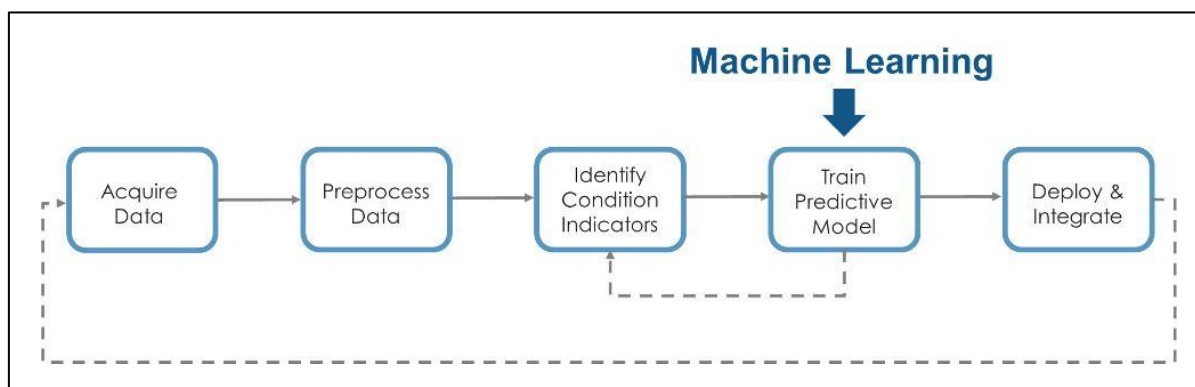


Fig. 4. Diagrama de Blocs; Machine Learning.

- **Detecció de fallades**

La recopilació de dades és el primer pas per a desenvolupar qualsevol algorisme de manteniment predictiu. Els models de Machine Learning i Deep Learning poden estar entrenats amb els diferents tipus de fallades que es volen predir, de manera que és important recopilar dades que representin l'actiu tant en estat correcte com en estat de fallida.

- **Extracció de característiques**

Un cop recopilades les dades, el pas següent és processar-les i reduir-les a un conjunt de característiques que es poden utilitzar com a “indicadors de condició”. Mitjançant una combinació de tècniques estadístiques basades en models i de processament de senyals, aquests indicadors capturen la informació corresponent relacionada amb l'estat dels actius, de manera que identificar els indicadors de condició adequats és fonamental per a l'èxit d'un algorisme de manteniment predictiu.

- **Models predictius**

Els models predictius de Machine Learning i Deep Learning distingeixen les solucions de manteniment d'un enfocament tradicional de supervisió basada en condicions. Aquests models utilitzen indicadors de condició com a entrades per detectar la causa arrel d'una anomalia o predir quan un actiu podria fallar. La supervisió basada en condicions pot proporcionar actualitzacions en temps real, però no predir l'estat futur de l'actiu.

Els mètodes d'aprenentatge no supervisat són més adequats per a aplicacions de detecció d'anomalies, on l'objectiu és classificar els valors dels indicadors de condició entrants de l'equip com a “rendiment normal” o “rendiment anormal”.

Per calcular la vida útil restant d'una màquina es poden utilitzar diferents mètodes basats en probabilitat i sèries de temps.

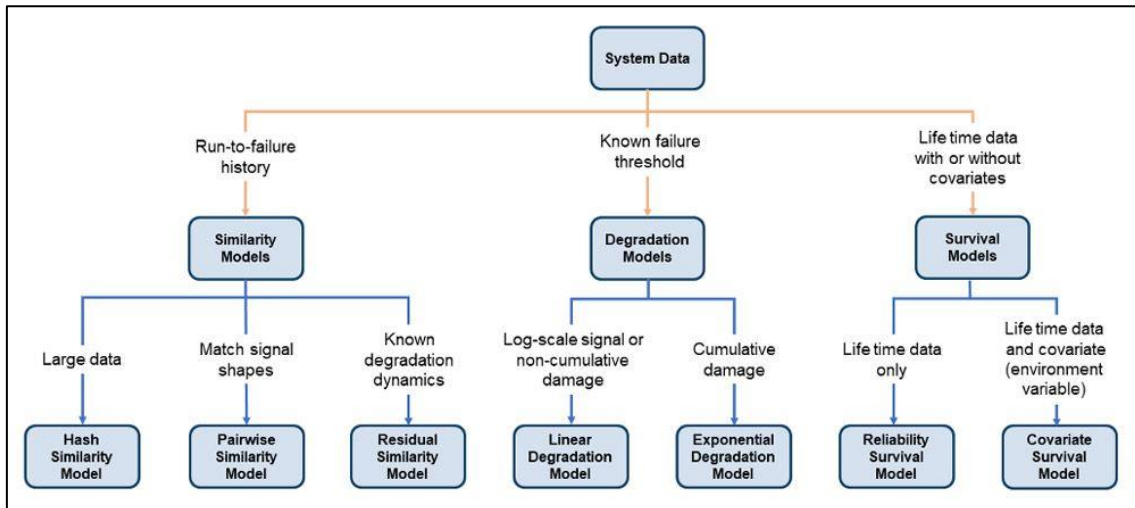


Fig. 5. Esquema: Models de manteniment predictiu.

Aquests models accepten el valor actual d'un indicador de condició i estimen quan fallarà l'equip dins d'un interval de confiança definit. De fet, aquests models de vida útil restant són una forma de bessons digitals, ja que modelen la degradació gradual d'un actiu operatiu en particular. Entrenats amb informació sobre l'interval de temps en què un actiu pot fallar, es pot planificar el manteniment en el moment adequat, fer una comanda de recanvis o limitar el funcionament de l'actiu per ampliar la seva vida útil.

- Implementació i posada en pràctica

La solució de manteniment predictiu es basa en desenvolupar els algoritmes pertinents i, posteriorment, plasmar-ho de manera pràctica, com pot ser amb un sistema d'Internet of Things (IoT), per a obtenir beneficis de reducció de temps d'inactivitat, reduir els costos de manteniment i millorar l'eficiència operativa.

2.7. Harmònics elèctrics

Els harmònics elèctrics són un tipus de perturbació elèctrics que afecta la forma i amplitud d'una ona, amb una durada de menys d'un cicle i periòdica en el temps.

Al segle XVIII, el físic i matemàtic Jean-Baptiste Joseph Fourier va concloure que una funció periòdica i continua en el temps que no sigui sinusoidal, es podrà descomposar en una suma d'una sinusoide fonamental més sinusoides múltiples a aquesta fonamental.

Alguns conceptes necessaris per a la comprensió dels harmònics elèctrics són els següents:

- Valor eficaç

El valor eficaç o RMS (*Root Mean Square*) és el valor quadràtic mig d'una magnitud elèctrica. Aquest valor de tensió o corrent alterna és l'equivalent a la dissipació de calor de tensió o corrent continua sobre una mateixa resistència.

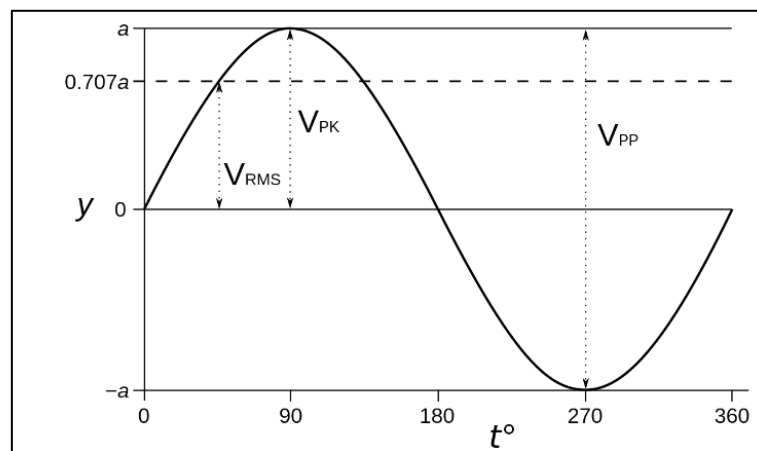


Fig. 6. Gràfica del valor eficaç, RMS.

En l'estudi dels harmònics, el valor eficaç és igual a l'arrel quadrada de la suma dels quadrats de cada component harmònica.

A continuació, s'adjunten les fórmules del valor eficaç per a la intensitat i tensió:

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_1^N I_N^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\sum_1^N U_N^2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}$$

Equació [1]

- Distorsió harmònica individual

La distorsió harmònica individual és simplement la representació en percentatge que hi ha en un harmònic respecte el valor fonamental. A continuació, s'adjunten les fórmules de la distorsió harmònica individual per a la intensitat i tensió:

$$d_N(\%) = \frac{I_N}{I_1} \times 100$$

$$d_N(\%) = \frac{U_N}{U_1} \times 100$$

Equació [2]

- Distorsió harmònica total

La distorsió harmònica total és la representació en percentatge que hi ha de component eficaç harmònica o residual harmònica respecte a la fonamental, per tant, és la relació entre la part distorsionada de la ona respecte la part pura. A continuació, s'adjunten les fórmules de la distorsió harmònica total per a la intensitat i tensió:

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^N I_N^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_N^2}}{I_1}$$

$$THD_U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^N U_N^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_N^2}}{U_1}$$

Equació [3]

- Origen dels harmònics

La gran majoria d'harmònics són generats per la pròpia instal·lació elèctrica, degut a les diferents càrregues que hi puguin haver, ja siguin lineals o no lineals.

La corrent i tensió exposades a càrregues lineals prenen una forma sinusoidal, tant si estan desfasades com si no. Aquests tipus de càrregues són les resistives, els condensadors o les inductàncies no saturades, com poden ser les reactàncies, els motors o els transformadors de potència.

A continuació, s'adjunta una imatge d'exemple del comportament d'ona de la tensió i intensitat amb càrregues lineals:

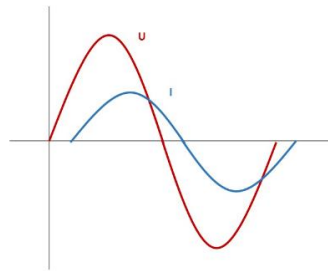


Fig. 7. Ones de tensió i intensitat amb càrregues lineals.

Per altra banda, les càrregues no lineals són les que la corrent i tensió no són sinusoidals degut a un rectificador o convertidors, com poden ser els casos dels variadors de freqüència, sistemes d'alimentació ininterrompuda, ordinadors, etc. A continuació, s'adjunta una imatge d'exemple del comportament d'ona de la tensió i intensitat amb càrregues no lineals:

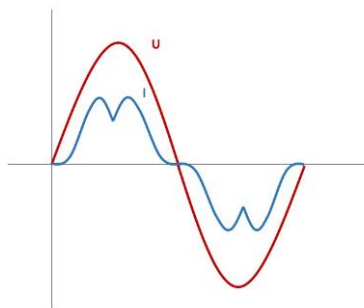


Fig. 8. Ones de tensió i intensitat amb càrregues no lineals.

- Espectre d'harmònics i forma d'ona

Un estudi de pertorbacions harmòniques es pot representar utilitzant la forma d'ona, o l'espectre harmònic. Això és possible gràcies a la transformada de Fourier (FFT) que permet passar una ona en el domini del temps al domini de la freqüència.

A continuació, s'adjunta l'equació de la transformada de Fourier:

$$X_p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t))$$

Equació 4

I mitjançant l'equació anterior, s'arriba a la següent fórmula:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

Equació 5

La representació de l'espectre harmònic és interessant per la seva poca complexitat de comprensió gràfica, ja que cada harmònic es mostra de manera individual i en percentatge respecte el valor que correspon a la freqüència fonamental.

En una representació de tres eixos, siguin aquests el temps (x), l'amplitud de l'ona (y) i la freqüència (z), la transformada de Fourier que permet passar del domini de la freqüència al domini del temps es mostraria així:

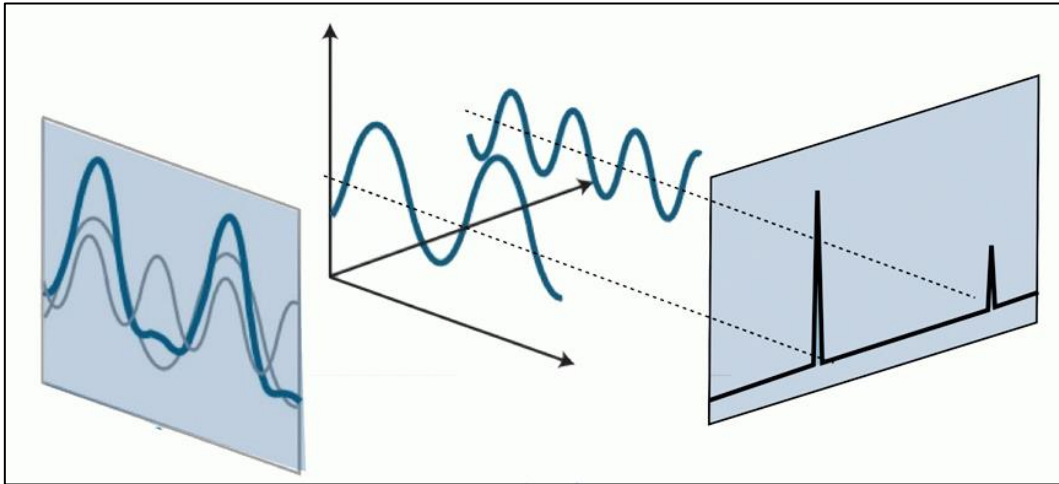


Fig. 9. Transformada de Fourier FFT.

En aquesta imatge es veu com l'amplitud es pot mostrar en funció del temps o en funció de la freqüència, ja que els harmònics són múltiples de la freqüència fonamental i per definició, qualsevol funció periòdica i continua en el temps que no sigui sinusoidal, es podrà descomposar en una suma d'una sinusoide fonamental més sinusoides múltiples a aquesta fonamental.

A continuació, s'adjunta una imatge d'una forma d'ona amb harmònics, representada en el domini del temps:

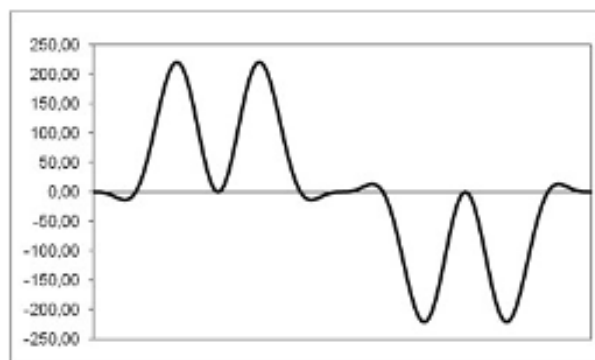


Fig. 10. Forma d'ona en el domini del temps.

A continuació, s'adjunta una imatge d'un espectre harmònics, representat en el domini de la freqüència:

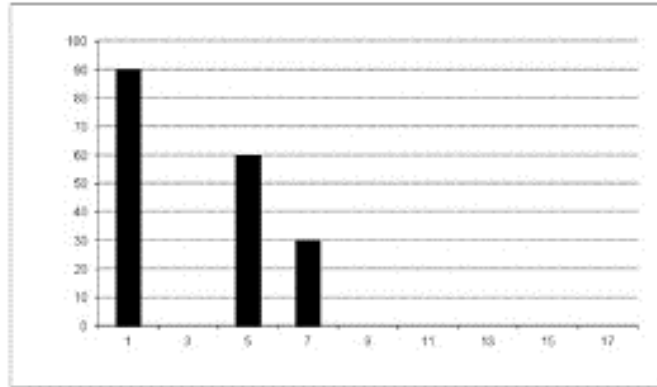


Fig. 11. Espectre d'harmònics en el domini de la freqüència.

Com a característiques rellevants dels harmònics, les càrregues monofàsiques i trifàsiques presenten una forma d'ona i harmònics significatius:

- Càrregues monofàsiques

La forma d'ona es presenta en punxa i els harmònics d'amplitud més significativa són els de 3r, 5è, 7è i 9è ordre, ordenats de més a menys amplitud respectivament.

A continuació, s'adjunten un parell de gràfiques; la forma d'ona representada en el domini del temps i el seu espectre harmònic representat en el domini de la freqüència:

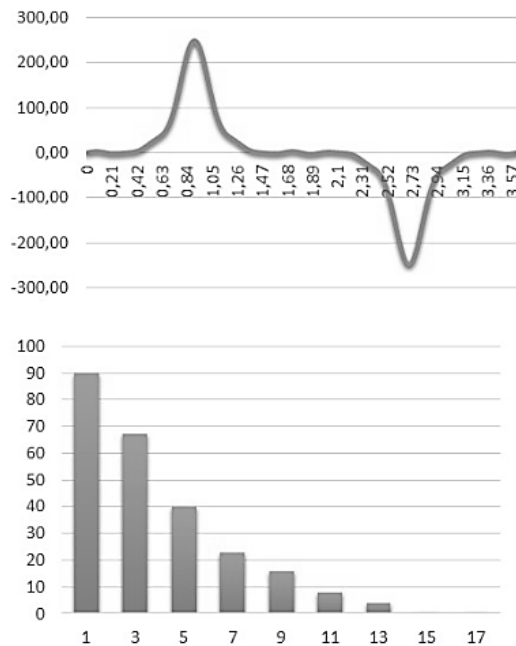


Fig. 12. Ona i espectre harmònic. Càrregues monofàsiques.

- Càrregues trifàsiques

La forma d'ona es presenta en dos monticles i els harmònics d'amplitud més significativa són els de 5è, 7è, 11è i 13è ordre, ordenats de més a menys amplitud respectivament.

A continuació, s'adjunten un parell de gràfiques; la forma d'ona representada en el domini del temps i el seu espectre harmònic representat en el domini de la freqüència:

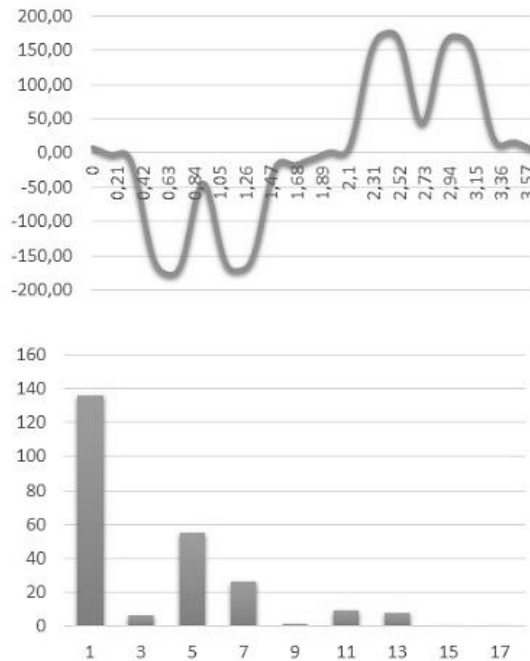


Fig. 13. Ona i espectre harmònic.
Càrregues trifàsiques.

2.8. Problemes mecànics en un motor elèctric

Existeixen diferents tipus de problemes mecànics i la majoria d'aquests es troben al rotor i a les parts mòbils de la màquina. Els més comuns són els següents:

- Desequilibris
- Desalineaments
- Coixinets
- Engranatges
- Excentricitats

En aquest apartat, es tracten amb més detall els problemes de desequilibris i desalineaments;

2.8.1. Desequilibris

Els desequilibris en un sistema mecànic s'originen quan la resultant de les forces internes i externes no són constants.

Existeixen dos tipus de desequilibris; els estàtics i els dinàmics.

Els desequilibris estàtics apareixen quan la distribució de masses en l'eix del rotor no és homogènia.

Per altra banda, els desequilibris dinàmics apareixen quan la distribució de pesos longitudinals al llarg de l'eix no és homogènia.

2.8.2. Desalineaments

Els desalineaments s'originen quan l'eix de la màquina s'acobla a un altre sistema i aquesta unió no és perfecte, de manera que apareix una força lineal.

Aquesta força es pot representar de la següent manera:

$$F = \frac{E \cdot I}{a} \tan \beta$$

Equació 6

On E i I són paràmetres constructius de la màquina i la a es calcula a partir de a_1 i a_2 , que són les distàncies respectives que defineixen el tipus d'acoblament. A continuació, s'adjunta un esquema d'un cas de desalineament:

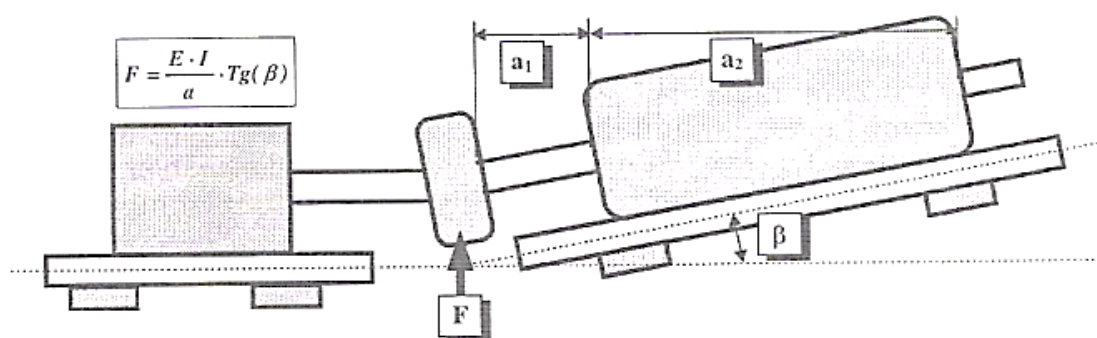


Fig. 14. Esquema cas desalineament.

