



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

**SUPERVISIÓ I DIAGNOSI DE FALLADES DE MOTORS TIPUS
“BRUSHLESS”**



Memòria i Annexos

Autor: Raúl Zaragoza Sacristán
Director: Joaquim Blesa Izquierdo
Convocatòria: Juny 2020

Resum

Els sistemes de supervisió i diagnosi de fallades suposen una alternativa eficient i robusta a l'actual metodologia del tractament de fallades en sistemes automàtics a la indústria, la qual està basada majoritàriament en la redundància de sensors i en la detecció de valors límit en determinades variables. Aquests sistemes tenen com a principal objectiu detectar, o alertar de l'existència d'alguna anomalia en el funcionament del sistema; i aïllar, o localitzar el component que conté el defecte. En aquest treball s'ha desenvolupat un algorisme que permet la implementació de la diagnosi de fallades, en un computador, d'un motor de tipus *Brushless* que treballa dins d'un sistema de control de posició/velocitat. L'algorisme proposat està basat en un model matemàtic simplificat del motor *Brushless* i és capaç de detectar i aïllar de manera eficient i robusta un ampli ventall de fallades, tant elèctriques com mecàniques, sense la necessitat d'afegir costos en instrumentació addicional als sensors ja existents pel control.

En la metodologia d'aquest treball es presenta com arribar a un model simplificat del motor *Brushless* que permet generar residus matemàtics sobre els que es basa la diagnosi de fallades. El sistema de diagnosi proposat està dividit en dues etapes: detecció i aïllament de fallada. La detecció de fallada consisteix en determinar si el valor d'algun dels residus és inconsistent amb l'error del model. L'aïllament consisteix en examinar els residus inconsistents de manera binària o, si és necessari, amb un anàlisi de sensibilitats per determinar la fallada de l'element que ha produït les inconsistències detectades.

Per tal de comprovar l'eficiència de l'algorisme de diagnosi de fallades proposat en el treball, s'ha desenvolupat un simulador de la planta objecte d'estudi amb el *software* MATLAB® on també s'ha implementat l'algorisme. Aquest *software* ha permès simular escenaris realistes de fallades i avaluar el rendiment del sistema de diagnosi proposat.

Resumen

Los sistemas de supervisión y diagnóstico de fallos suponen una alternativa eficiente y robusta a la actual metodología de tratamiento de fallos en sistemas automáticos en la industria, la cual está basada principalmente en la redundancia de sensores y en la detección de valores límite en determinadas variables. Estos sistemas tienen como principal objetivo detectar, o alertar de la existencia de alguna anomalía en el funcionamiento del sistema; y aislar, o localizar el componente que contiene el defecto. En este trabajo se ha desarrollado un algoritmo que permite la implementación de la diagnosis de fallos, en un computador, de un motor de tipo *Brushless* que trabaja dentro de un sistema de control de posición/velocidad. El algoritmo propuesto está basado en un modelo matemático simplificado del motor *Brushless* y es capaz de detectar y aislar de manera eficiente y robusta un amplio abanico de fallos, ya sean eléctricos como mecánicos, sin la necesidad de añadir costes en instrumentación adicional a los sensores ya existentes para el control.

En la metodología de este trabajo se presenta como llegar a un modelo simplificado del motor *Brushless* que permite generar residuos matemáticos sobre los que se basa la diagnosis de fallos. El sistema de diagnosis propuesto está dividido en dos etapas: detección y aislamiento de fallos. La detección de fallos consiste en determinar si el valor de alguno de los residuos es inconsistente con el error del modelo. El aislamiento consiste en examinar los residuos inconsistentes de manera binaria o, si es necesario, con un análisis de sensibilidades para determinar el fallo del elemento que ha producido las inconsistencias detectadas.

Con la intención de comprobar la eficiencia del algoritmo de diagnosis de fallos propuesto en el trabajo, se ha desarrollado un simulador de la planta objeto estudio con el *software* MATLAB® dónde también se ha implementado el algoritmo. Este *software* ha permitido simular escenarios realistas de fallos y evaluar el rendimiento del sistema de diagnosis propuesto.