2.8.3. Excentricitats

Les excentricitats s'originen quan l'espai que queda entre el rotor i l'estator no és uniforme, des del punt de vista angular. De la mateixa manera que els desequilibris, es poden diferenciar entre les excentricitats estàtiques i les excentricitats dinàmiques;

Les excentricitats estàtiques apareixen quan l'estator té una forma ovoide o quan hi ha un desplaçament de l'eix de rotació del rotor.

A continuació, s'adjunten unes imatges del cas d'excentricitat estàtica; La imatge *a)* representa un estator ovoide i la *b)* representa un desplaçament de l'eix de rotació del rotor:

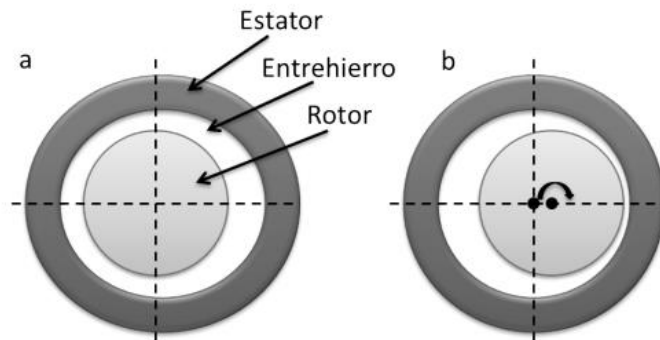


Fig. 15. Excentricitat estàtica.

A continuació, es representa l'evolució d'una trajectòria del rotor del motor i s'aprecia com l'espessor mínima entre el rotor i l'estator resideix sempre en el mateix punt:

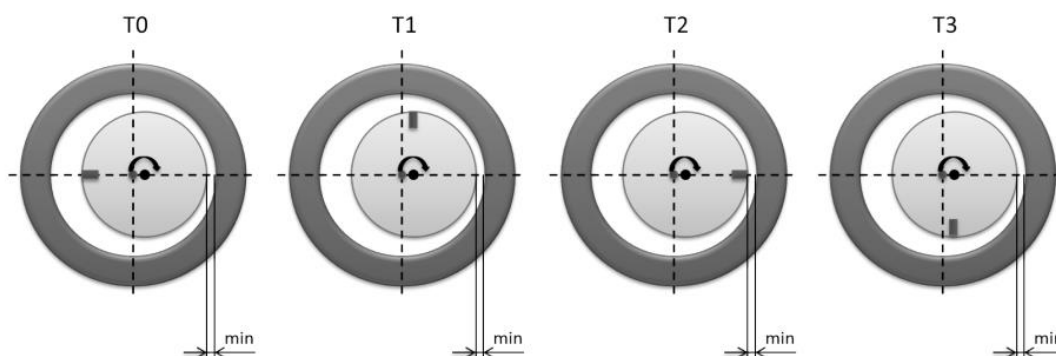


Fig. 16. Excentricitat estàtica. Evolució trajectòria.

Per altra banda, les excentricitats dinàmiques tenen a veure amb el rotor de la màquina, ja sigui per la forma del rotor, quan aquest presenta algun tipus de deformació, o perquè l'eix de rotació del rotor no coincideix amb el seu eix de rotació geomètric.

A continuació, s'adjunta una imatge del cas d'excentricitat dinàmica:

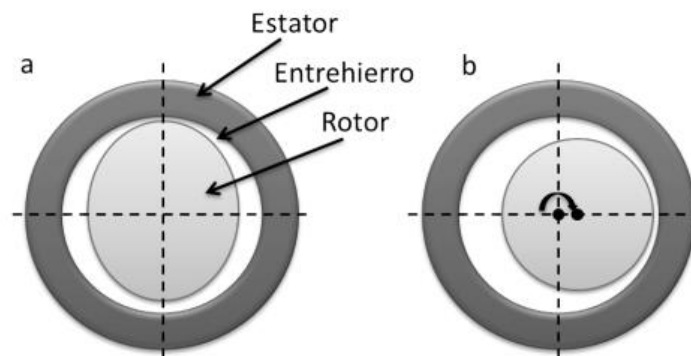


Fig. 17. Excentricitat dinàmica.

A diferència de l'excentricitat estàtica, en el cas de l'excentricitat dinàmica, l'espessor mínima entre el rotor i l'estator varia de lloc en funció del moment de la trajectòria del rotor.

A continuació, es representa l'evolució d'una trajectòria del rotor del motor i s'aprecia com l'espessor mínima entre el rotor i l'estator no sempre resideix en el mateix punt, sinó que varia en funció de la rotació del motor:

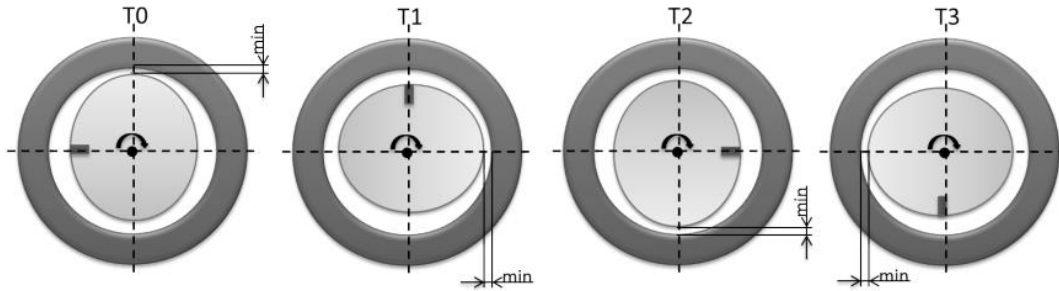


Fig. 18. Excentricitat dinàmica. Evolució trajectòria.

Quan en un motor existeixen excentricitats estàtiques i dinàmiques, aquestes es defineixen com a excentricitats mixtes.

Aquests casos a la realitat són els més comuns, i la conseqüència d'aquest fenomen és que modifica el camp magnètic de l'entreferro fins al punt que induïx components harmòniques en la corrent estàtica de la màquina.

Per últim, també existeix el cas de l'excentricitat axial, la qual consisteix en la combinació de totes les excentricitats anteriors al llarg de l'eix del motor, i es produeix quan l'eix de gir del motor no és paral·lel a l'eix geomètric del mateix.

A continuació, s'adjunta una imatge del cas d'excentricitat axial:

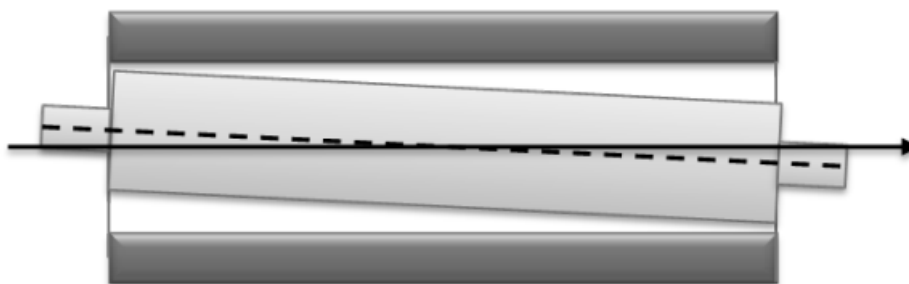


Fig. 19. Excentricitat axial.

3. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte es basa en obtenir una correlació entre les dades elèctriques i mecàniques del sistema electromecànic des del punt de vista freqüencial, de manera que es puguin identificar diferents patrons de funcionament del motor elèctric.

S'especificaran identificadors rellevants causants de mal funcionaments, i es compararan els resultats obtinguts amb altres tècniques d'anàlisi acústic o de vibracions.

El treball experimental es realitza al laboratori de potència i inicialment es van plantejar els diferents escenaris:

- Funcionament correcte del motor
- Funcionament incorrecte del motor
 - Tensió de subministrament fora del $\pm 10\%$ de la tensió nominal (230 V).
 - Sobre-càrrega del motor.
 - Manipulació mecànica del motor.

Aquest enfocament del projecte té sentit si es parteix de la base que el motor elèctric funciona correctament i es pot registrar un comportament natural sense distorsions, i a partir d'aquí anar evolucionant aquest comportament a base de manipulacions mecàniques per arribar a comportaments on puguin aparèixer pertorbacions mecàniques i elèctriques.

A efectes pràctics, aquest enfocament no ha sigut possible ja que el motor entregat per part de la Universitat ja presentava un seguit de pertorbacions importants. En aquest context, l'estudiant va aprofitar l'avinentsa de la situació com a una oportunitat per redissenyar certs punts de la investigació, i marcar com a nou objectiu aportar un manteniment de caire mecànic al motor i millorar el seu comportament i el seu estat en general.

4. Objectius i especificacions tècniques

En aquest apartat es tracta amb detall l'objectiu del projecte i de quina manera es desenvoluparà l'estudi experimental, ja sigui el disseny de la instrumentació de mesura com el disseny del sistema d'adquisició de dades.

L'objectiu final de la investigació és detectar anomalies mecàniques a partir de dades elèctriques. Els diferents problemes elèctrics que es poden identificar són els següents:

- Sobre-consums.
- Transitoris.
- Fluctuacions de voltatge.
- Interrupcions d'energia.
- Soroll elèctric.
- Harmònics.
- Variacions de freqüència.
- Control del consum d'energia reactiva.

I la finalitat del projecte és trobar una correlació d'aquests fenòmens amb conseqüències mecàniques tangibles del motor elèctric.

Per tal de desenvolupar la basant pràctica del projecte, és necessari:

- Un motor elèctric
- Un equip d'anàlisi intel·ligent
- Un software informàtic per l'adquisició i tractament de dades.

4.1. El motor elèctric

El motor escollit per a realitzar els assajos pertinents és un motor asíncron dels laboratoris del TecnoCampus Mataró – Maresme; el "POWERTECH DRIVE AX 63C".

Als annexos [Annex 1.] s'adjunten les especificacions tècniques d'aquest motor elèctric.

4.2. Equips d'anàlisi

Com a proposta d'equip d'anàlisi, s'han escollit els següents analitzadors de xarxa elèctrica:

- SafeLine – Universal + 7WR M4 (protecció amb rearmament automàtic)
- SafeLine – Universal + 7WR M1

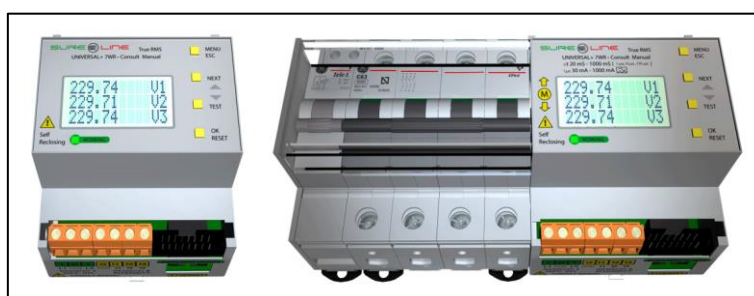


Fig. 20. Analitzadors elèctrics.

Aquests analitzadors tenen les següents prestacions;

- Unitat universal d'anàlisi de xarxes
- Tele-controlables amb servidor WEB i Modbus TCP / IP
- Visualització gràfica i numèrica en temps real
- Mesures AC / DC i AC+DC
- Tele-gestió, manteniment energètic i control I/O tot en un mateix mòdul
- Oscil·loscopi registrador d'esdeveniments en forma d'ona amb pre-trigger
- Historial gràfic de THD – HD – Var amb promig cada 5 minuts
- 64 harmònics amb càlcul de potència, factor de potència i distorsió de rang en %
- Mesures dinàmiques de 1600 paràmetres elèctrics + temperatura i humitat

Aquests analitzadors es muntaran amb uns transformadors toroidals d'intensitat, i com a proposta seran de fins a 70 A.

4.3. El software informàtic

4.3.1. Servidor web per a l'adquisició de dades

Les dades que es recullen del motor elèctric es poden visualitzar des del servidor web del fabricant de l'analitzador; SafeLine.

A continuació s'adjunten unes imatges de les dades graficades:

- Exemple de tensió RMS:



Fig. 21. Captura: Tensió RMS.

- Exemple d'oscil·loscopi:

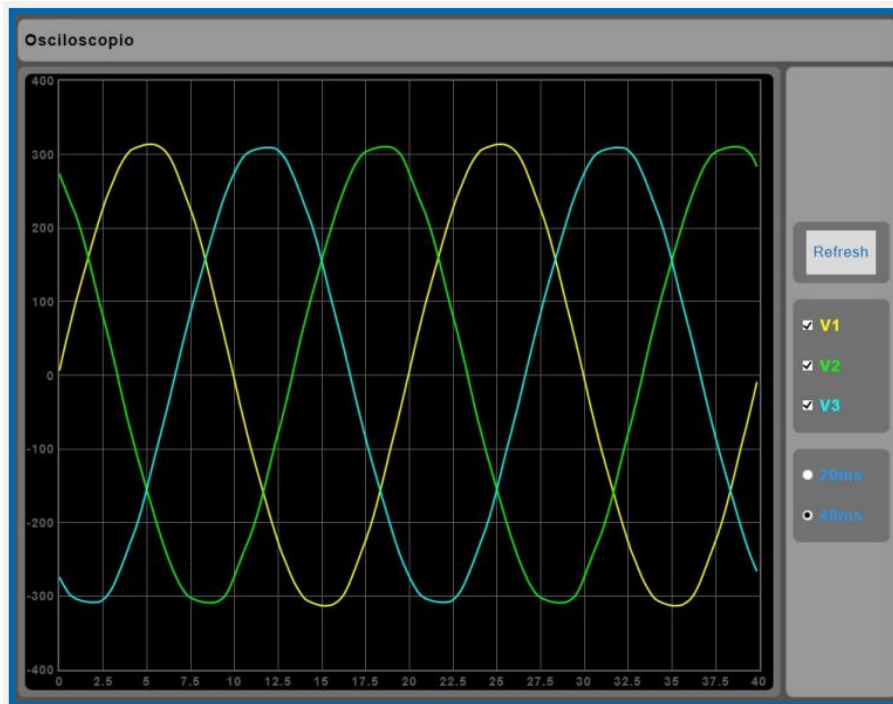


Fig. 22. Captura: Oscil·loscopi.

- Exemple de registrador d'esdeveniments amb pre-trigger:

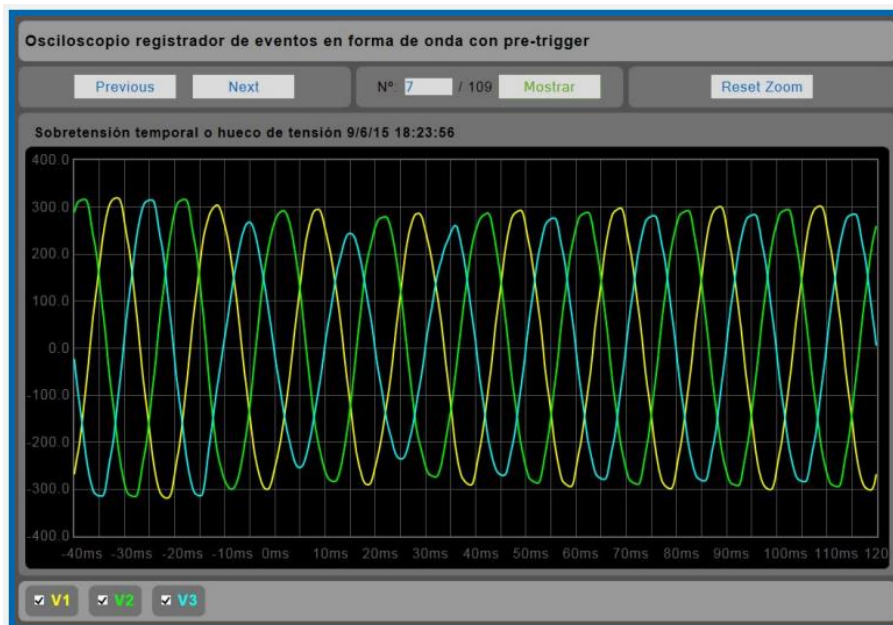


Fig. 23. Captura: Esdeveniment d'ona 1.

- Exemple de registrador d'esdeveniments amb pre-trigger:

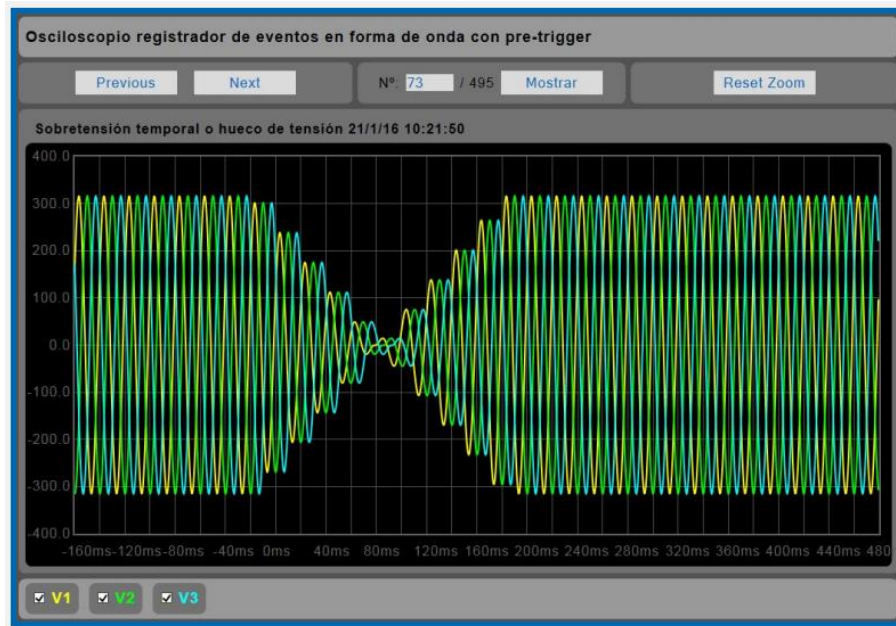


Fig. 24. Captura: Esdeveniment d'ona 2.

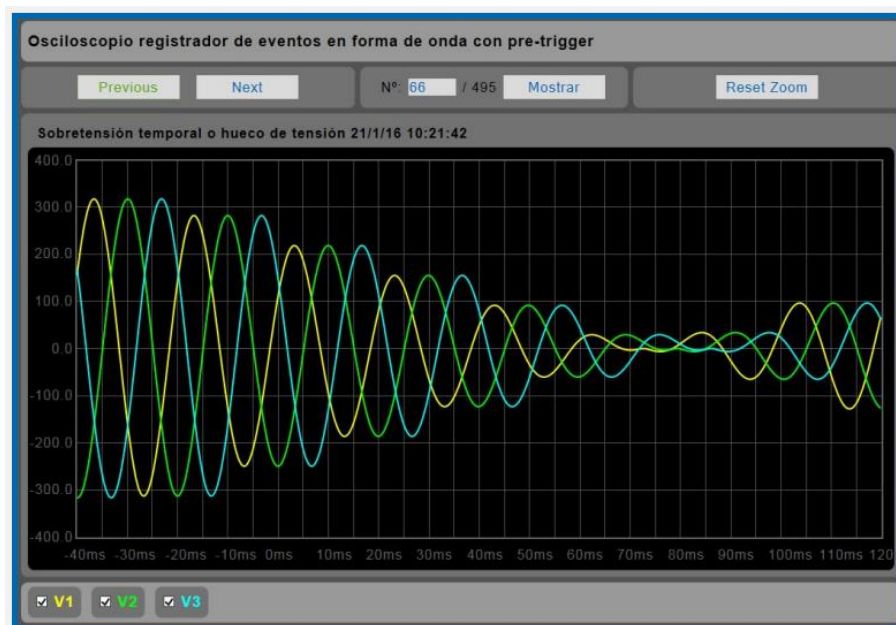


Fig. 25. Captura: Esdeveniment d'ona 3.

- Exemple d'historial de tensió

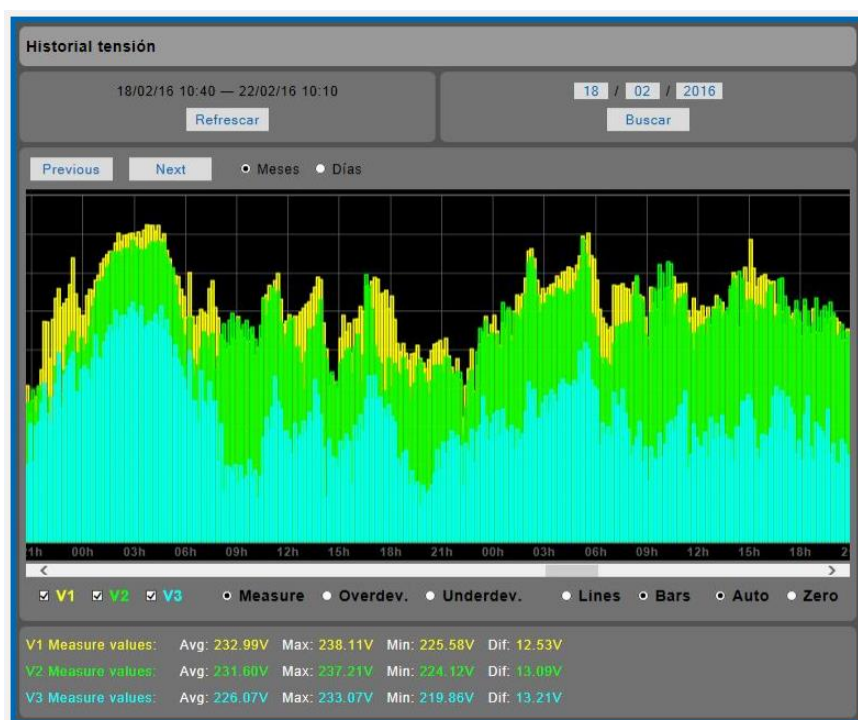


Fig. 26. Captura: Historial de tensió 1.



Fig. 27. Captura: Historial de tensió 2.

4.3.2. Tractament de dades

Com a proposta de software informàtic per al tractament de dades, es contemplen els programes MATLAB i DataWatchPro.

- MATLAB [4]

Compta amb la seva eina *Predictive Maintenance Toolbox*, que permet gestionar dades de sensors, dissenyar indicadors de condició i estimar la vida útil restant d'una màquina.

A continuació, es mostra les diferents fases d'anàlisi que se seguiran al llarg de la investigació:

- 1) Adquisició de dades.
- 2) Processament de dades.

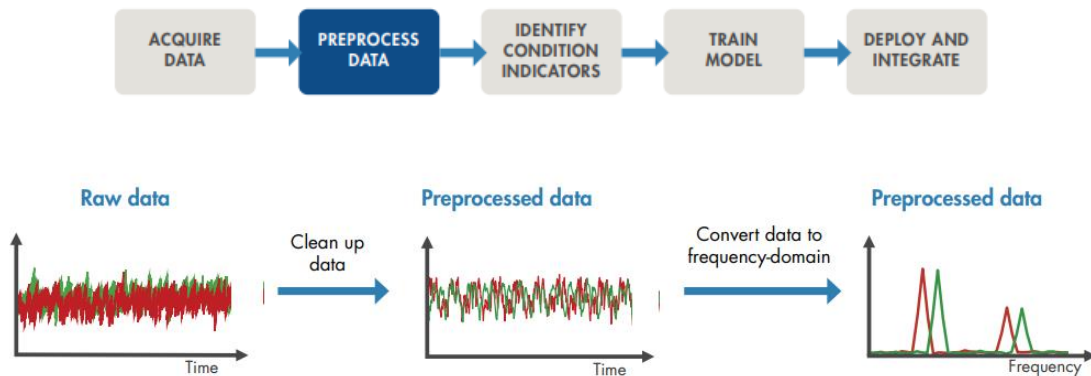


Fig. 28. Tractament de dades.

- 3) Identificació dels indicadors de condició.

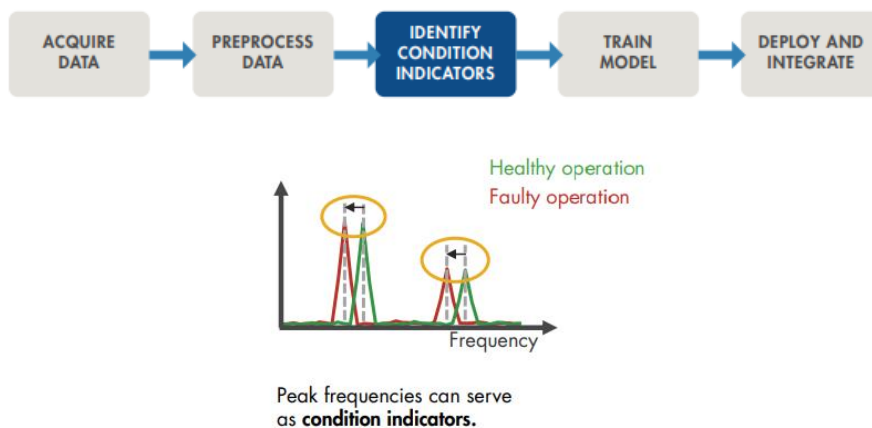


Fig. 29. Indicadors de condició.

4) Entrenament del model predictiu.

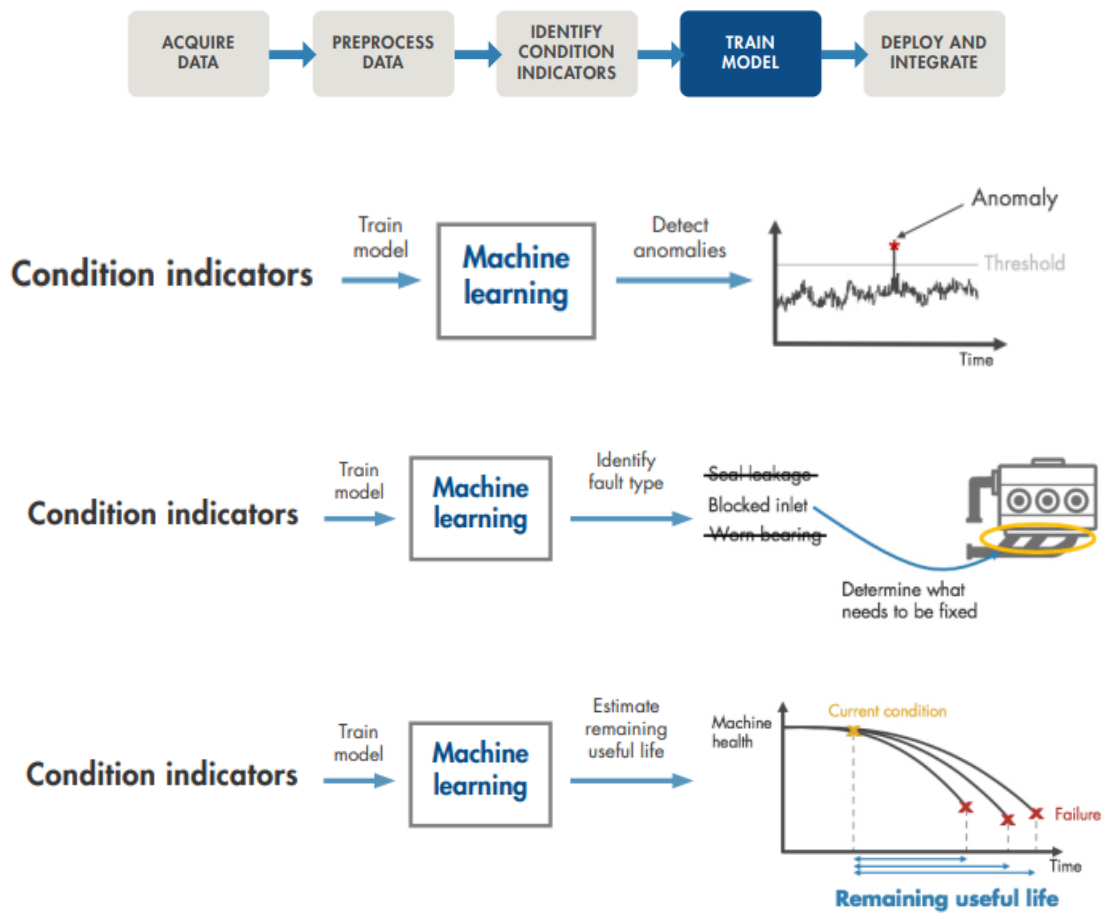


Fig. 30. Model predictiu.

5) Implementació i integració.

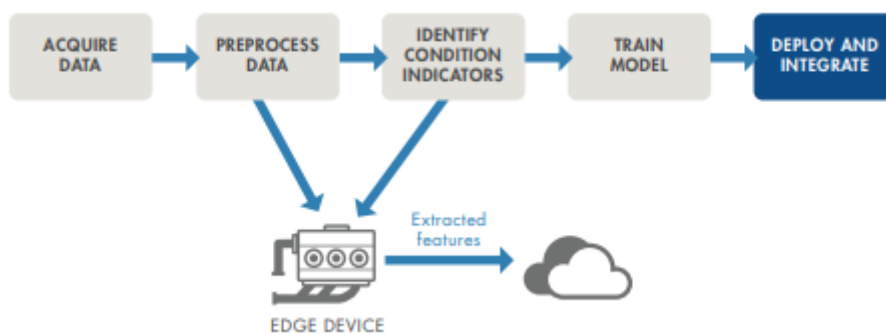


Fig. 31. Implementació i integració.

- DataWatchPro

El DataWatchPro és un eina de programari dissenyada i desenvolupada per llegir, guardar i analitzar dades d'equips elèctrics de mesura i protecció i disposa de 201 paràmetres de lectura i anàlisi.

Als annexes s'adjunta un llistat amb tots els paràmetres elèctrics de lectura i anàlisi.

El programa DataWatchPro compta diferents mòduls d'anàlisi. Seguidament, es mostren els mòduls més rellevants:

- Mòdul d'anàlisi de dades.

Aquesta eina permet navegar per les dades en blocs de 24 hores. S'adjunta una captura de pantalla d'exemple a continuació:

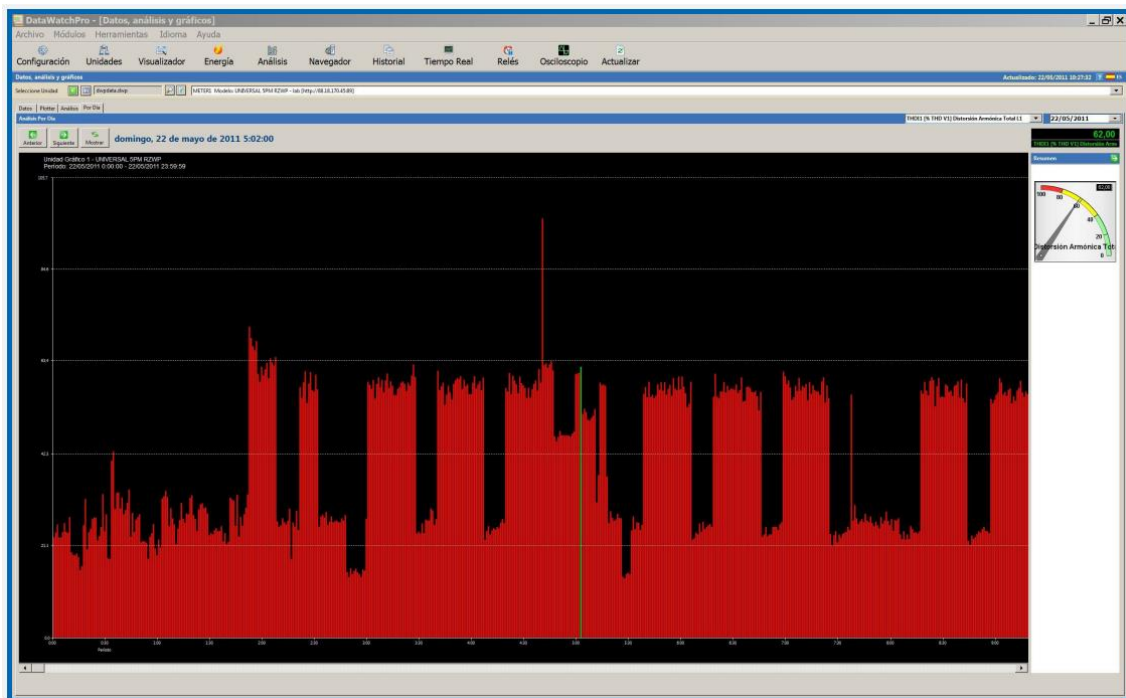


Fig. 32. Mòdul: Anàlisi de dades.

- Mòdul de dades en temps real.

Aquesta eina permet visualitzar els diferents paràmetres elèctric en temps real

S'adjunten dues captures de pantalla d'exemple a continuació:

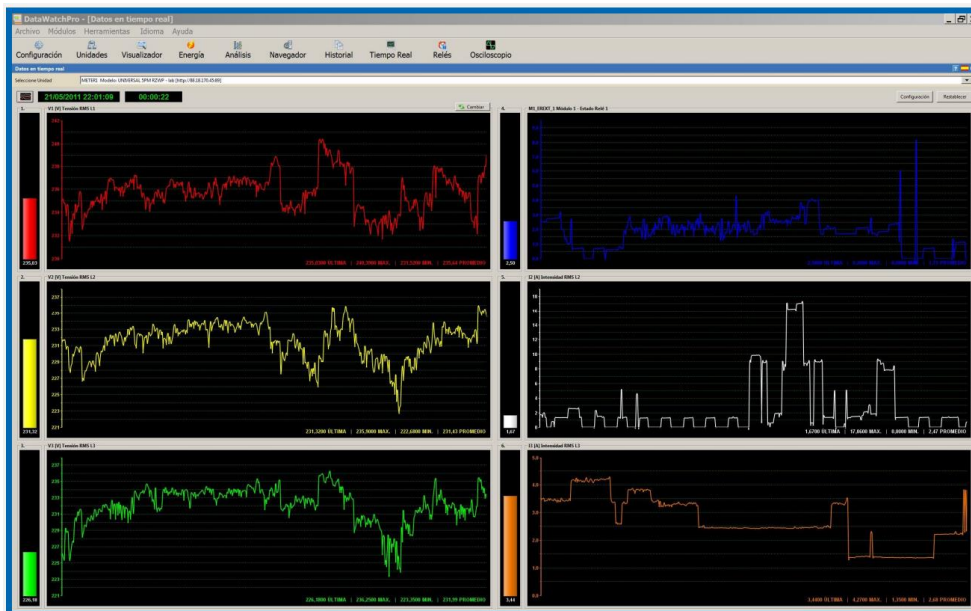


Fig. 33. Mòdul: Temps real 1.

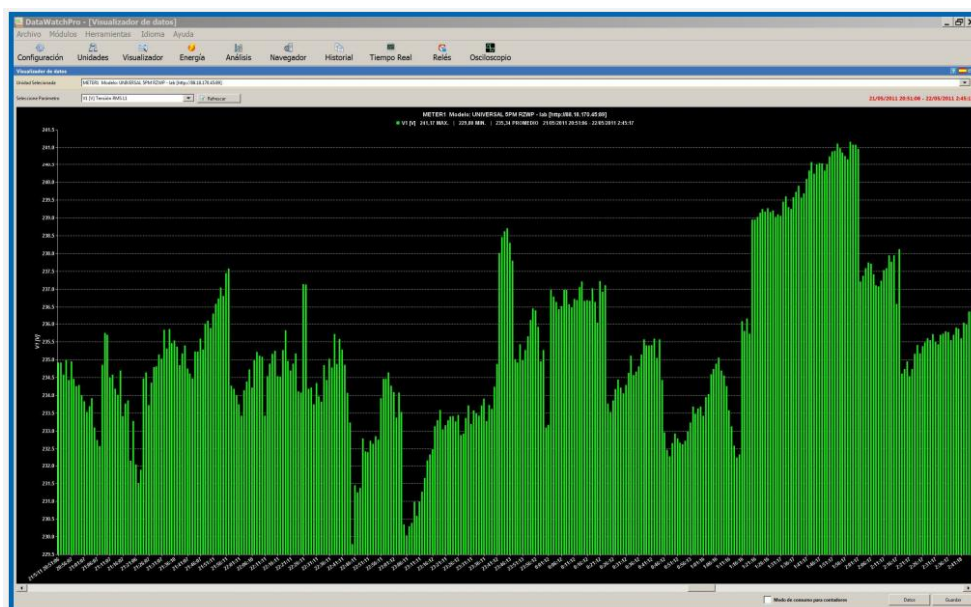


Fig. 34. Mòdul: Temps real 2.

- Mòdul oscil·loscopi

Aquesta eina permet registrar esdeveniments d'oscil·loscopi i visualitzar-los.

S'adjunta una captura de pantalla d'exemple a continuació:

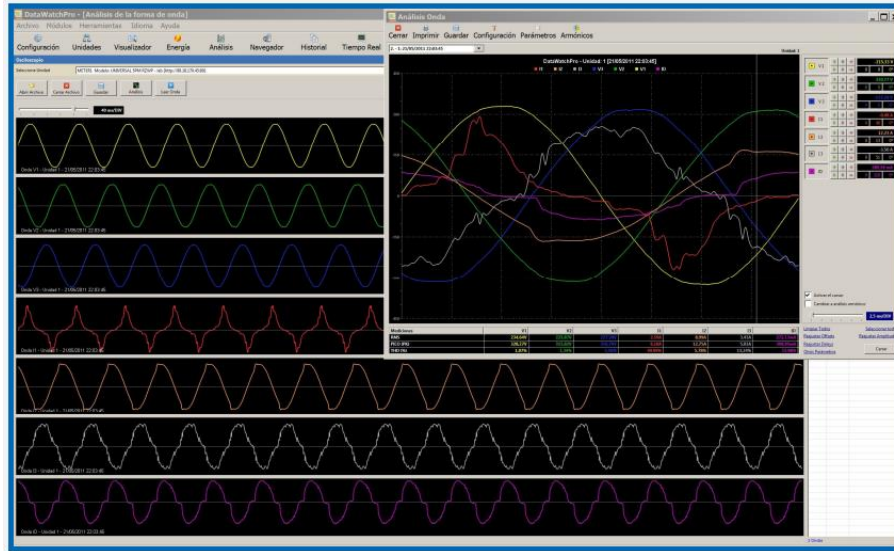


Fig. 35. Mòdul: Oscil·loscopi 1.

El mòdul d'oscil·loscopi també permet visualitzar la forma d'ona en el domini de la freqüència, representant així l'espectre harmònic de l'ona:

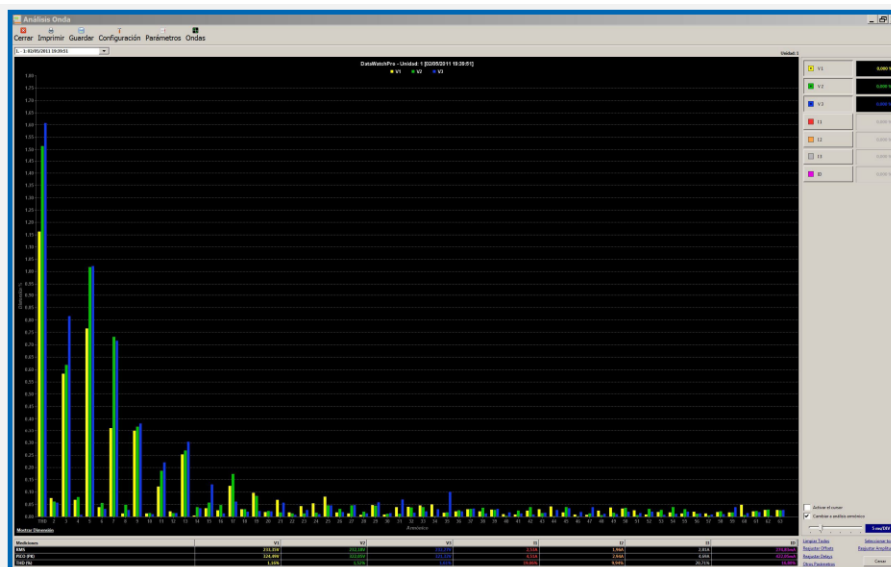


Fig. 36. Mòdul: Oscil·loscopi 2.

5. Disseny i implementació

En aquest apartat s'exposa el procediment que s'ha seguit per dissenyar i implementar la part pràctica del projecte, ja sigui el disseny i implementació de la instrumentació de mesura, del sistema d'adquisició de dades i dels diferents escenaris experimentals.

5.1. Disseny de la instrumentació de mesura

La connexió "Motor – Analitzador" es basa en el següent esquema elèctric:

L'analitzador de xarxa s'alimenta de manera auxiliar amb 230 V RMS i mesura els valors de tensió i intensitat a les 3 fases.

A continuació, s'adjunta l'esquema del connexionat que s'ha muntat al laboratori:

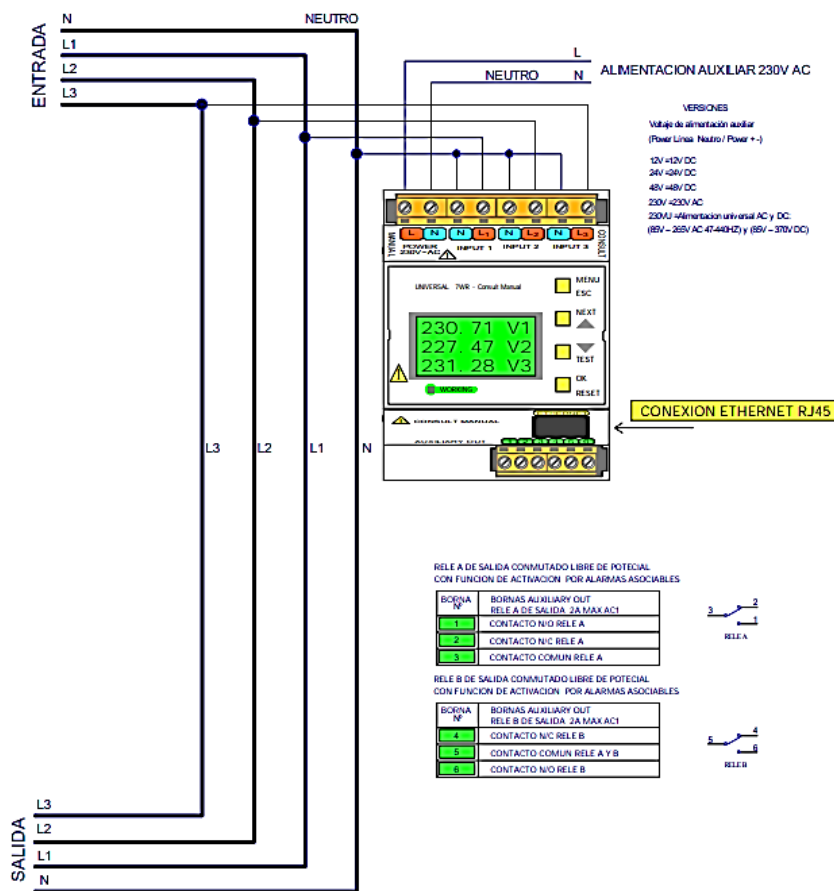


Fig. 37. Esquema elèctric de l'analitzador.