Abstract

Fault diagnosis and monitoring systems represent an efficient and robust alternative to the current fault handling methodology in automatic systems in the industry, which is based mainly on the redundancy of sensors and the detection of limit values in certain variables. These systems have as their main objective to detect, or alert to the existence of any anomaly in the operation of the system; and isolate, or locate the component that contains the defect. In this work, an algorithm that allows the implementation of fault diagnosis, in a computer, of a Brushless motor that works within a position/velocity control system has been developed. The proposed algorithm is based on a simplified mathematical model of the Brushless motor and is capable of efficiently and robustly detecting and isolating a wide range of faults, both electrical and mechanical, without the need to add additional instrumentation costs to the existing sensors for control.

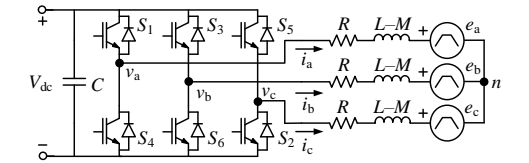
In the methodology of this work, it is presented how to arrive at a simplified model of the Brushless engine that allows the generation of mathematical residuals on which the fault diagnosis is based. The proposed diagnosis system is divided into two stages: fault detection and isolation. Fault detection consists of determining if the value of some residual is inconsistent with the model error. Isolation consists of examining the inconsistent residues in a binary way or, if necessary, with a sensitivity analysis to determine the fault of the element that has produced the detected inconsistencies.

With the intention of verifying the efficiency of the fault diagnosis algorithm proposed in the work, a simulator of the plant under study with the MATLAB® software has been developed, where the algorithm has also been implemented. This software has allowed the simulation of realistic fault scenarios and evaluating the performance of the proposed diagnosis system.

RESUM ESQUEMÀTIC

MODEL DE LA PLANTA

MODEL MOTOR BLDC

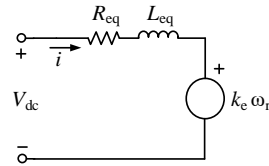


$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_1 \omega_r \quad ; \quad T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

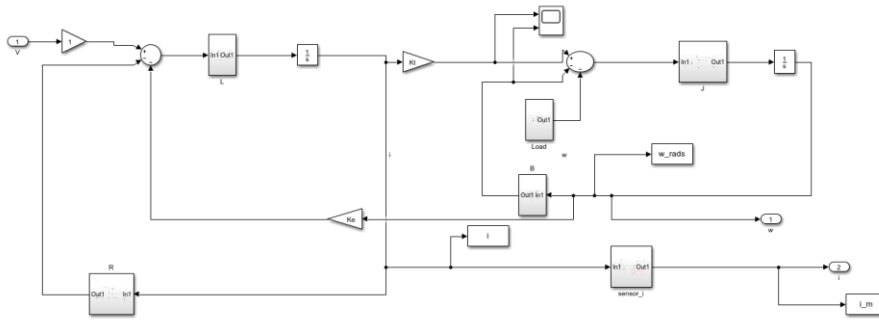
MODEL MOTOR DC EQUIVALENT



$$R_{eq} = 2R; \quad L_{eq} = 2(L-M); \quad k_e = 2p\lambda'_m; \quad T_e = 2p\lambda'_m i = k_T i$$

$$\left. \begin{aligned} V_{dc} &= R_{eq} i + L_{eq} \frac{di}{dt} + k_e \omega_r \\ k_T i - T_L &= B \omega_r(t) + J \frac{d\omega_r}{dt} \\ \omega_r &= \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \right\} ; \quad k_e = k_T = 2p\lambda'_m$$

SIMULADOR DE MOTOR DC EQUIVALENT A BLDC EN SIMULINK



SUPERVISIÓ I DIAGNOSI

RESIDUS DE LA PLANTA

$$\begin{aligned} r_1(k) &= i_m(k) - a_1^1 i(k-1) - b_1^1 \Omega_m(k-1) - c_1^1 v_{dcm}(k-1) \\ r_2 &= \Omega_m(k) - b_2^2 \Omega(k-1) - a_2^2 i_m(k-1) - d_2^2 t_{Lm}(k-1) \\ r_3 &= i_m(k) - a_3^3 i(k-1) - a_3^2 i(k-2) - c_3^3 v_{dcm}(k-1) - c_3^2 v_{dcm}(k-2) - d_3^3 t_{Lm}(k-2) \\ r_4 &= \Omega_m(k) - b_1^4 \Omega(k-1) - b_2^4 \Omega(k-2) - c_1^4 v_{dcm}(k-1) - d_1^4 t_{Lm}(k-1) - d_1^3 t_{Lm}(k-2) \end{aligned}$$