5.2. Disseny del sistema d'adquisició de dades

5.2.1. Paràmetres elèctrics

Els paràmetres en valor eficaç que s'han escollit per a dur a terme el tractament de dades de l'estudi són els següents:

- Tensió a les 3 fases (V1, V2 i V3)
- Intensitat a les 3 fases (I1, I2 i I3)
- Distorsió harmònica total en tensió a les 3 fases (THDV1, THDV2 i THDV3)
- Distorsió harmònica total en intensitat a les 3 fases (THDI, THDVI2 i THDI)
- Intensitat diferencial (ID)

5.2.2. Freqüència de mostreig

S'han plantejat diferents escenaris variant la freqüència de mostreig de l'adquisició de dades dels paràmetres RMS:

- 1 mostra cada 3 segons
- 1 mostra cada 10 segons
- 1 mostra cada 30 segons

El mostreig que s'ha utilitzat en el registre d'oscil·loscopi és molt més elevat, sent de 128 mostres per cicle, per tant, 128 mostres cada 20 ms.

5.3. Disseny dels escenaris experimentals

Inicialment, s'havia dissenyat que el primer escenari experimental a estudiar era el del comportament correcte del motor. Això a efectes pràctics no ha sigut possible, ja que el motor obtingut ja presentava un comportament molt distorsionat.

Llavors, s'ha redissenyat l'enfocament pràctic del projecte i enlloc de registrar un comportament correcte i a partir d'aquí, manipular el motor per obtenir comportaments incorrectes, s'ha marcat com a objectiu manipular mecànicament el motor per arribar a obtenir una millora en el comportament del motor.

En quant a la monitorització elèctrica del motor, s'ha registrat el comportament elèctric del motor en els diferents escenaris:

5.3.1. Motor en vibració accentuada

El comportament normal del motor ja presenta un seguit de vibracions, doncs s'ha registrat el moment on aquestes vibracions es manifesten de manera més crítica.

5.3.2. Tall de subministrament elèctric

En aquest escenari, s'ha provocat un tall d'alimentació, registrant 3 instants diferents en el temps, per obtenir l'evolució de l'aturada del motor. Aquest 3 instants s'han definit de la següent manera:

- I. 0,5 segons després del tall d'alimentació
- II. 1,0 segons després del tall d'alimentació
- III. 1,5 segons després del tall d'alimentació

5.3.3. Re-alimentació d'energia

En aquest escenari, s'ha provocat una re-alimentació del sistema just després d'un tall de subministrament elèctric.

5.3.4. Infra-tensió d'alimentació

En aquest forçat que el subministrament elèctric sigui inferior al 10% de la tensió nominal i s'han obtingut 3 casos diferents:

- I. Tensió d'alimentació < 10 % tensió nominal (< 207 V)
- II. Tensió d'alimentació < 50 % tensió nominal (< 115 V)
- III. Tensió d'alimentació < 85 % tensió nominal (< 35 V)

5.3.5. Sobrecàrrega de l'eix del rotor

En aquest escenari s'ha sobrecarregat l'eix del motor amb una resistència de rotació externa.

6. Anàlisi de viabilitat

En aquest apartat comenten els diferents aspectes de viabilitat del projecte, des del punt de vista d'una implementació IoT de caire industrial.

La importància de la IoT per a la indústria engloba la transversalitat, l'ajuda en la presa de decisions, la reducció de despeses, un impacte en la innovació i el control en temps real i de predictibilitat.

6.1. Viabilitat tècnica

En quant a la viabilitat tècnica, l'anàlisi elèctric ofereix un avantatge rellevant respecte altres tècniques d'anàlisi, ja que no és intrusiu i pot actuar a temps real sense aturar els processos industrials.

Les dificultats que s'han manifestat en quant a la viabilitat tècnica del projecte han sigut a la fase d'instal·lació i configuració de l'analitzador de xarxa elèctrica. La ciència que hi ha darrera aquest muntatge és senzilla, però el gran impediment de les implementacions IoT i de la Indústria 4.0. en general, són els impediments de caire social.

Un dels requeriments de l'analitzador, com a instrument IoT, necessita connexió a Internet per a la configuració i posteriorment per a la comunicació general de l'equip. Doncs els impediments que s'han anat trobant al llarg de la part pràctica, han sigut bàsicament de desconfiança respecte a aquesta tecnologia, manifestada en forma de por, per no posar en compromís la seguretat de les infraestructures de xarxa de la Universitat.

Excepte aquesta dificultat sòcio-cultural, el projecte tècnicament és totalment viable, per la seva simplicitat de muntatge, material i que no és intrusiva de cara a les màquines o sistemes a monitoritzar.

6.2. Viabilitat mediambiental

Aquest estudi representa una oportunitat per a revolucionar el món industrial i que la productivitat i el manteniment dels processos industrials vagin alineats amb la sostenibilitat, ja sigui a nivell ecològic, econòmic i social.

Les decisions i les tendències al sector industrial són en base als aspectes econòmics, i això crea una confrontació d'interessos, arribant a escenaris de incoherència sense tenir en compte els fonaments més bàsics de la sostenibilitat.

Per tant, la quarta revolució industrial i les implementacions IoT són una oportunitat per al desenvolupament sostenible al sector industrial, oferint un control més precís dels processos i per tant, una millora en el manteniment dels actius i una optimització energètica en tots els aspectes.

6.3. Viabilitat econòmica

Com s'ha comentat en l'apartat anterior, la tecnologia utilitzada presenta un seguit d'oportunitats de millora en els diferents àmbits ecològics, socials i econòmics, i en quant a l'impacte econòmic, és especialment interessant plantejar tot l'estalvi econòmic que ofereix aquesta tecnologia, no només per a la predicció d'anomalies i per un manteniment intel·ligent que s'ajusti a les necessitats de cada situació, sinó per a la quantitat d'informació que pot aportar, perquè tota aquesta informació aplicada en les aspectes dels processos industrials es veu directament relacionada en una optimització de costos i per tant un estalvi econòmic.

La viabilitat econòmica enfocada a aquest projecte en concret, es basa en un estudi totalment viable per la seva absència de costos; El projecte ha sigut una investigació experimental, portada a terme en un laboratori de la universitat, on els diferents equips que s'han utilitzat (motor elèctric, analitzador de xarxa, cablejat, energia elèctrica, softwares informàtics, etc) no han suposat cap tipus de despesa econòmica.

Per tant, com a afegit d'aquest apartat de viabilitat econòmica, aquest projecte no compta amb cap tipus de pressupost o d'estudi econòmic, més enllà de valorar les conseqüències positives que pot generar aquesta solució tecnològica.

7. Perspectiva de gènere

Aquest projecte té en compte la perspectiva de gènere, identificant si la solució tecnològica proposada s'ajusta a les qüestions biològiques, factors socials i culturals en quant a les diferències, preferències o necessitats entre dones i homes.

S'ha identificat que la perspectiva de gènere no aplica en aquest estudi per les següents raons:

- No existeix un públic objectiu concret; No es té en compte el gènere, edat, raça o diversitat funcional en el segment de clients objectiu a considerar.
- L'ús d'aquesta tecnologia no diferencia necessitats entre dones i homes.
- La solució no contribueix de cap manera en les construccions culturals de gènere dins l'àmbit industrial.

Per tant, la perspectiva de gènere no aplica en aquest projecte.

8. Planificació del projecte

En aquest apartat es mostra l'estratègia de planificació per dur a terme el projecte.

El projecte ha seguit una planificació acord amb els diferents apartats de l'estudi.

Entre aquests apartats, es pot diferenciar la part teòrica de la part pràctica, tot i que al ser una investigació de laboratori, es va deixar un gran marge d'actuació per part de l'estudiant, de manera que tingués llibertat a l'hora de pivotar els objectius i la manera de prosseguir, per evitar estancar-se en algun punt del procés.

A la primera fase teòrica, es va fer una recerca detallada del món del manteniment predictiu, de l'anàlisi elèctric, dels motors d'inducció i les principals anomalies mecàniques, les diferents tècniques de detecció d'aquestes anomalies, i diferents softwares per fer el tractament de dades.

Doncs aquesta fase va seguir la planificació esperada; amb constància es va anar avançant fins arribar a un recull d'informació interessant per enfocar detalladament la part pràctica.

A la segona fase pràctica, l'estudiant es va trobar amb molts imprevistos que no estaven al seu abast, com pot ser l'estat del motor, la configuració de l'analitzador a la xarxa d'internet de la Universitat, i va acabar decidint redissenyar certs aspectes del projecte perquè l'estudi no quedés frenat.

En general, la planificació ha sigut satisfactòria per la capacitat de reacció i agilitat a l'hora d'afrontar els imprevistos que es poden ocasionar en qualsevol projecte d'investigació i recerca científica.

9. Experimentació

Apartat on es tracta tot el desenvolupament de la part pràctica de la investigació.

9.1. Estat inicial del motor

L'estat inicial del motor era bastant crític. Simplement en engegar-lo feia molt soroll i es sobre-escalfava ràpidament. Per això, es va decidir obrir-lo i observar quin era l'estat dels components interiors del motor.

Abans d'obrir-lo, es va registrar el comportament elèctric amb la intenció de poder comparar els resultats a posteriori.

Quan es va obrir el motor, es va trobar que el rotor estava significativament perjudicat, amb parts mecàniques molt desgastades degut al fregament amb altres components interns del motor.

El problema era de desalineament i excentricitat de l'eix, cosa que provocava l'impacte de les parts mòbils amb les parts estàtiques i que mica en mica s'anés deteriorant.

Tot l'interior de l'estator estava ple de pols de ferro, degut al desgast que es provocava entre components.

A continuació, s'adjunten unes imatges del motor:

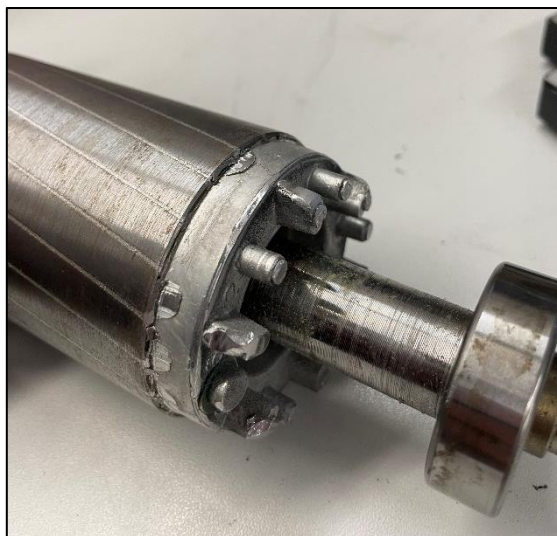


Fig. 38. Imatge de l'interior del motor (1)



Fig. 39. Imatge de l'interior del motor (2).

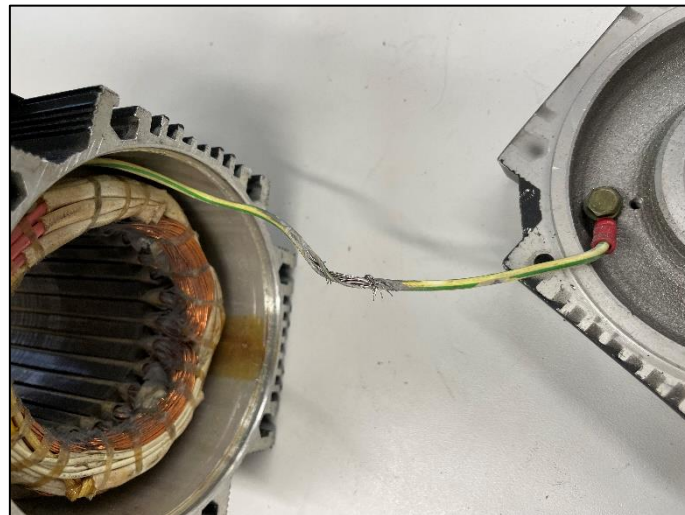


Fig. 40. Imatge de components del motor deteriorats.

L'estudiant va tornar a muntar el motor amb molta delicadesa per reconduir les pertorbacions d'excentricitat i desalineament.

El resultat va ser totalment satisfactori, ja que les vibracions i el soroll acústic es van reduir a la meitat perfectament.

Durant aquells dies, hi va haver un seguit de problemes de comunicació amb el motor i es va acabar perdent el recull de dades i per tant, la comparació entre els 2 estats del motor.

10. Tractament de dades

En aquest apartat es detalla l'obtenció i tractament de dades en funció dels diferents escenaris plantejats.

10.1. Valors RMS

Els valors RMS s'han utilitzat en primer lloc per a aplicar la transformada de Fourier i obtenir l'espectre harmònic de la ona. També s'han tractat per a obtenir els valors de consum, ja sigui d'energia activa, reactiva o aparent, entre molts dels altres paràmetres elèctrics, tot i que en aquest estudi, al estar enfocat a l'anàlisi freqüencial del sistema, s'han prioritzat els esdeveniments d'oscil·loscopi i treballar amb l'espectre harmònic de les ones de tensió i intensitat.

10.2. Esdeveniments d'oscil·loscopi

L'oscil·loscopi amb el que compta l'analitzador de xarxa elèctrica, compta amb un registrador d'esdeveniments de forma d'ona amb pre-trigger programable, autoescala i longitud de registre programable de 160 – 4480 ms.

Els esdeveniments registrats que s'adjunten a continuació tenen una escala de 5 ms/div i una longitud total de registre de 640 ms.

Com que la freqüència de la xarxa elèctrica és de 50 Hz (50 períodes d'ona en 1 segon), la longitud d'un període és de 20 ms. En un període s'obtenen 128 captures.

Cada captura registra els 7 canals:

- x3 tensió (V1, V2, i V3)
- x3 intensitat (I1, I2 i I3)
- x1 intensitat diferencial (ID)

Per tant a cada captura s'obtenen 896 mostres.

Per tant, en una esdeveniment de 5 ms/div es mostren 2 períodes en una longitud de 40 ms.

10.2.1. Comportament normal

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor sense cap manipulació, sent aquest el comportament normal del motor.

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	225,04V	225,86V	228,98V	0,91A	0,95A	0,94A	2,46mA
PICO (PK)	316,64V	318,29V	323,19V	1,32A	1,37A	1,36A	1,40mA
THD (%)	1,49%	1,37%	1,44%	1,87%	1,69%	1,81%	404,16%

Taula 1. Valors: Comportament normal

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

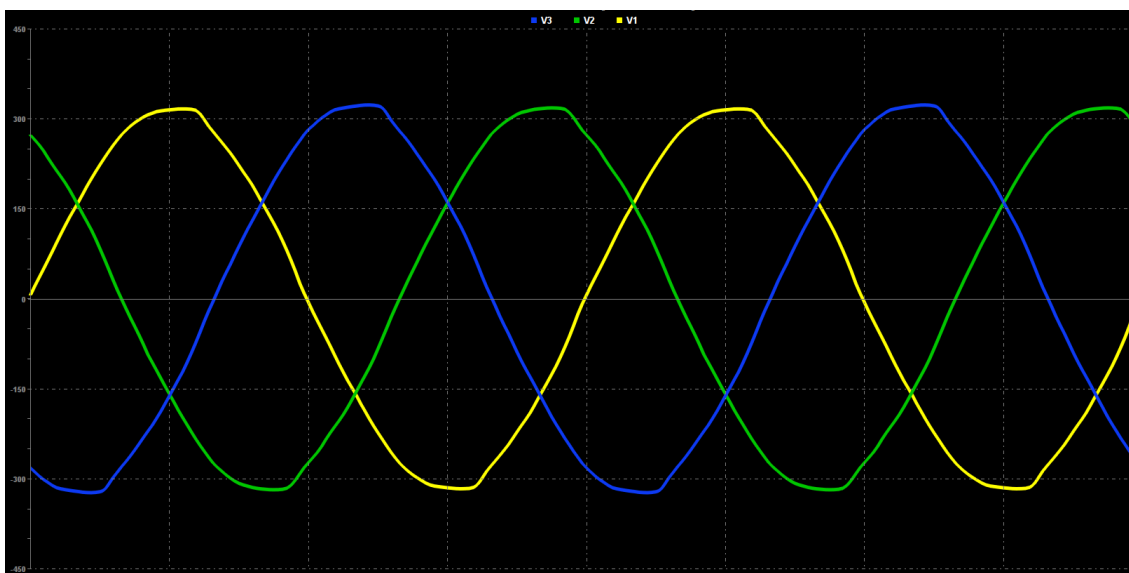


Fig. 41. Ona de tensió: Comportament normal.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases:



Fig. 42. Espectre harmònic de tensió: Comportament normal (1).

En la captura anterior es mostra l'harmònic de primer ordre, de dimensió 225 V, però no aporta informació de valor respecte l'anàlisi freqüencial, de manera que, per obtenir una millor resolució de tot el conjunt d'harmònics es filtra l'harmònic fonamental i l'espectre pren aquesta forma:

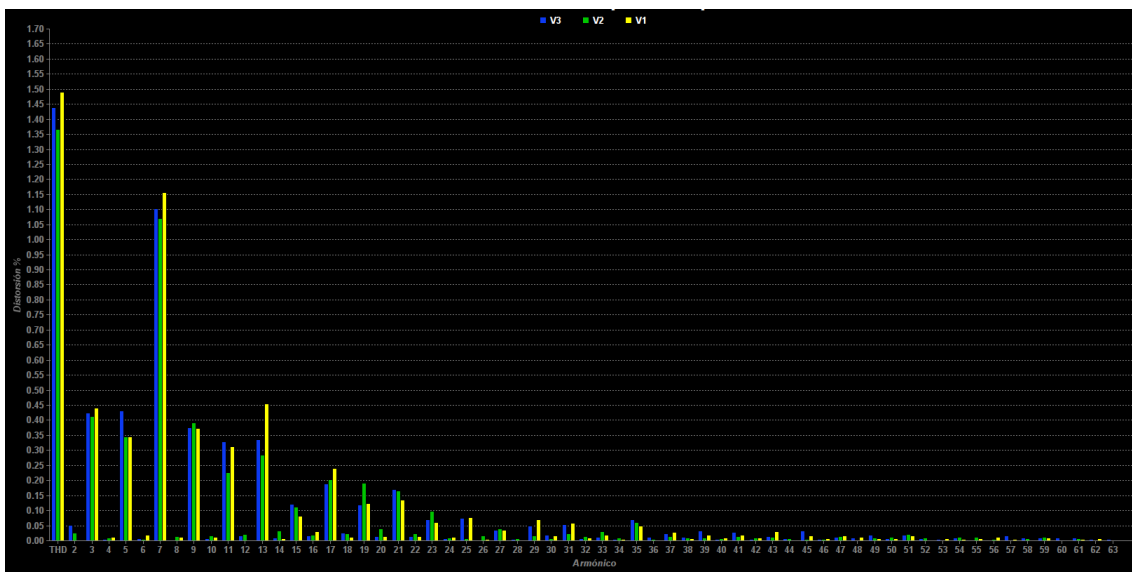


Fig. 43. Espectre harmònic de tensió: Comportament normal (2).

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

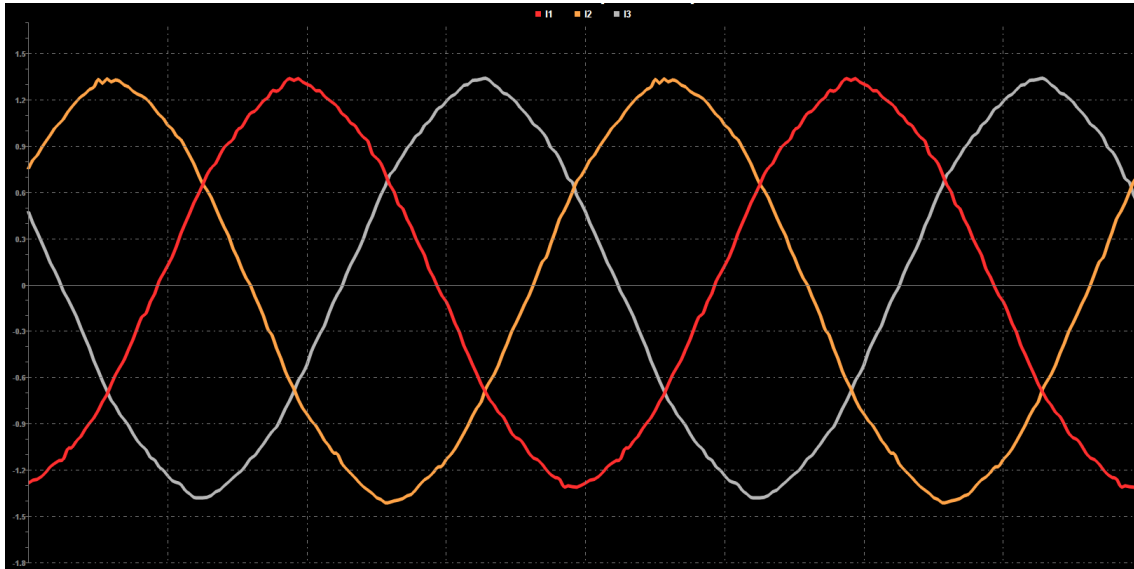


Fig. 44. Ona d'intensitat: Comportament normal.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases:



Fig. 45. Espectre harmònic d'intensitat: Comportament normal (1).

En la captura anterior es mostra l'harmònic de primer ordre, de dimensió 0,9 A, però no aporta informació de valor respecte l'anàlisi freqüencial, de manera que, per obtenir una millor resolució de tot el conjunt d'harmònics, es filtra l'harmònic fonamental i l'espectre pren aquesta forma:

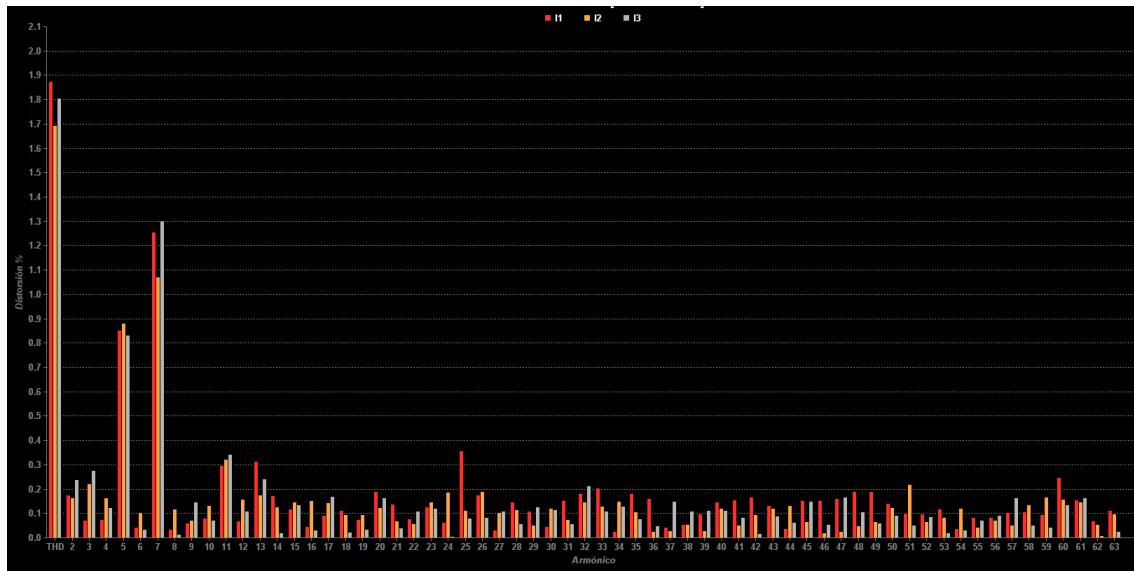


Fig. 46. Espectre harmònic d'intensitat: Comportament normal (2).

La tensió té un valor eficaç de 225 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

La intensitat té un valor eficaç de 0,9 A aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,46 mA, per tant és negligible.

Tot i així, a continuació s'afegeixen les captures de la forma d'ona i de l'espectre harmònic.

- Intensitat diferencial

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de la intensitat diferencial:

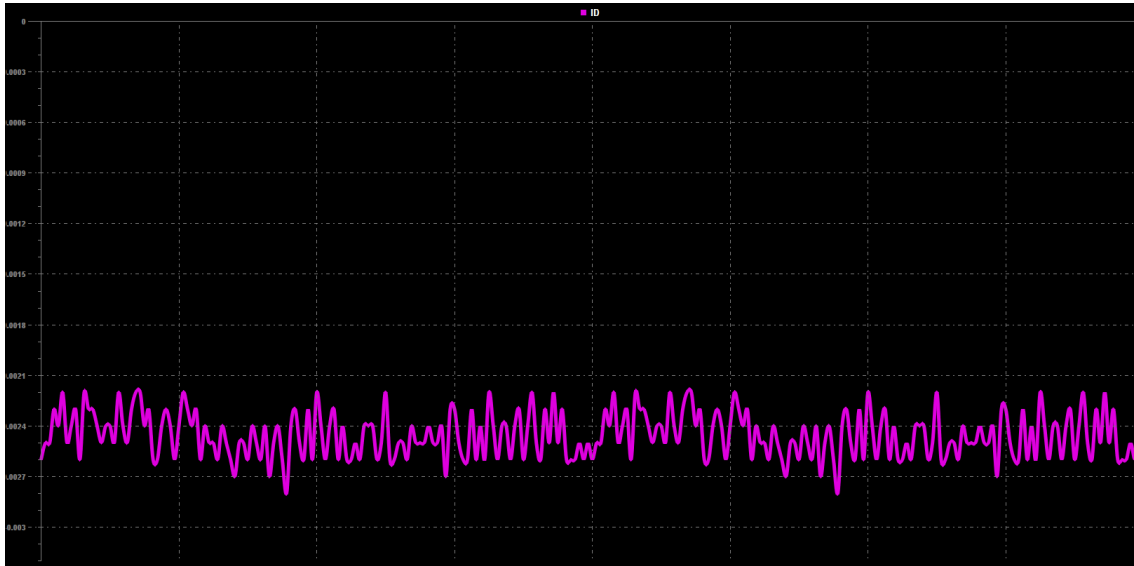


Fig. 47. Ona d'intensitat diferencial: Comportament normal.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de la intensitat diferencial:

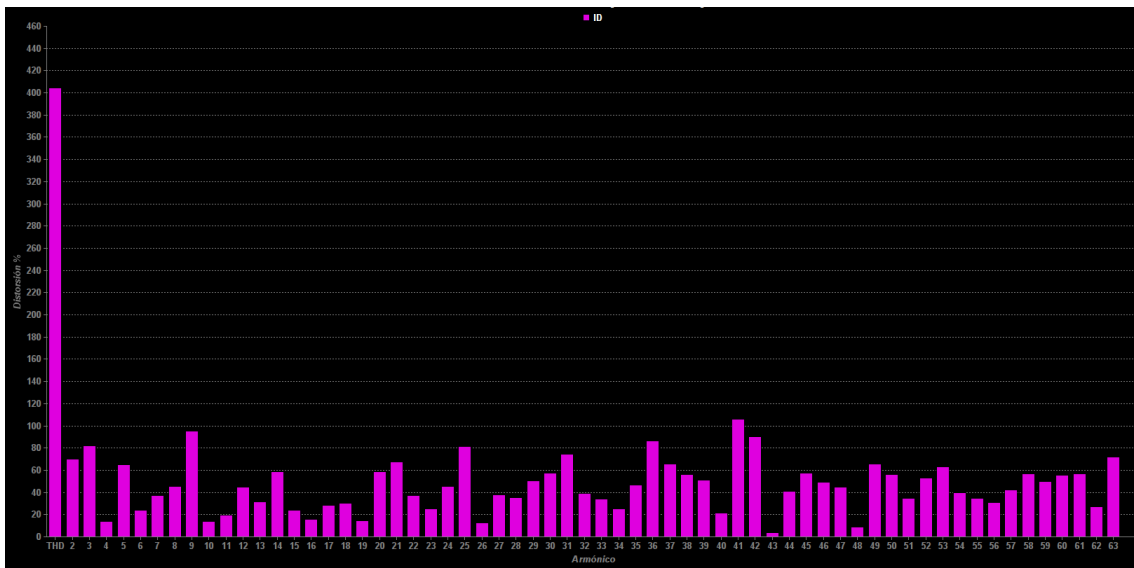


Fig. 48. Espectre harmònic d'intensitat diferencial. Comportament normal.

10.2.2. Vibració

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor quan la desalineació de l'eix manifesta significativament fent que el conjunt del motor entri en un estat de vibració.

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	224,43V	225,14V	228,35V	0,90A	0,94A	0,93A	2,46mA
PICO (PK)	315,74V	319,29V	322,11V	1,31A	1,37A	1,36A	1,45mA
THD (%)	2,68%	1,51%	1,91%	2,03%	1,88%	1,95%	181,25%

Taula 2. Valors: Vibració

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

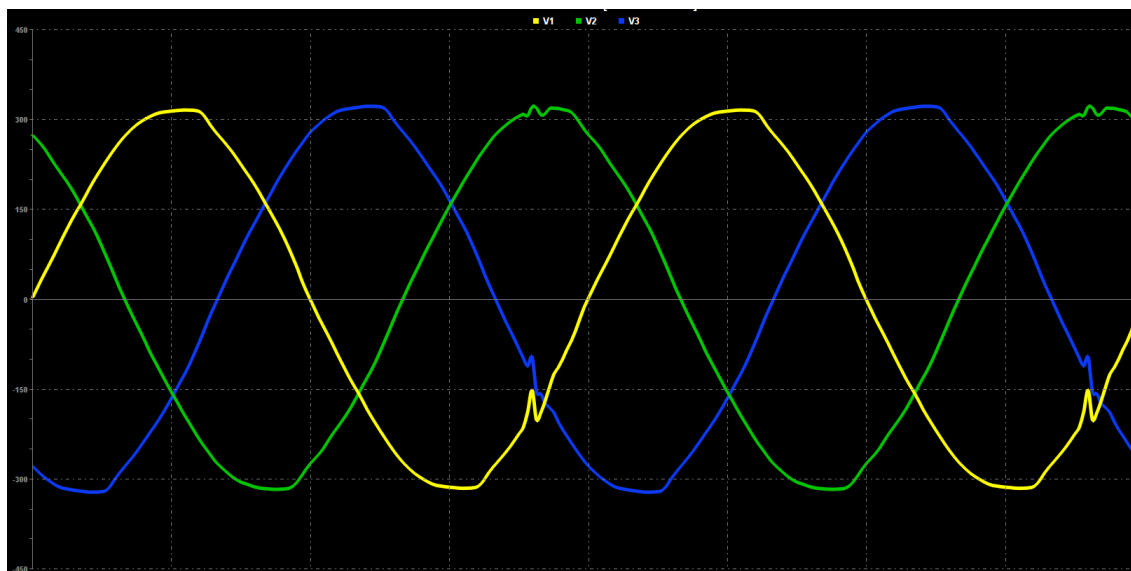


Fig. 49. Ona de tensió: Vibració.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

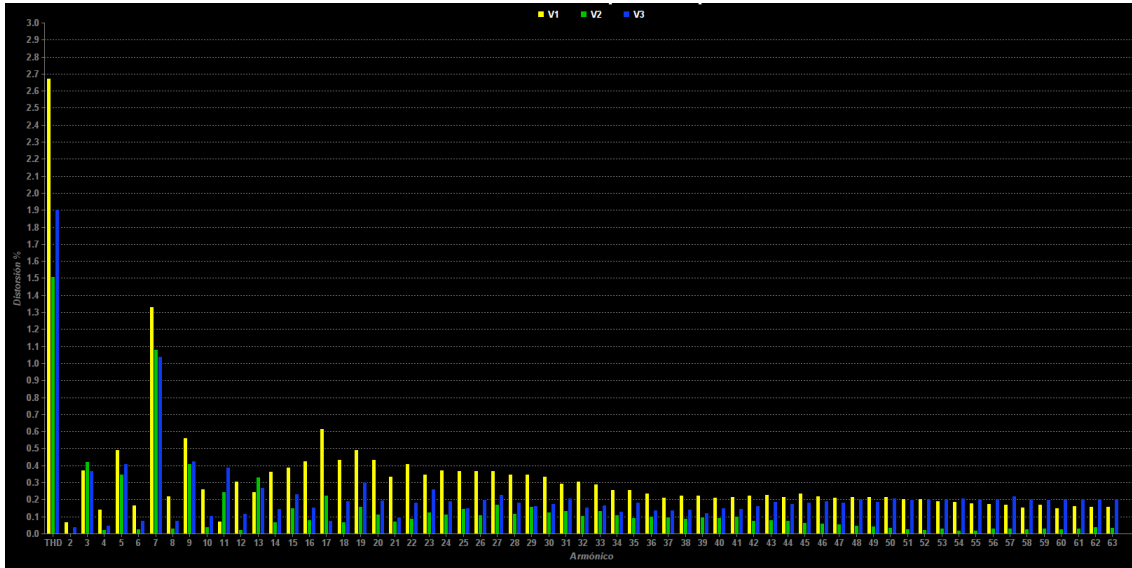


Fig. 50. Espectre harmònic de tensió: Vibració.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

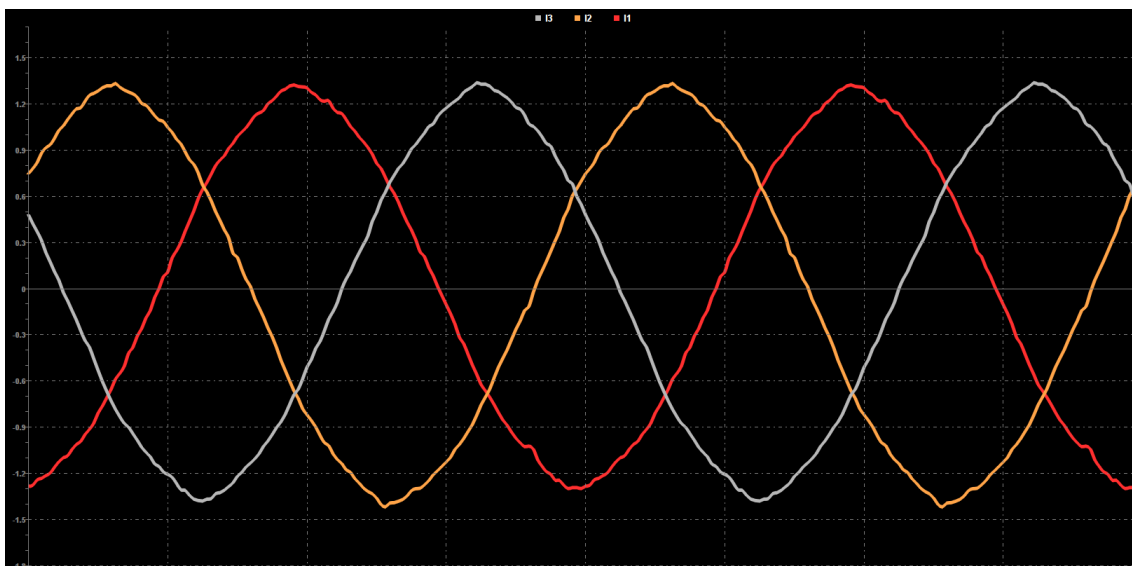


Fig. 51. Ona d'intensitat: Vibració.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

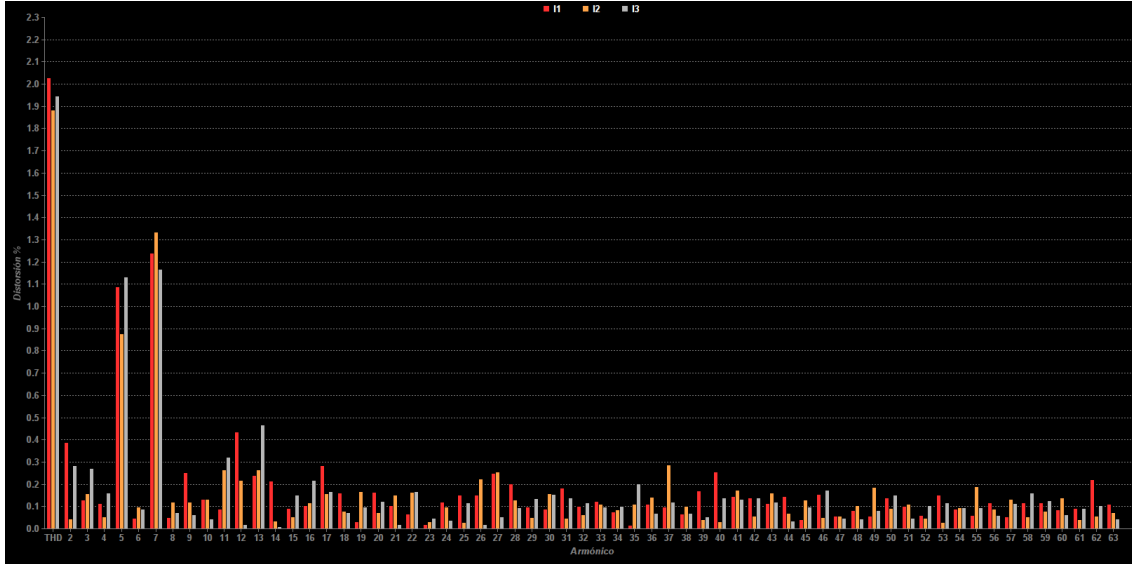


Fig. 52. Espectre harmònic d'intensitat: Vibració.

La tensió té un valor eficaç de 225 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 7 i 17 accentuats.

La intensitat té un valor eficaç de 0,9 A aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,46 mA, per tant és negligible.

10.2.3. Tall d'alimentació

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor quan apareix un tall de subministrament elèctric i s'han obtingut 3 captures en 3 instants diferents:

- IV. 0,5 segons després del tall d'alimentació
- V. 1,0 segons després del tall d'alimentació
- VI. 1,5 segons després del tall d'alimentació

Amb la intenció que es pugui apreciar l'evolució de l'aturada del motor.

- I. L'amplitud és de 5,5 V. La intensitat és negligible (20 mA aprox.)

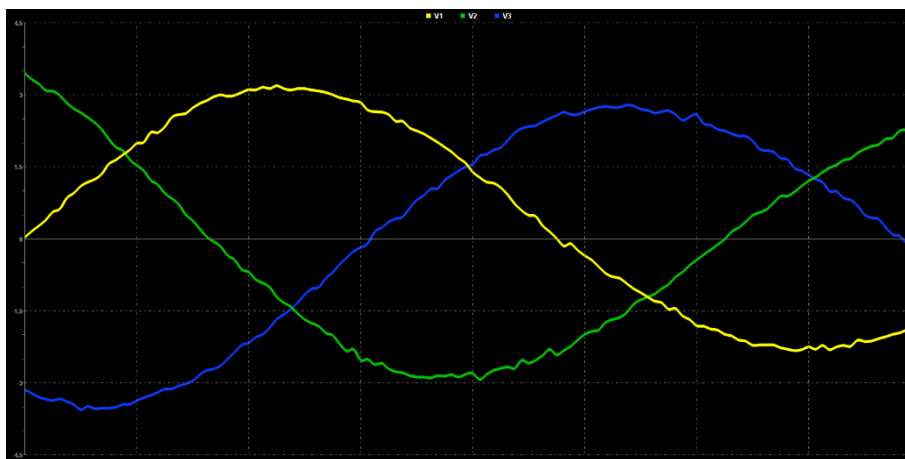


Fig. 53. Ona de tensió: Tall d'alimentació I.

- III. L'amplitud és de 1,2 V. La intensitat és negligible (20 mA aprox.)

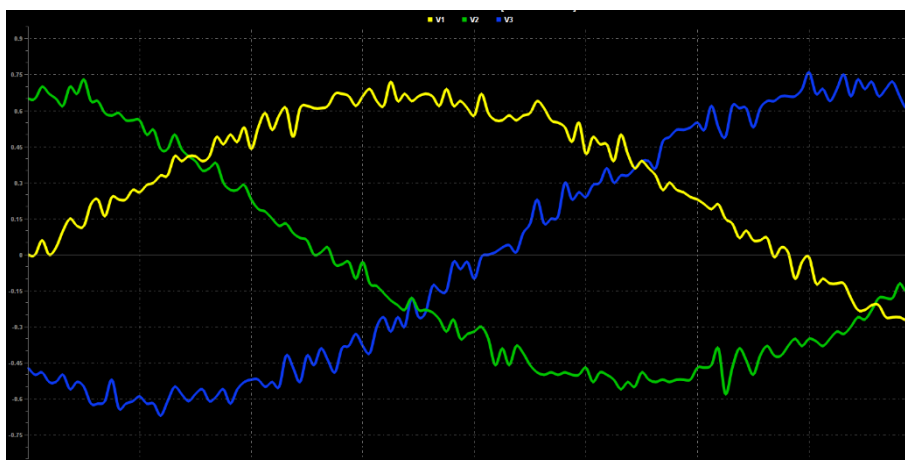


Fig. 54. Ona de tensió: Tall d'alimentació III.