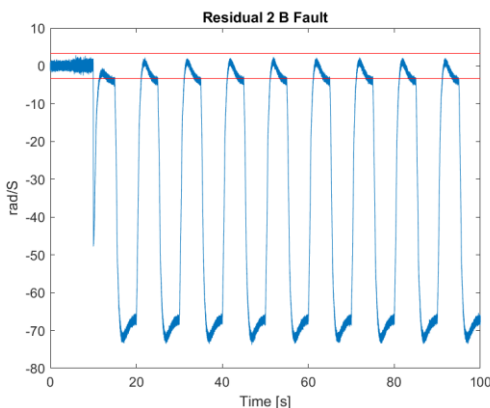
FALLADES CONSIDERADES

Paramètriques:

$$f_{R_{eq}}, f_{L_{eq}}, f_B, f_J$$

Entrades: $f_{V_{DC}}, f_{T_{Load}}$

DETECCIÓ



AÏLLAMENT

MATRIU DE SIGNATURA DE FALLADES (FSM)

$$\phi_i = \begin{cases} 0 & \text{si } |r_i| \leq \sigma_i \\ 1 & \text{si } |r_i| > \sigma_i \end{cases}$$

$$f_B \quad \phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3 \quad \phi_4$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

SENSIBILITAT DE FALLADA

	f_B	f_J	$f_{T_{Load}}$
r_2	$\omega(t)$	$\frac{d\omega}{dt}$	1

Agraïments

Primerament, aquest treball no seria el que és sense l'ajuda, la disposició i la direcció d'en Joaquim Blesa, qui durant tot aquest temps ha estat a una videotrucada per solucionar tota mena de dubtes, sempre amb empatia, paciència i simpatia. Moltes gràcies. També voldria agrair al departament CS2AC de la UPC per permetre'm col·laborar amb ells en una publicació científica així com el bon tracte rebut. Menció especial a l'Alejandro Rolán, qui va realitzar i aclarir l'equivalència del motor objecte del treball.

Aprofito aquestes línies per agrair a tota la meva família el suport i l'afecte rebut durant aquests quatre anys, encoratjant-me en els moments durs a seguir endavant. Agraïment especial a les meves àvies, la meva tieta i els meus avis, dels que he après valors com l'esforç, la persistència i la dedicació i dels que he rebut una infinita estima.

Per últim, però no menys importants, agrair a la Sara, la meva companya, amics i amigues properes que han estat al meu costat aquests anys, compartint alegries i aprenent dels errors, creixent.



Glossari

Sistema. Un sistema és una combinació de components que actuen conjuntament per complir un objectiu determinat. Un sistema no es troba necessàriament limitat a sistemes físics. El concepte de sistema pot ser aplicat a fenòmens abstractes i dinàmics. Per tant, la paraula sistema ha d'interpretar-se en un sentit ampli que pot comprendre sistemes físics, biològics, econòmics i similars (Ogata, 2010).

Planta. Una planta pot ser part d'un equip, com un conjunt d'elements d'una màquina que funcionen conjuntament i l'objectiu dels quals és efectuar una operació particular (Ogata, 2010). En el present treball, la planta és el motor.

Pertorbacions. Una pertorbació és un senyal que tendeix a afectar negativament el valor de la sortida del sistema. Si la pertorbació es genera dins del sistema es denomina interna, mentre que una pertorbació externa es genera fora del sistema i és una entrada (Ogata, 2010).

Sistema de control automàtic. Un sistema de control automàtic és un sistema que tendeix a reduir la diferència entre la seva sortida i una entrada de referència, comparant-les i utilitzant la diferència com a mitjà de control.

Driver, servodriver motor. En un sistema de control de posició o velocitat mitjançant un motor, és el controlador encarregat d'aplicar la tensió d'entrada al motor en funció de la diferència entre la consigna i la sortida (posició o velocitat).