I. 0.5 segons després del tall d'alimentació

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	2,06V	1,95V	2,23V	0,01A	0,03A	0,02A	2,46mA
PICO (PK)	2,76V	3,19V	3,17V	0,03A	0,03A	0,03A	1,35mA
THD (%)	19,01%	16,33%	27,81%	103,97%	97,89%	95,06%	722,11%

Taula 3. Valors: Tall d'alimentació I.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

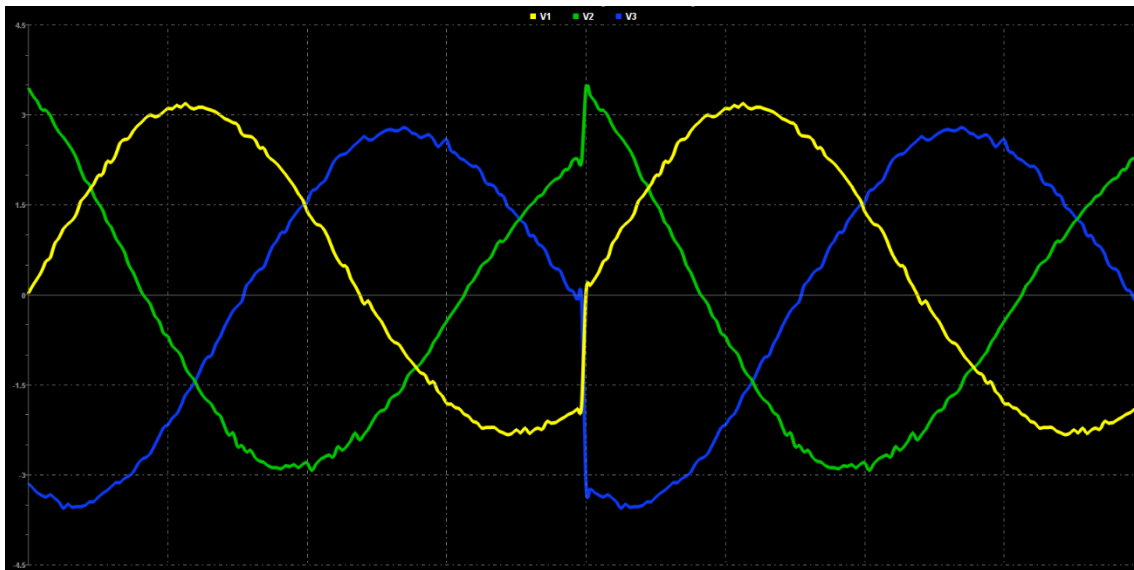


Fig. 55. Ona de tensió: Tall d'alimentació I.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

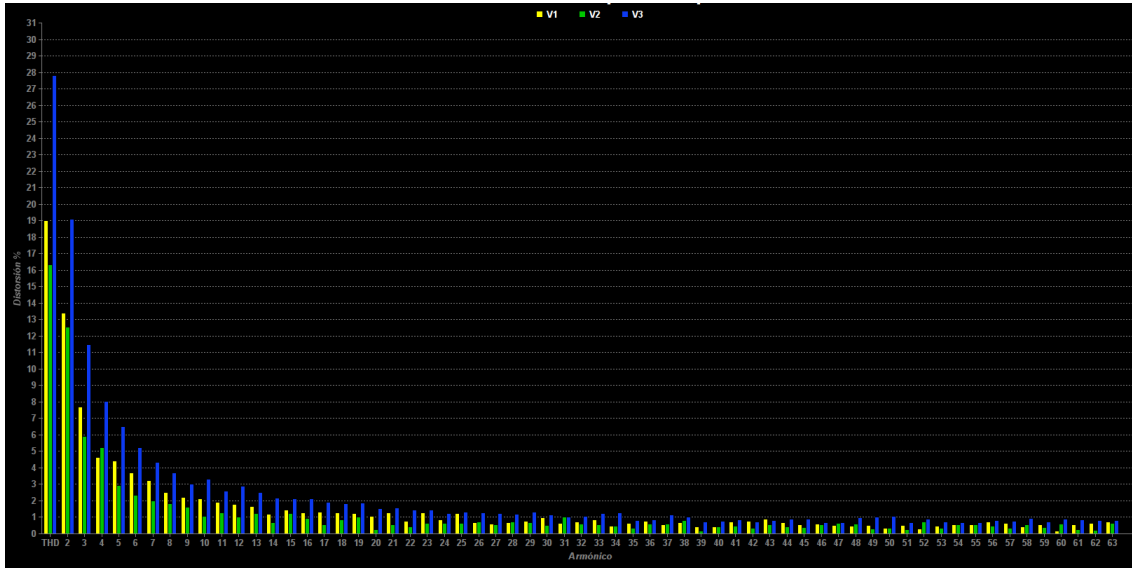


Fig. 56. Espectre harmònic: Tall d'alimentació I.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

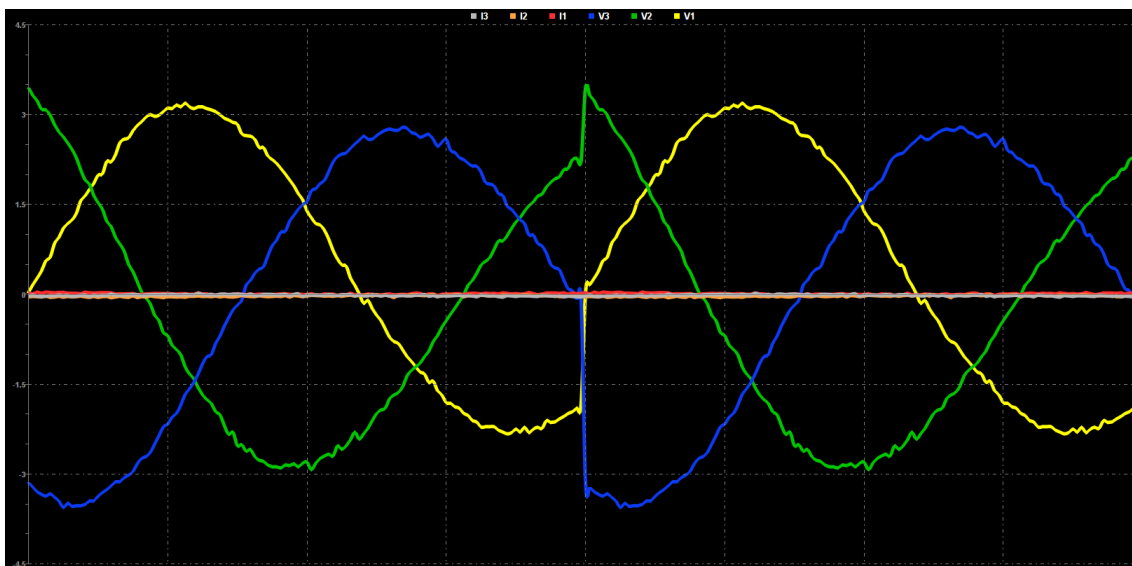


Fig. 57. Ona d'intensitat: Tall d'alimentació I.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

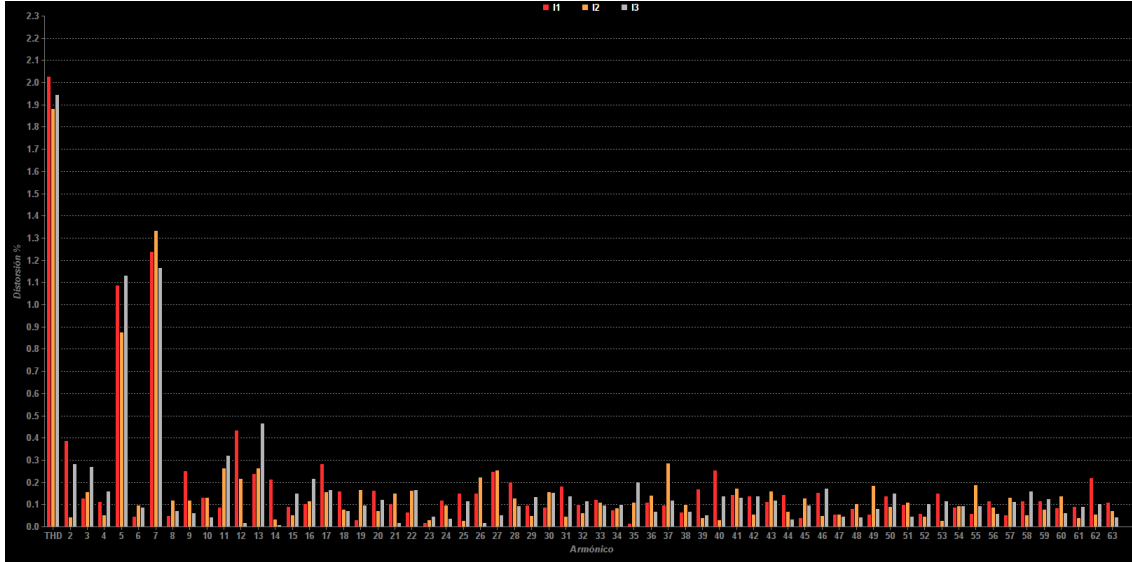


Fig. 58. Espectre harmònic d'intensitat: Tall d'alimentació I.

La tensió té un valor eficaç de 2 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta una disminució estable d'amplitud en funció a l'ordre de l'harmònic .

La intensitat té un valor eficaç de 0,01 A, per tant és negligible.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,46 mA, per tant és negligible.

II. 1.0 segons després del tall d'alimentació

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	0,53V	0,48V	0,59V	0,01A	0,04A	0,02A	2,45mA
PICO (PK)	0,81V	0,83V	0,85V	0,02A	0,03A	0,02A	1,30mA
THD (%)	28,51%	19,36%	34,51%	219,40%	205,96%	216,38%	1939,68%

Taula 4. Valors: Tall d'alimentació II.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

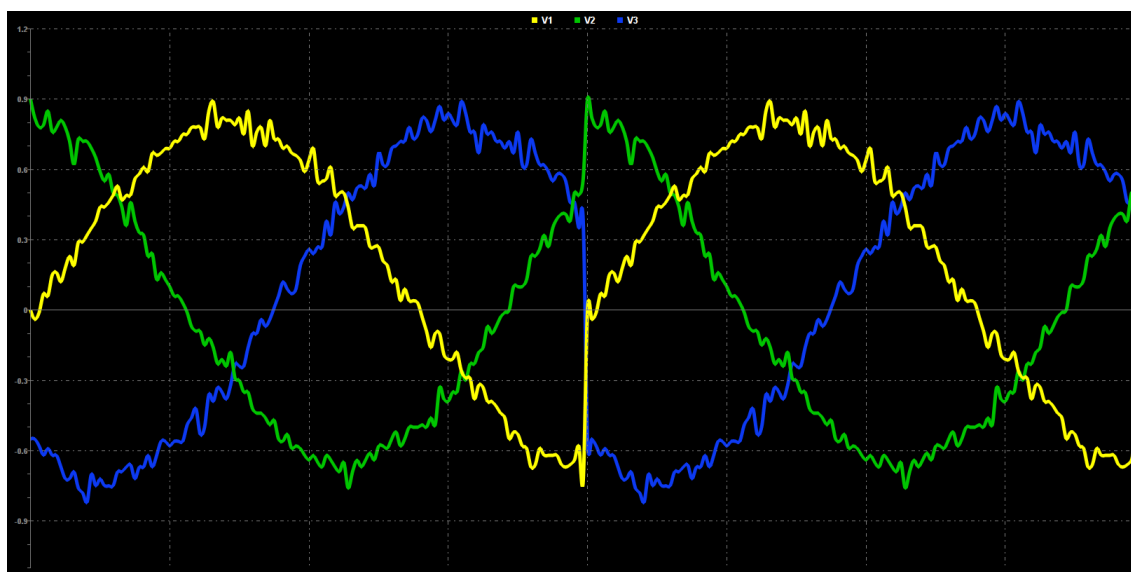


Fig. 59. Ona de tensió: Tall d'alimentació II.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

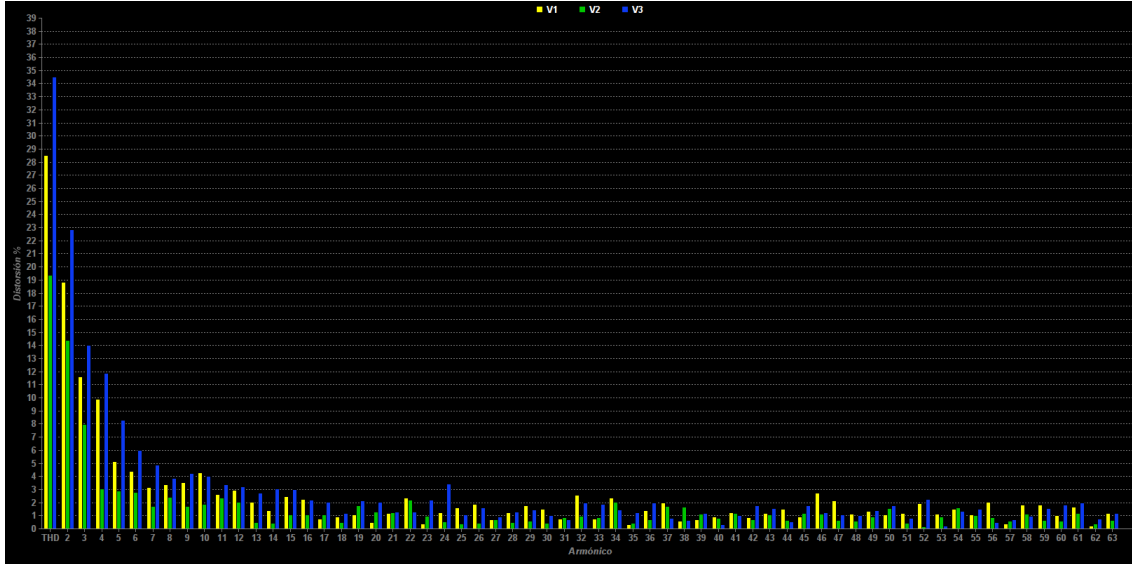


Fig. 60. Espectre harmònic: Tall d'alimentació II.

La tensió té un valor eficaç de 0,5 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta una disminució estable d'amplitud en funció a l'ordre de l'harmònic .

La intensitat té un valor eficaç de 0,01 A aproximadament, per tant és negligible.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,45 mA, per tant és negligible.

III. 1.5 segons després del tall d'alimentació

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	0,43V	0,41V	0,50V	0,01A	0,04A	0,02A	2,44mA
PICO (PK)	0,50V	0,66V	0,72V	0,03A	0,03A	0,03A	1,30mA
THD (%)	28,60%	44,96%	50,67%	238,47%	406,33%	305,00%	1328,08%

Taula 5. Valors: Tall d'alimentació III.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

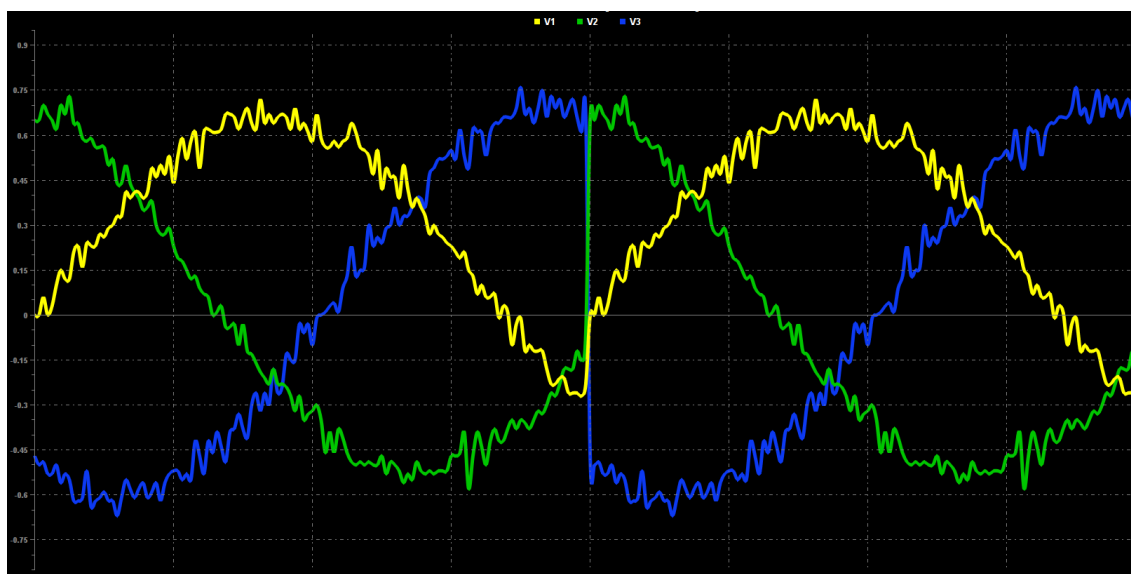


Fig. 61. Ona de tensió: Tall d'alimentació III.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

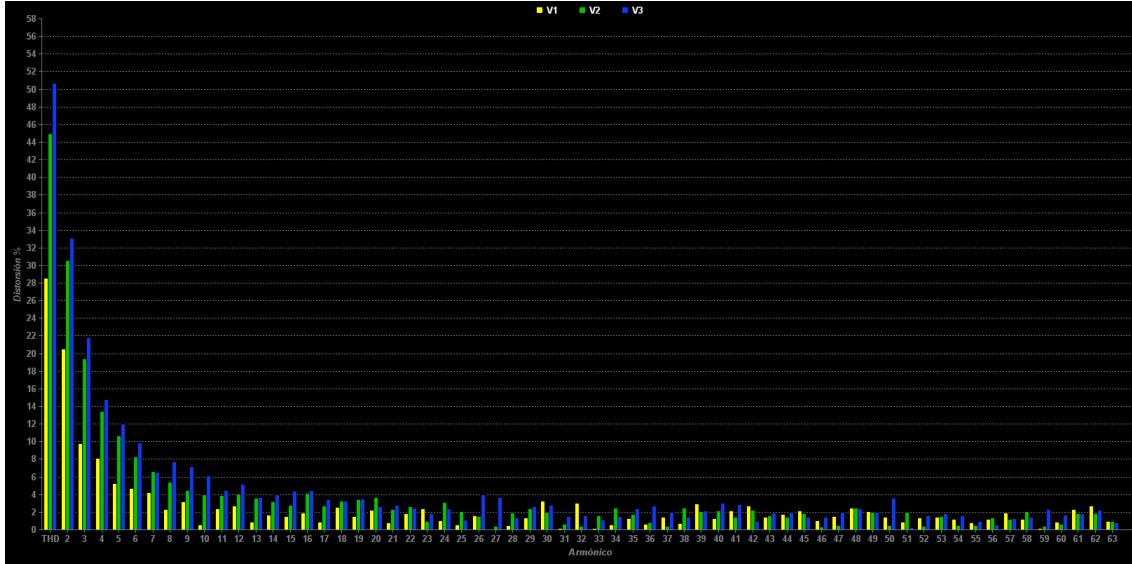


Fig. 62. Espectre harmònic: Tall d'alimentació III.

La tensió té un valor eficaç de 0,4 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta una disminució estable d'amplitud en funció a l'ordre de l'harmònic .

La intensitat té un valor eficaç de 0,01 A aproximadament, per tant és negligible.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,44 mA, per tant és negligible.

10.2.4. Re-alimentació d'energia

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor quan just després d'un tall d'alimentació, es recupera el subministrament d'energia.

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	226,12V	226,86V	229,44V	0,92A	0,95A	0,94A	2,45mA
PICO (PK)	318,22V	319,06V	323,39V	1,34A	1,38A	1,37A	1,35mA
THD (%)	1,37%	1,49%	1,49%	1,89%	1,89%	1,85%	459,30%

Taula 6. Valors: Re-alimentació d'energia.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

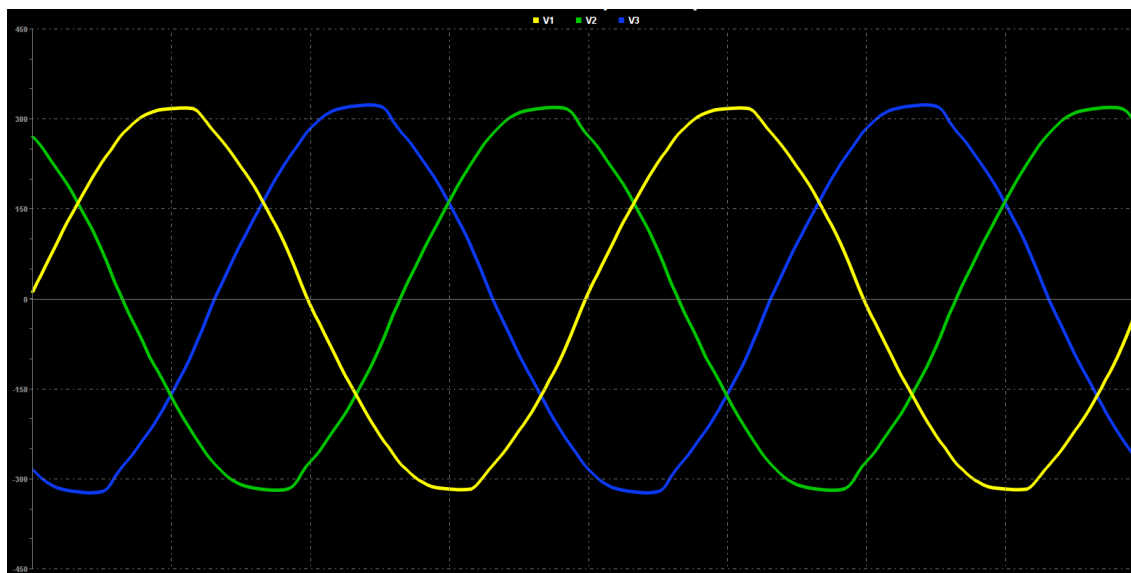


Fig. 63. Ona de tensió: Re-alimentació d'energia.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

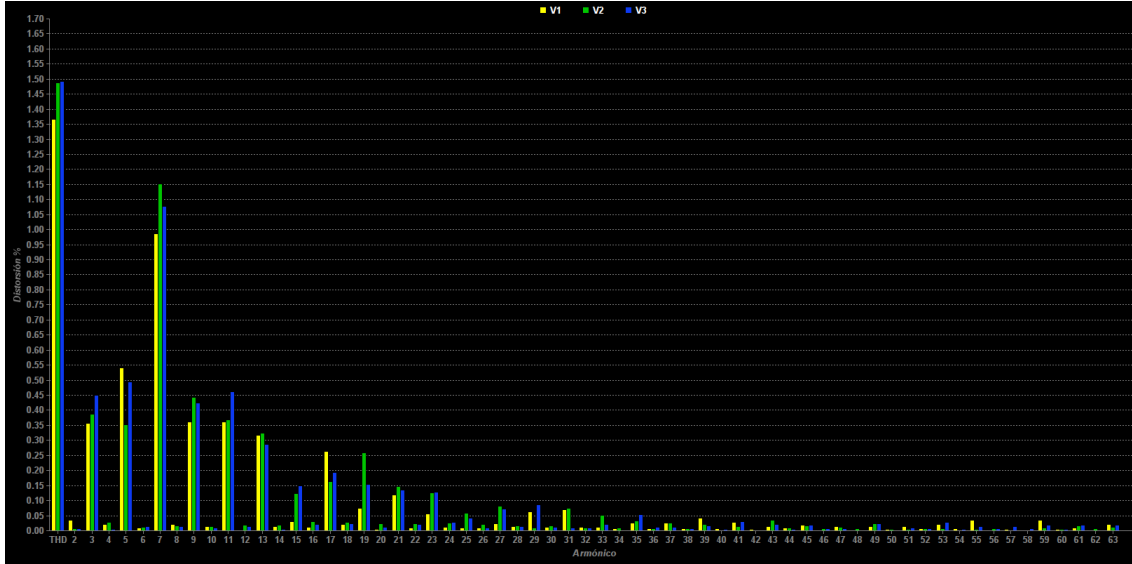


Fig. 64. Espectre harmònic de tensió: Re-alimentació d'energia.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

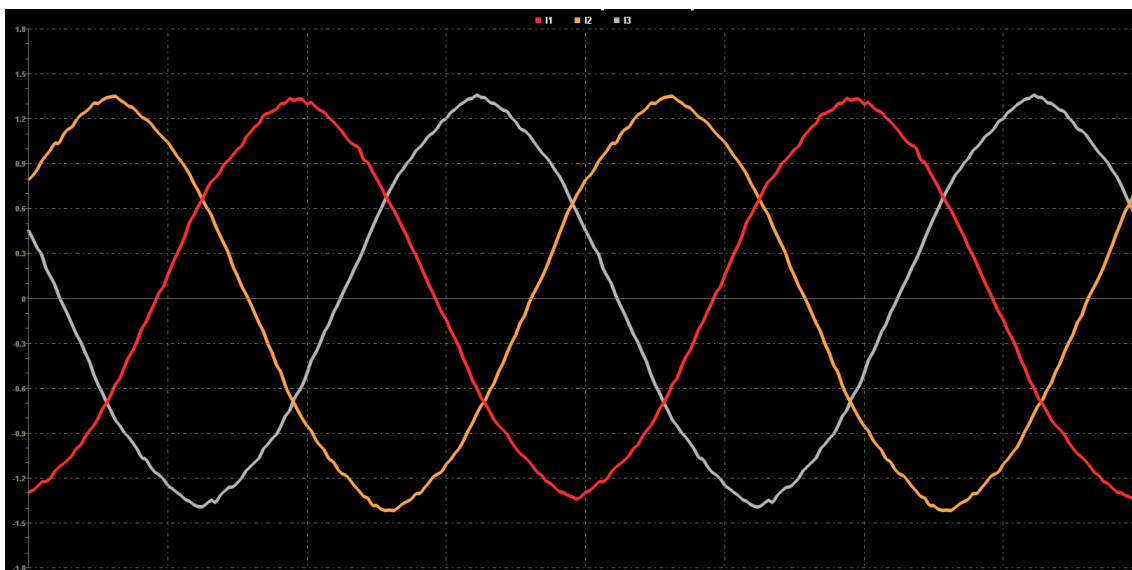


Fig. 65. Ona d'intensitat. Re-alimentació d'energia.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:



Fig. 66. Espectre harmònic d'intensitat: Re-alimentació d'energia.

La tensió té un valor eficaç de 226 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta l'harmònic d'ordre 7 accentuat .

La intensitat té un valor eficaç de 0,94 A aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,45 mA, per tant és negligible.

10.2.5. Infra-tensió d'alimentació

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor quan el subministrament elèctric és inferior al 10% de la tensió nominal i s'han obtingut 3 casos diferents:

- I. Tensió d'alimentació < 10 % tensió nominal (< 207 V)
- II. Tensió d'alimentació < 50 % tensió nominal (< 115 V)
- III. Tensió d'alimentació < 85 % tensió nominal (< 35 V)

Amb la intenció que es pugui apreciar l'evolució de la baixada de tensió.

- I. L'amplitud en tensió és de 570 V i en intensitat és de 2,4 A.

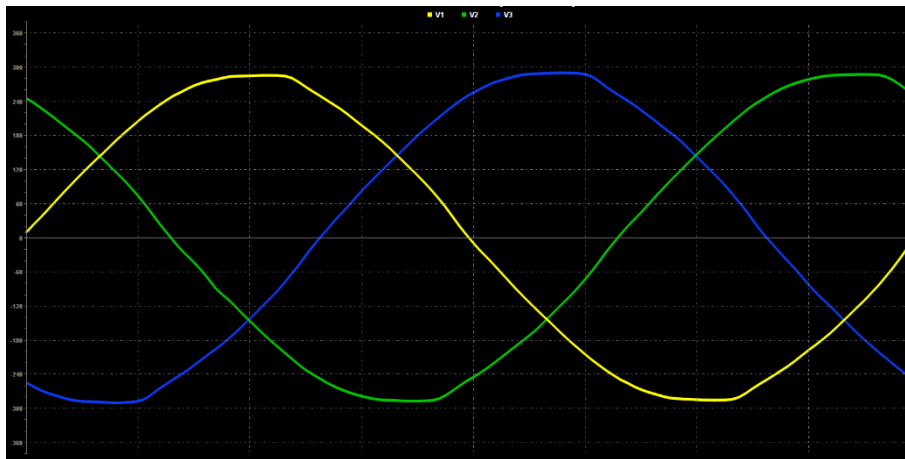


Fig. 67. Ona de tensió: Infra-tensió I.

- III. L'amplitud en tensió és de 40 V i en intensitat és de 0,6 A.

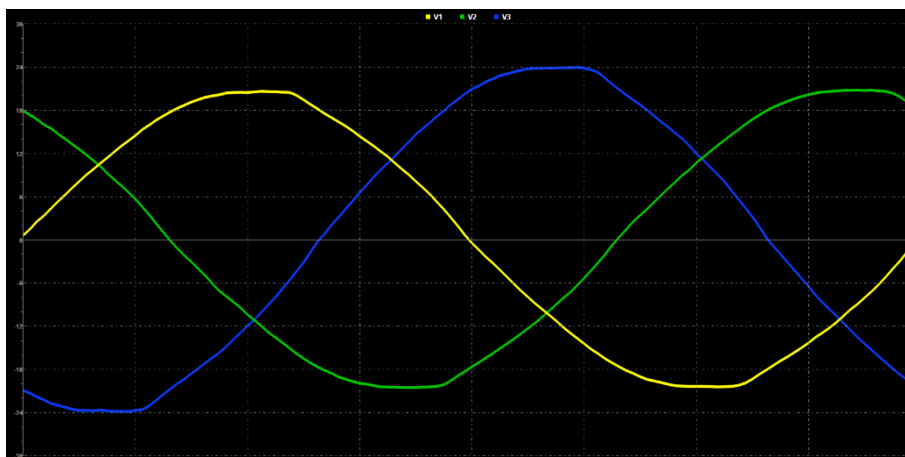


Fig. 68. Ona de tensió: Infra-tensió III.

I. Tensió d'alimentació < 10 % tensió nominal (< 207 V)

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	203,16V	204,06V	205,97V	0,79A	0,83A	0,81A	2,44mA
PICO (PK)	285,52V	287,25V	290,26V	1,16A	1,20A	1,18A	1,35mA
THD (%)	1,26%	1,25%	1,26%	1,88%	1,81%	1,76%	435,43%

Taula 7. Valors: Infra-tensió I.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

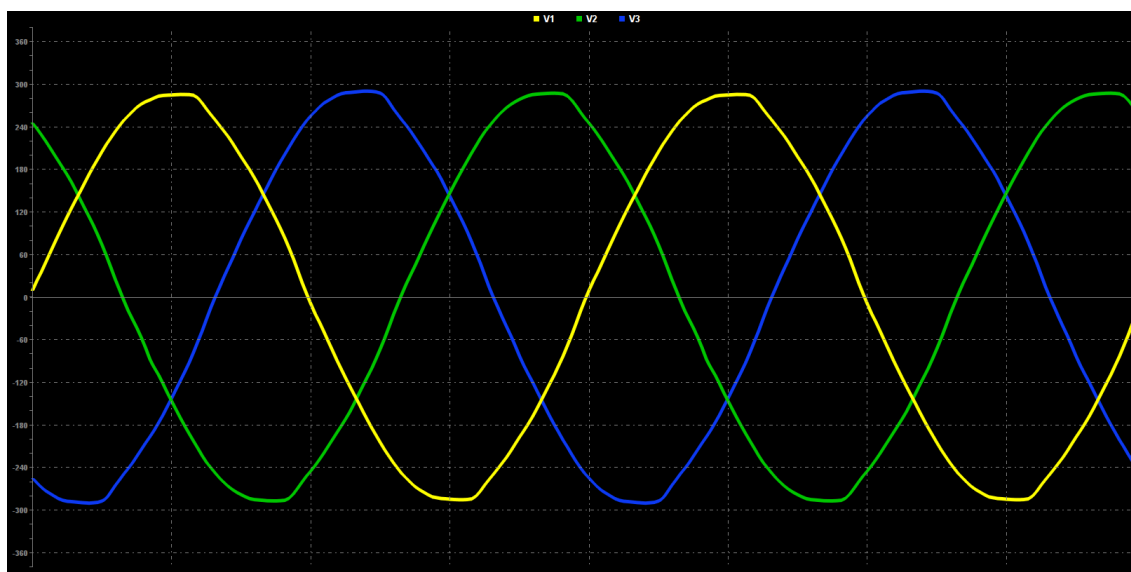


Fig. 69. Ona de tensió: Infra-tensió I.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

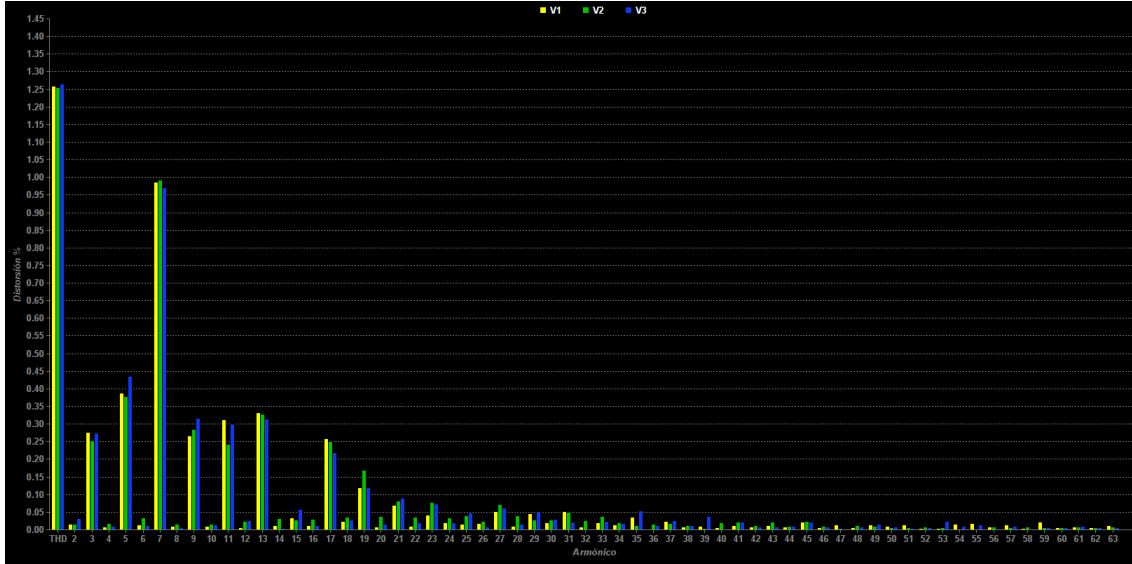


Fig. 70. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió I.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

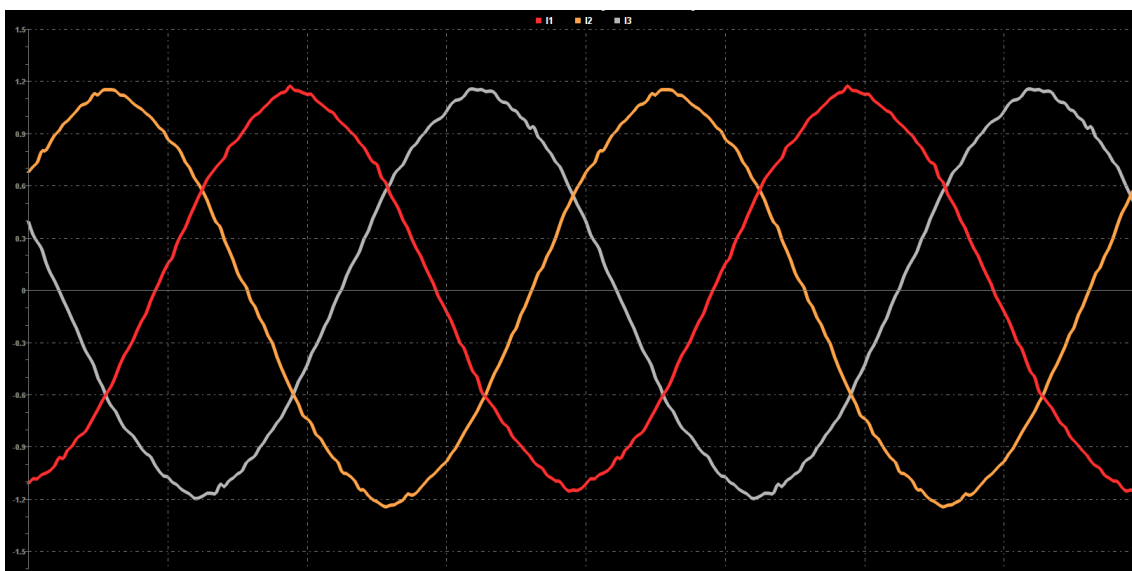


Fig. 71. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió I.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

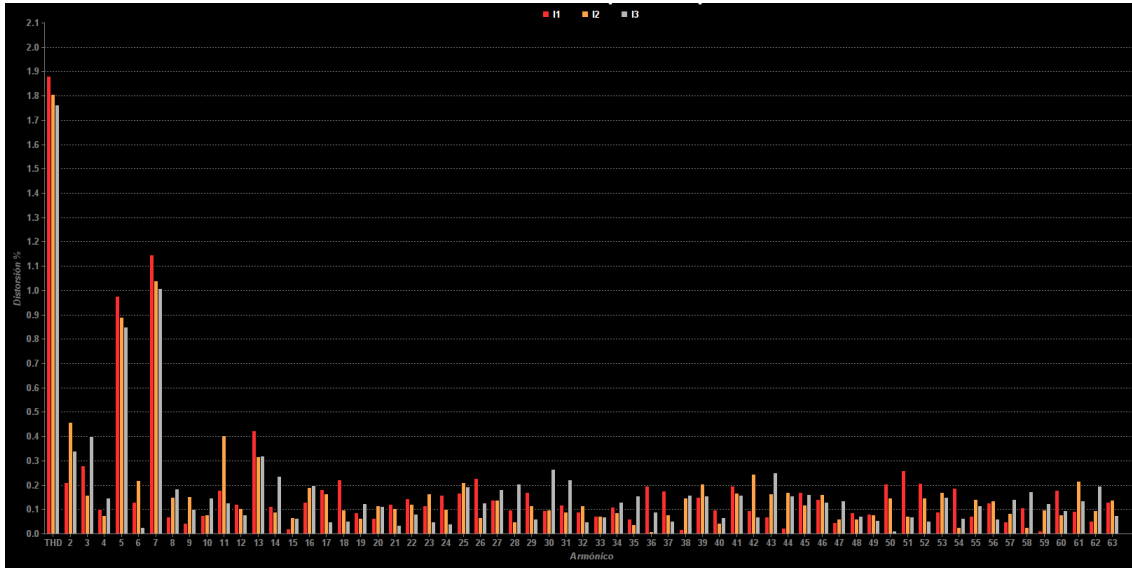


Fig. 72. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió I.

La tensió té un valor eficaç de 204 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta l'harmònic d'ordre 7 accentuat .

La intensitat té un valor eficaç de 0,8 A aproximadament i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,44 mA, per tant és negligible.

II. Tensió d'alimentació < 50 % tensió nominal (< 115 V)

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	100,99V	99,48V	103,31V	0,36A	0,36A	0,39A	2,44mA
PICO (PK)	141,97V	140,13V	145,63V	0,54A	0,53A	0,57A	1,35mA
THD (%)	1,37%	1,38%	1,40%	3,07%	3,07%	2,85%	277,02%

Taula 8. Valors: Infra-tensió II.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

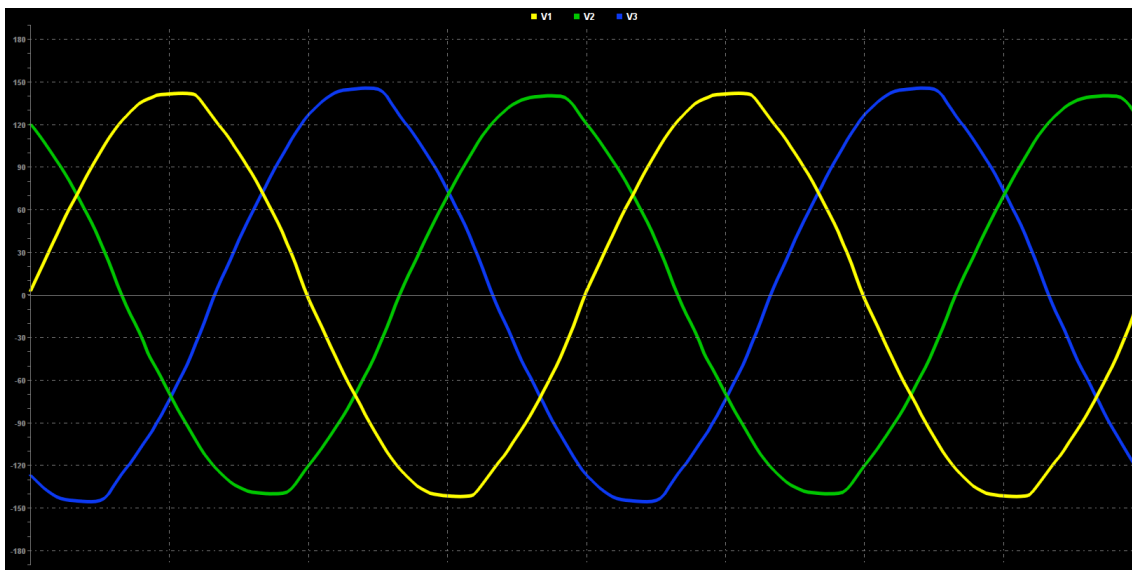


Fig. 73. Ona de tensió: Infra-tensió II.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