Encoder. Codifica una magnitud física per transmetre la informació en magnitud elèctrica. En el present treball codifica la posició del rotor del motor.

Diagnosi. Procés que engloba la determinació de l'existència d'una fallada al sistema i la localització d'aquesta.

Detecció. Quan un sistema mostra un comportament lluny de l'habitual el qual excedeix els marges establerts d'un règim normal, es conclou que existeix una fallada.

Aïllament. Localització de la fallada prèviament detectada.

DC. Corrent continu, sigles de l'anglès *Direct Current*.

BLDC o Motor Brushless. Motor de corrent continu de tipus sense escombretes, sigles de l'anglès *BrushLess Direct Current*. Rotació mitjançant l'excitació d'imants permanents que creen camps magnètics els quals fan experimentar una força als bobinats del rotor.

PHM. De l'anglès *Prognostics and Health Management*, és una branca de la teoria de Control la qual té per objectiu la supervisió, diagnosi i prevenció de fallades en sistemes, allargant així la seva vida útil.

FDI. De l'anglès *Fault Detection and Isolation*, en aquest treball anomena a l'algorisme que sempre per realitzar la diagnosi de fallades.

FSM. De l'anglès *Fault Signature Matrix*, és la matriu que recull per cada fallada quins residus seran excedits, de forma binària.

IGBT. De l'anglès *Insulated Gate Bipolar Transistor*, és el transistor bipolar de porta aïllada, el qual és un dispositiu semiconductor emprat com a interruptor controlat.

PIME. Petita i Mitjana Empresa.

σ . Signe associat al llindar que limita el marge de funcionament correcte que té cada residu.

ϕ . Signe associat a una variable binària segons el residu al qual representa excedeixi o no el seu llindar.

fh. Abreviatura associada a la hipòtesi de la fallada segons la signatura d'aquesta. En el present treball existeixen quatre tipus de signatura de fallades, encara que algunes signatures són comunes per diverses fallades.

T_S . De l'anglès *Sample Time*, és el temps de mostreig necessari per treballar en domini discret.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
ÍNDIX DE FIGURES	XI
ÍNDIX DE TAULES	XVII
1. PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació	2
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Camp d'estudi	3
2.2. Objectius	6
2.3. Abast.....	7
3. ESTAT DE L'ART	8
3.1. Concepte i tipus de fallades	8
3.2. Taxonomia de la diagnosi de fallades.....	10
3.3. Detecció de fallades	11
3.4. Diagnosi de fallades	12
3.5. Fallades del motor	15
4. METODOLOGIA	18
4.1. Motor BLDC.....	18
4.2. Modelat: Model Motor DC equivalent	20
4.3. Generació de residus	22
4.4. Diagnosi de fallades	27
4.4.1. Detecció de fallades	27
4.4.2. Aïllament de fallades	28
4.5. Algorisme FDI	32

5. SIMULADOR EN MATLAB®/SIMULINK	39
6. RESULTATS I DISCUSSIÓ	44
6.1. Fallades abruptes.....	49
6.2. Fallades incipients.....	63
6.3. Resum dels resultats de l'algorisme.....	76
7. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	77
CONCLUSIONS	78
PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	80
BIBLIOGRAFIA	82
ANNEX A: DATASHEET DEL CROUZET 801405	85
ANNEX B: PROCEDIMENT MATEMÀTIC PER OBTENIR A_M I B_M	86
ANNEX C: PROCEDIMENT MATEMÀTIC PER OBTENIR RESIDUS EN TEMPS DISCRET	88
ANNEX D: CODI EN MATLAB® (.M) DEL SIMULADOR DEL MOTOR DC EQUIVALENT AL BLDC	90
ANNEX E: CODI EN MATLAB® (.M) DE L'ALGORISME FDI PER LA DIAGNOSI DE FALLADES	98

Índex de Figures

Figura 1.1. Segell del projecte SMART del programa Interreg POCTEFA.	1
Figura 2.1. Motor <i>Brushless</i> DC 80140510 de Crouzet.	4
Figura 2.2. Everest XCR.	4
Figura 2.3. Himalaya Development Board.	5
Figura 2.4. Elements de la planta necessaris per l'assaig d'implementació de l'objecte d'aquest treball.	5
Figura 3.1. Diagrama de blocs del sistema de control amb supervisió de fallades.	9
Figura 3.2. Exemplificació de la classificació d'una fallada segons la seva evolució temporal.	9
Figura 3.3. Taxonomia de la diagnosi de fallades.	10
Figura 3.4. Esquema de blocs de la diagnosi mitjançant aproximació basada en model.	12
Figura 4.1. Circuit d'un motor BLDC amb alimentació per inversor <i>full-bridge</i> (Xia, 2002) .	18
Figura 4.2. Força contraelectromotriu trapezoïdal per cada fase i corrent al bobinat de l'estator.	19
Figura 4.3. Circuit equivalent del motor BLDC.	20
Figura 4.4. Diagrama de blocs del motor DC equivalent al motor tipus <i>brushless</i> .	21
Figura 4.5. Filtratge d'un senyal per eliminar l'arrissada.	31
Figura 4.6. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 1/4): Detecció de fallada i aïllament per FSM.	35
Figura 4.7. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 2/4): Classificació per FSM i aïllament de dues fallades.	36

Figura 4.8. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 3/4): Aïllament de les tres fallades mecàniques a partir de la sensibilitat de fallada. _____	37
Figura 4.9. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 4/4): Aïllament de les tres fallades elèctriques a partir de la sensibilitat de fallada. _____	38
Figura 5.1. Planta del motor DC equivalent creada en MATLAB®/Simulink per la realització de simulacions. _____	39
Figura 5.2. Interior del bloc de la resistència R equivalent, on es diferencien tres parts: el valor de la resistència, la tolerància d'aquesta i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient. _____	40
Figura 5.3. Interior del bloc de la inèrcia J, on es diferencien tres parts: el valor de la inèrcia, la tolerància d'aquesta i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient. _____	40
Figura 5.4. Interior del bloc de la càrrega TLoad, on es diferencien tres parts: el valor nominal de la càrrega, la seva incertesa i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient. _____	41
Figura 5.5. Interior del bloc del sensor de corrent, on es diferencien dues parts que es sumaran a la mesura del corrent: un soroll variant i la fallada que pot ser abrupta o incipient. _____	41
Figura 5.6. Interior del bloc de l'encoder, on s'observa com actua aquesta única fallada, de tipus abrupta, a partir d'un bloc d'allargament de temps que farà que el sensor llegeixi nul. _____	42
Figura 5.7. Diagrama de blocs general de tot el sistema amb control de velocitat mitjançant dos controladors PI en cascada. _____	43
Figura 6.1. Funcionament del sistema en règim nominal lliure de fallades. _____	46
Figura 6.2. i Figura 6.3. Residu 1 i Residu 2, respectivament, en escenari lliure de fallades. _____	47
Figura 6.4. i Figura 6.5. Residu 3 i Residu 4, respectivament, en escenari lliure de fallades. _____	47
Figura 6.6. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en el fregament mecànic B a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s. _____	49

Figura 6.7. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en el fregament mecànic B.	50
Figura 6.8. i Figura 6.9. Residu 1 i Residu 2 en escenari de fallada abrupta en el fregament mecànic B.	50
Figura 6.10. i Figura 6.11. Residu 3 i Residu 4 en escenari de fallada abrupta en el fregament mecànic B.	50
Figura 6.12. Filtratge del residu 2, el senyal de la velocitat i la derivada de la velocitat.	51
Figura 6.13. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 2 i la velocitat.	52
Figura 6.14. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en la inductància equivalent L_{eq} a l' instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.	52
Figura 6.15. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la inductància equivalent L_{eq} .	53
Figura 6.16. i Figura 6.17. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} .	53
Figura 6.18. i Figura 6.19. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} .	54
Figura 6.20. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent.	54
Figura 6.21. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 1 i la derivada del corrent.	55
Figura 6.22. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta a la tensió d'entrada V_{DC} a l' instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.	56
Figura 6.23. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .	56