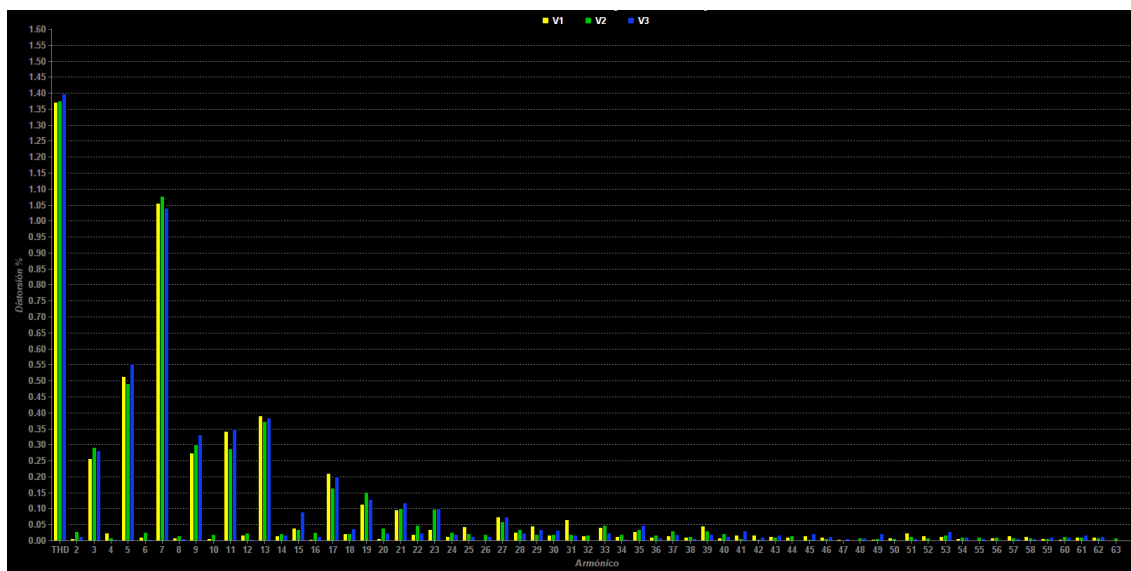
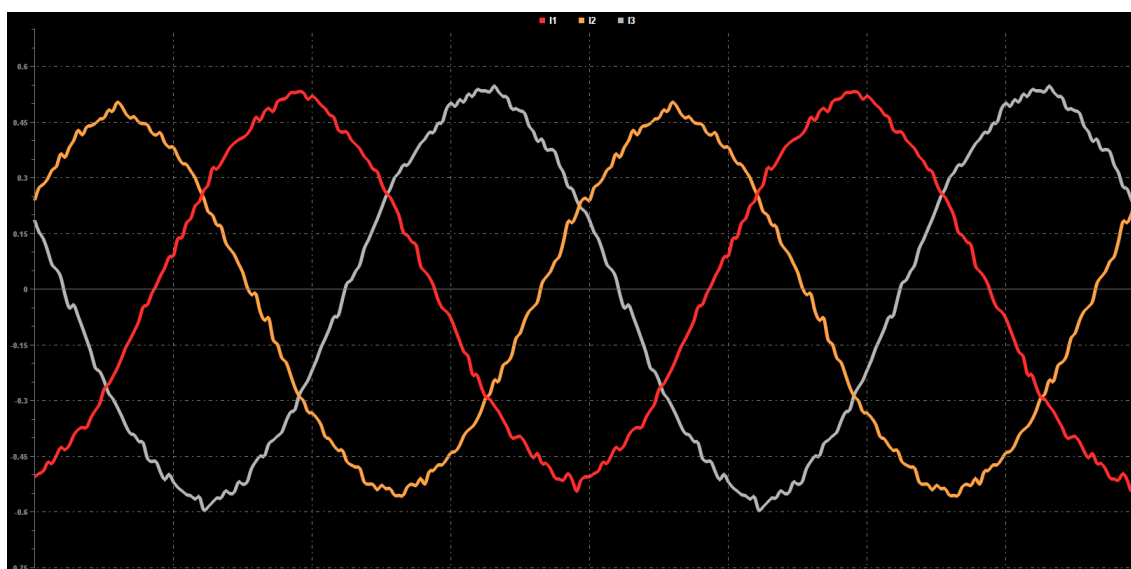


Fig. 74. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió II.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:



A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

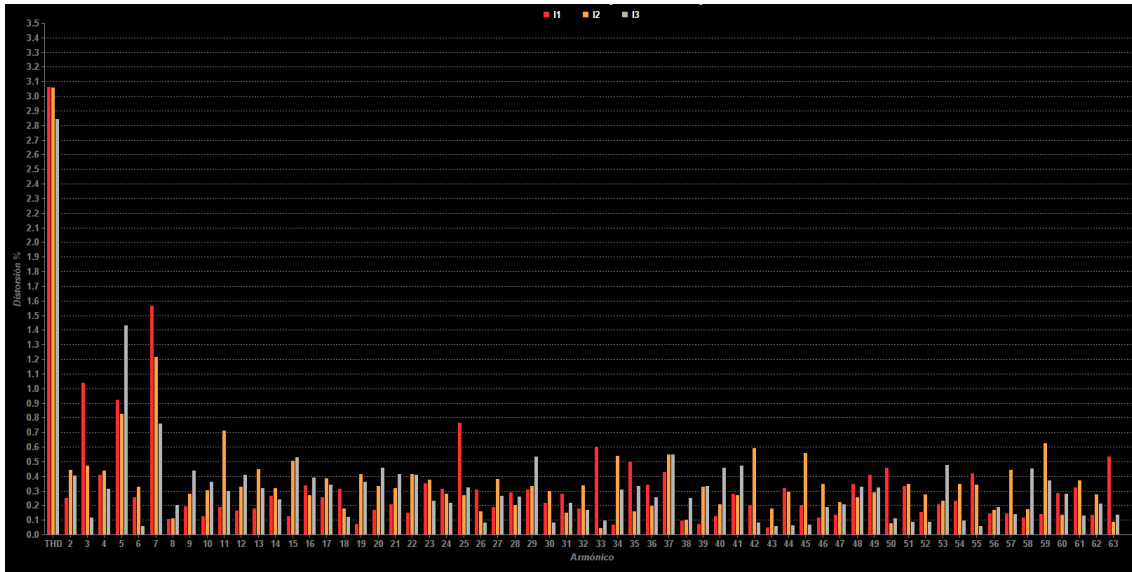


Fig. 75. Espectre harmònic d'intensitat: Infra-tensió II.

La tensió té un valor eficaç de 100 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta l'harmònic d'ordre 7 accentuat .

La intensitat té un valor eficaç de 0,3 A aproximadament, quasi negligible, i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 5 i 7 accentuats.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,44 mA, per tant és negligible.

III. Tensió d'alimentació < 85 % tensió nominal (< 35 V)

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	14,59V	14,71V	16,98V	0,19A	0,19A	0,21A	2,41mA
PICO (PK)	20,52V	20,66V	23,90V	0,28A	0,28A	0,30A	1,35mA
THD (%)	1,51%	1,51%	1,54%	3,76%	4,37%	3,78%	377,30%

Taula 9. Valors: Infra-tensió III.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

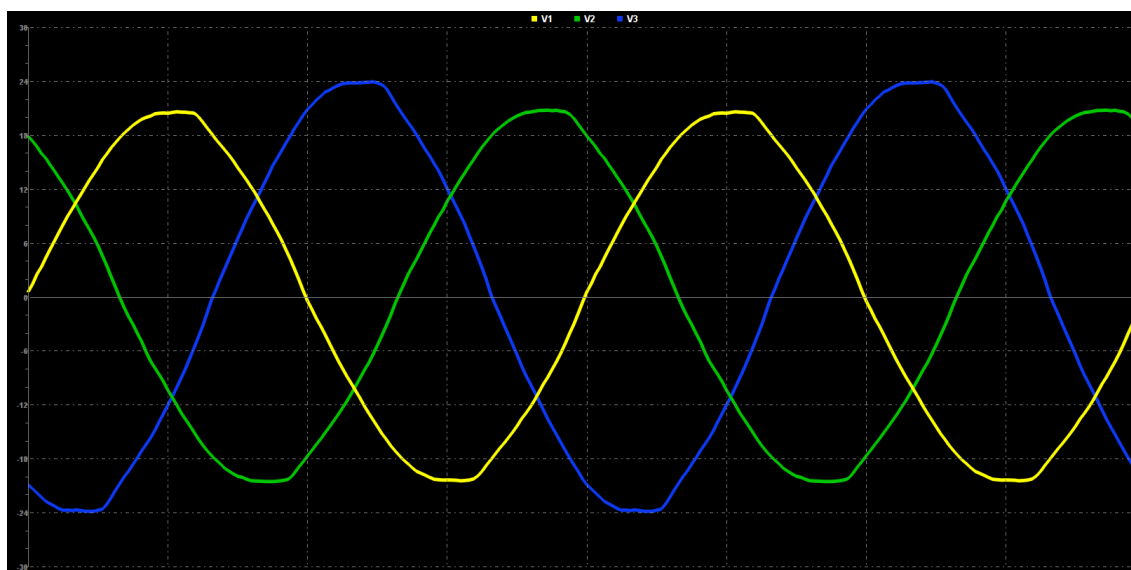


Fig. 76. Ona de tensió: Infra-tensió III.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

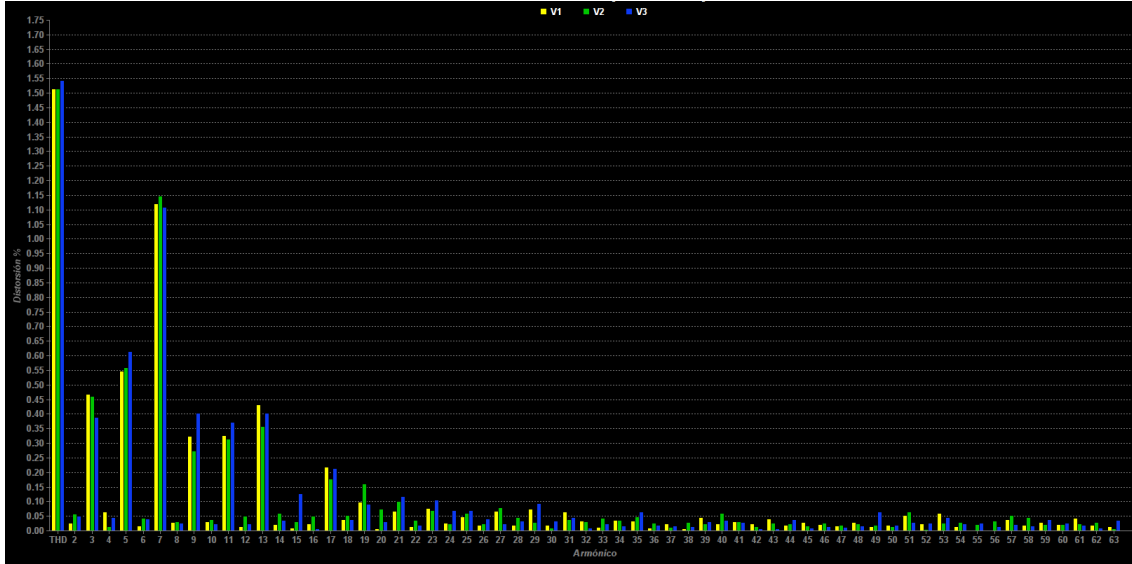


Fig. 77. Espectre harmònic de tensió: Infra-tensió III.

La tensió té un valor eficaç de 15 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta l'harmònic d'ordre 7 accentuat .

La intensitat té un valor eficaç de 0,19 A aproximadament, per tant és negligible.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,41 mA, per tant és negligible.

10.2.6. Sobre-càrrega

En aquest apartat s'ha registrat el comportament del motor quan l'eix està sotmès a una resistència de rotació i per tant, el sistema està sobrecarregat.

A continuació, s'adjunta una taula de valors, amb les mesures de RMS, pic (PK) i distorsió harmònica total (THD) respecte les 3 fases de tensió (V1, V2 i V3), intensitat (I1, I2 i I3) i la intensitat diferencial (ID):

Mediciones	V1	V2	V3	I1	I2	I3	ID
RMS	221,05V	221,92V	224,37V	0,88A	0,92A	0,92A	2,47mA
PICO (PK)	311,13V	312,76V	316,60V	1,31A	1,34A	1,34A	1,35mA
THD (%)	1,38%	1,36%	1,44%	2,57%	2,27%	2,78%	848,85%

Taula 10. Valors: Sobre-càrrega.

- Tensió

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les tensions a les 3 fases:

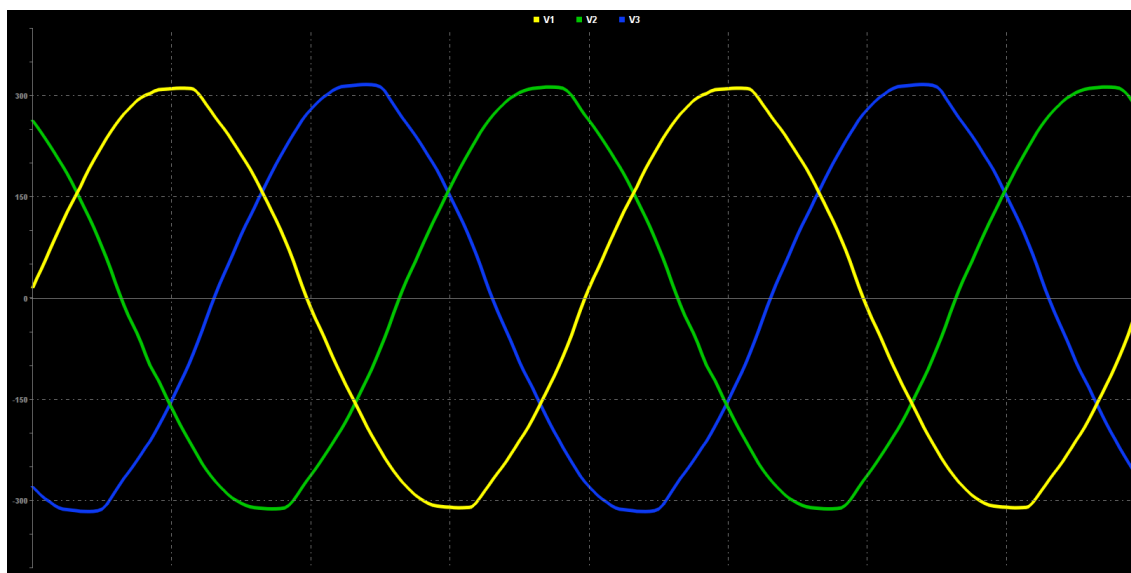


Fig. 78. Ona de tensió: Sobre-càrrega.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les tensions a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

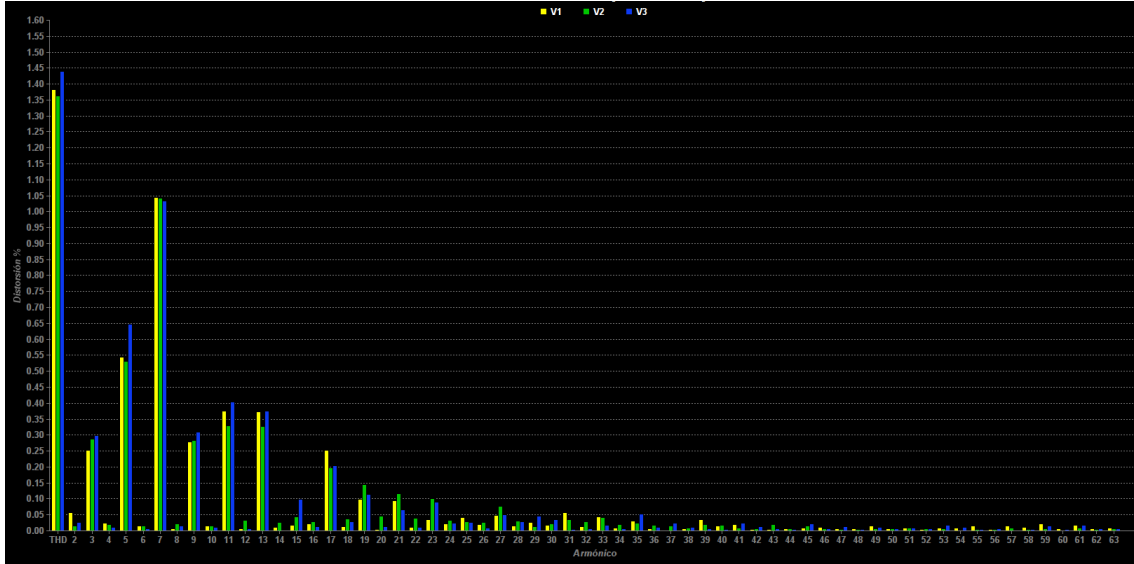


Fig. 79. Espectre harmònic de tensió: Sobre-càrrega.

- Intensitat

A continuació, s'adjunta una captura de la forma d'ona de les intensitats a les 3 fases:

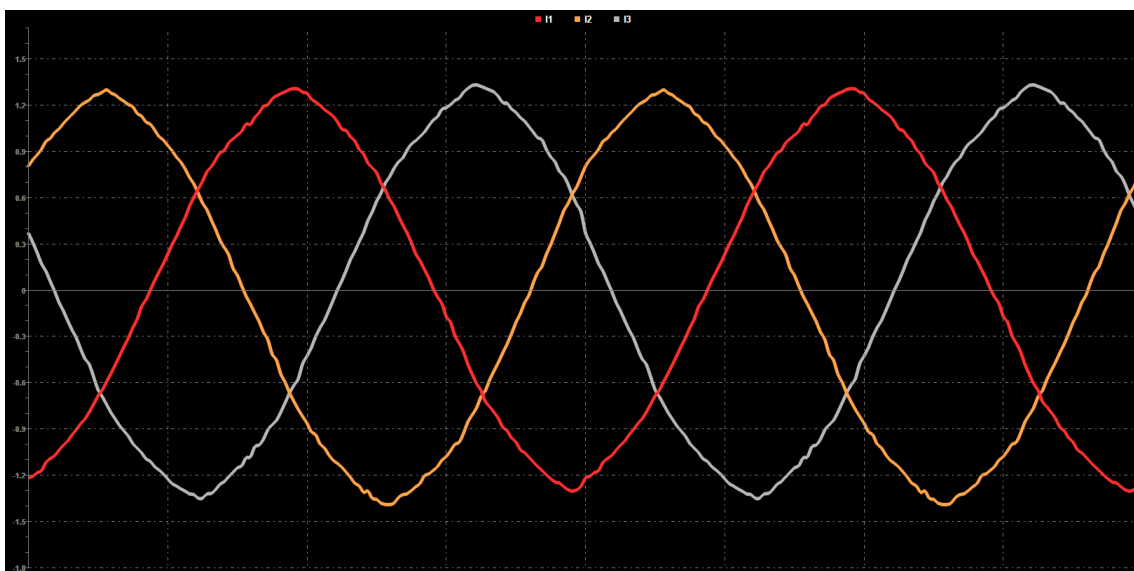


Fig. 80. Ona d'intensitat: Sobre-càrrega.

A continuació, s'adjunta una captura de l'espectre harmònic de les intensitats a les 3 fases, amb l'harmònic fonamental filtrat:

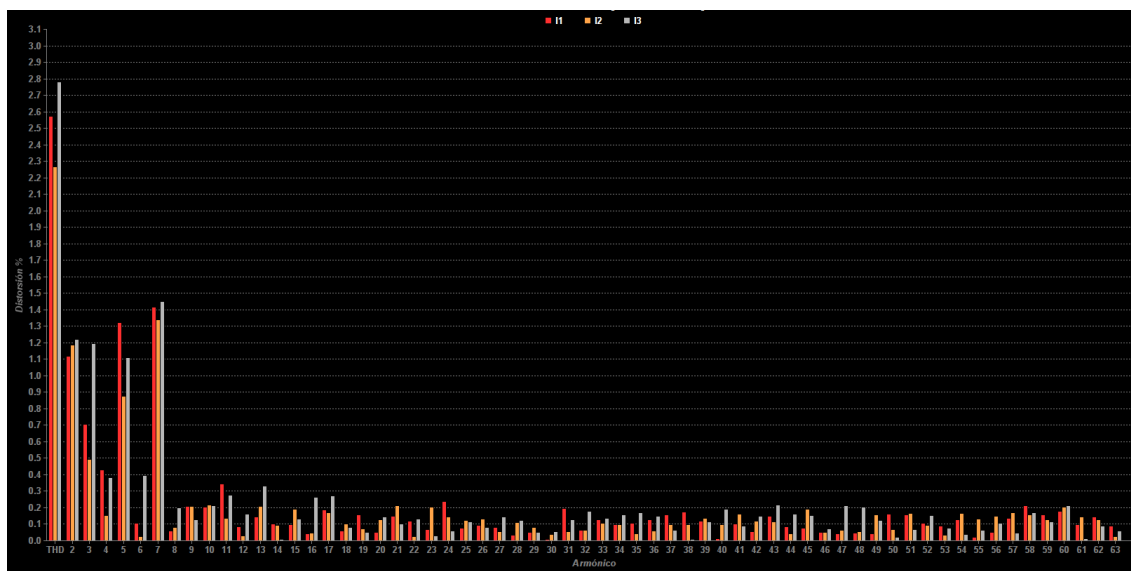


Fig. 81. Espectre harmònic d'intensitat: Sobre-càrrega.

La tensió té un valor eficaç de 220 V aproximadament i el seu espectre harmònic presenta l'harmònic d'ordre 7 accentuat.

La intensitat té un valor eficaç de 0,9 A aproximadament, i el seu espectre harmònic presenta els harmònics d'ordre 2, 3, 4, 5 i 7 accentuats.

- Intensitat diferencial

La intensitat diferencial té un valor eficaç de 2,47 mA, per tant és negligible.

11. Resultats i conclusions

Els resultats obtinguts mostren diferents patrons tot i que tots mantenen una forta semblança.

És interessant que s'hagi apreciat com s'accentuen principalment els harmònics d'ordre 5 i 7, ja que aquests estan relacionats amb l'electricitat trifàsica i amb pertorbacions de vibracions. [6]

Malgrat això, és una llàstima que es no es poguessin registrar correctament el comportament inicial del motor, ja que al aparèixer moltes més pertorbacions, s'hagués vist mostrat amb més rellevància al comportament elèctric i la comparació entre els dos casos hagués sigut més interessant.

12. Bibliografia

- [1] The Factory of the Future. Industry 4.0 – The Challenges of tomorrow.
KPMG

- [2] Condition Monitoring and Faults Diagnosis of Induction Motors.
Nordin Saad, Muhammad Irfan, Rosdiazli Ibrahim

- [3] Fault Diagnosis of Induction Motors.
Jawad Faiz, Vahid Ghorbanian, Gojko Joksimovic

- [4] Importancia del mantenimiento predictivo - MATLAB
<https://es.mathworks.com/discovery/predictive-maintenance-matlab.html>

- [5] Qué es el mantenimiento predictivo – SIGMA Industrial Precision
<https://www.predictive-sigma.com/que-es-el-mantenimiento-predictivo/>

- [6] **ÁNGEL SAPENA BAÑÓ - DESARROLLO DE TÉCNICAS AVANZADAS DE DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS VÁLIDAS PARA CUALQUIER RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO**