Figura 6.24. i Figura 6.25. Residu 1 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .	57
Figura 6.26. i Figura 6.27. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .	57
Figura 6.28. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent.	58
Figura 6.29. Finestra de $W_{\text{correl}} = 6$ s suficient per afirmar que no existeix una bona correlació del residu 1 amb cap dels dos altres senyals.	59
Figura 6.30. Evolució del nombre de comptes (gràfic superior) i nombre de comptes omesos (gràfic inferior) de la fallada abrupta al sensor de posició o <i>encoder</i> s_{θ} a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.	60
Figura 6.31. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l' <i>encoder</i> s_{θ} .	60
Figura 6.32. i Figura 6.33. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l' <i>encoder</i> s_{θ} .	61
Figura 6.34. i Figura 6.35. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l' <i>encoder</i> s_{θ} .	61
Figura 6.36. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en el sensor de corrent s_i a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.	62
Figura 6.37. Senyals mesurats en escenari de fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .	62
Figura 6.38. i Figura 6.39. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .	63
Figura 6.40. i Figura 6.41. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .	63
Figura 6.42. Evolució de la magnitud de la fallada incipient en el fregament mecànic B a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.	64

- Figura 6.43. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B. _____ 64
- Figura 6.44. i Figura 6.45. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B. _____ 65
- Figura 6.46. i Figura 6.47. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B. _____ 65
- Figura 6.48. Filtratge del residu 2, el senyal de la velocitat i la derivada de la velocitat. _____ 66
- Figura 6.49. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 2 i la velocitat. _____ 67
- Figura 6.50. Evolució de la magnitud de la fallada incipient a la inductància equivalent L_{eq} a l' instant $t_{\text{fault}} = 10$ s. _____ 67
- Figura 6.51. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la inductància equivalent L_{eq} . _____ 68
- Figura 6.52. i Figura 6.53. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} . _____ 68
- Figura 6.54. i Figura 6.55. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} . _____ 69
- Figura 6.56. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent amb fallada incipient. _____ 69
- Figura 6.57. Finestra de $W_{\text{correl}} = 3$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 1 i el corrent. _____ 70
- Figura 6.58. Evolució de la magnitud de la fallada incipient a la tensió d'entrada V_{DC} a l' instant $t_{\text{fault}} = 10$ s. _____ 71
- Figura 6.59. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la inductància equivalent V_{DC} . _____ 71

- Figura 6.60. i Figura 6.61. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} . _____ 72
- Figura 6.62. i Figura 6.63. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} . _____ 72
- Figura 6.64. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent amb fallada incipient. _____ 73
- Figura 6.65. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar que no existeix correlació entre el residu 1 i el corrent o la derivada del corrent. _____ 74
- Figura 6.66. Evolució de la magnitud de la fallada incipient al sensor de corrent s_i a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s. _____ 74
- Figura 6.67. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i . 75
- Figura 6.68. i Figura 6.69. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i . _____ 75
- Figura 6.70. i Figura 6.71. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i . _____ 75

Índex de Taules

Taula 3.1. Exemple de matriu de signatures de fallades (FSM) de sistema totalment aïllable.	13
Taula 3.2. Exemple FSM amb problema d'aïllament.	14
Taula 3.3. Exemple matriu de sensibilitat de fallada.	15
Taula 4.1. Matriu de signatures de les fallades (FSM) considerades en el model motor DC equivalent.	28
Taula 4.2. Matriu de sensibilitat de les fallades elèctriques considerant el residu r_1 .	29
Taula 4.3. Matriu de sensibilitat de les fallades elèctriques considerant el residu r_2 .	30
Taula 4.4. Matriu dels quatre tipus de signatura de fallada existents.	32
Taula 4.5. Matriu d'hipòtesi de fallada.	33
Taula 6.1. Paràmetres generals del model del motor DC equivalent.	44
Taula 6.2. Variables de configuració del simulador i predictor.	45
Taula 6.3. Configuració de les fallades i toleràncies: magnitud, velocitat (incipients) i tolerància del paràmetre.	45
Taula 6.4. Valor dels llindars dels residus.	46
Taula 6.5. Llindars de determinació de la tendència de correlació.	48
Taula 6.6. Resultats en temps de l'algorisme FDI.	76

1. Prefaci

1.1. Origen del treball

Aquest treball ha estat realitzat en el marc del projecte SMART PHM finançat pel Programa Interreg V-A Espanya-França-Andorra (POCTEFA, 2020).

El projecte SMART PHM (SMART, 2020) sorgeix de l'associació entre el món acadèmic (universitats i/o centres de desenvolupament tecnològic) i l'industrial (PIME) d'ambdues bandes dels Pirineus amb la necessitat de millorar la innovació, la productivitat i la competitivitat de les PIME mitjançant el desenvolupament de solucions intel·ligents d'anàlisi i supervisió amb el focus posat a la indústria 4.0.

El consorci d'aquest projecte el formen l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT) a França, INGENIA (empresa dedicada al control de servomotors a Barcelona), ITAINNOVA (Institut Tecnològic de Aragón), METALLICADOUR (Centre de transferència de tecnologia a Tarbes) i la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), de la qual sóc estudiant.



Figura 1.1. Segell del projecte SMART del programa Interreg POCTEFA.

A partir de les peticions de les empreses que formen part del projecte es va establir un pla de funcionament. Aquest implica el desenvolupament de mètodes, algorismes i eines perquè les PIME recopilin dades del funcionament dels seus sistemes de producció i els puguin processar per detectar qualsevol anomalia i fer la diagnosi de les causes probables per avançar-se a futures fallades i prendre decisions en conseqüència. Això es coneix com a *PHM (Prognostics & Health Management)*. Això últim permet desenvolupar encara més el manteniment condicional i predictiu i reduir el manteniment correctiu i sistemàtic amb el fi de que aquestes solucions millorin la confiança, disponibilitat i seguretat dels sistemes de producció i reduir els costos operatius de les PIME en el territori.

En concret, aquest Treball de Fi de Grau ha contribuït a la línia de recerca del projecte SMART que treballa en el desenvolupament d'algorismes de diagnosi i prognosi de fallades en motors tipus *brushless* i que té com a líders el grup de Sistemes Avançats de Control (SAC) de la UPC que és especialista en algorismes de diagnosi i prognosi i l'empresa Ingenia Motion Control que dissenya i desenvolupa controladors (servo *drivers*) d'aquest tipus de motors.

1.2. Motivació

Durant els cursos que he superat al Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica he après un gran nombre de disciplines dins les branques d'aquesta enginyeria, sent la branca del Control Automàtic una gran desconeguda abans de fer assignatures com Control i Automatització Industrial, Regulació Automàtica i Tècniques de Control però de la qual trobo un camp apassionant. La curiositat em va portar a cursar l'optativa Disseny de Sistemes per al Control de Processos per conèixer com aplicar els conceptes teòrics vistos en les anteriors assignatures.

És durant el temps que cursava aquesta última que se'm presenta l'oportunitat de realitzar el Treball de Fi de Grau d'una disciplina dins el Control Automàtic que no coneixia: la Supervisió i Diagnosi de Fallades. El fet de poder participar en un entorn d'investigació i desenvolupament com és el projecte SMART PHM, que engloba institucions universitàries, centres de desenvolupament tecnològic i empreses punteres en l'àmbit del Control Automàtic, va fer que no pogués negar-me. Després d'haver pogut experimentar realitzant una estada de pràctiques a una empresa dedicada a fer projectes d'enginyeria, volia conèixer altres sortides per quan arribi el moment de decidir que fer en el món laboral tenir criteris i una mínima experiència en diversos sectors.

Desenvolupar un treball d'aquest tipus ha suposat un repte a causa de l'alt nivell de conceptes teòrics que o bé no s'havia arribat a aprofundir durant el Grau o bé no eren al temari d'aquest. Alhora, el fet d'haver hagut d'assolir-los no fa sinó que reforçar la idea que tinc i per la qual ja he aplicat, en continuar la meva formació, posant el focus en l'àmbit de l'Automàtica i la Robòtica.

2. Introducció

2.1. Camp d'estudi

En l'actualitat, el concepte de control automàtic està molt estandarditzat en gran part de l'enginyeria, essent l'àmbit industrial la referència i el més pioner. És en aquest àmbit sobretot, on a través dels coneguts sistemes SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) aborda problemes de gran complexitat. No sorprèn doncs, que la tecnologia en camps com la robòtica, la instrumentació electrònica, l'electrònica de potència o part de l'enginyeria biomèdica hagin crescut a mesura que el control automàtic s'especialitzava i aprofundia.

Dins el camp del control automàtic, els sistemes de supervisió i diagnosi de les fallades són una disciplina que, encara tindre un llarg recorregut pel que fa al desenvolupament científic, encara no ha tingut la importància que mereix a la indústria. Si bé a la indústria s'utilitzen tècniques per conèixer si tot funciona com hauria (normalment a partir de redundàncies de sensors o valors límit en alguna variable) i, en cas contrari, aturar tot; la diagnosi de fallades realitza un estudi molt més exhaustiu. Aquesta disciplina s'encarrega principalment de la detecció, és a dir, alertar si existeix alguna anomalia en el funcionament del sistema; i la diagnosi, la localització de la fallada i l'aïllament del component que conté el defecte. Seguint aquesta mateixa disciplina neix, encara que amb molt menys bagatge, la idea d'anticipar-se a la fallada per evitar agreujaments en el sistema s'ha consolidat amb el concepte de prognosi.

Per altra banda, la planta d'aquest treball havia quedat definida dins el marc del Projecte SMART PHM: un sistema de control automàtic de velocitat/posició basat en un motor tipus *brushless*. Aquests motors, com especifica el seu nom, no contempnen escombretes entre l'estator i el rotor, disminuint pèrdues i, per tant, augmentant el seu rendiment. El motor tipus *brushless* ha estat utilitzat en la darrera dècada en nombrosos projectes d'alta complexitat i pioners en l'àmbit del desenvolupament tecnològic, ja siguin vehicles autopropulsats com robots versàtils.

L'empresa col·laboradora al projecte SMART dedicada al disseny i desenvolupament de plaques de control i *drivers* va proposar un motor DC de tipus *brushless* model 801405 quadrat de 57 mm² de Crouzet (Figura 2.1). Aquest és un petit motor lineal de corrent continua de tipus encapsulat amb configuració trifàsica en connexió Delta, amb accés a cadascuna de les 3 fases. Les característiques d'aquest motor queden recollides a l'Annex A: *Datasheet del Crouzet 801405*.

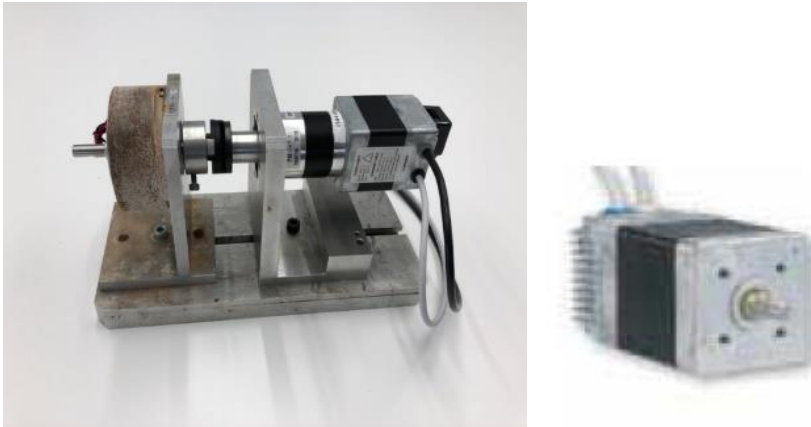


Figura 2.1. Motor *Brushless* DC 80140510 de Crouzet.

Aquest motor queda controlat per un servo-actuador ultra compacte, súper intel·ligent i d'alta potència. Aquest és el “Everest XCR” (Figura 2.2. **Everest XCR.**) , el qual gràcies a la seva mida i robustesa del disseny, pot ser implementat en qualsevol lloc. Per tal d'experimentar prèviament a la implementació final del servo al motor, és necessari connectar el conjunt del motor i el controlador amb un ordinador amb l'objectiu de monitoritzar els paràmetres i adquirir dades, entre altres funcionalitats. Per aquest motiu, la mateixa empresa ha dissenyat l'eina “Himalaya Development Board” (Figura 2.3) que inclou una interfície electrònica per a connectar qualsevol producte a múltiples fonts de retroalimentació, xarxes de comunicació i entrades/sortides de propòsit general (GPIO). A més de l'electrònica analògica i digital, la placa també inclou auxiliars d'electrònica de potència, subministraments lògics, transistors pel fre electromecànic, etc.

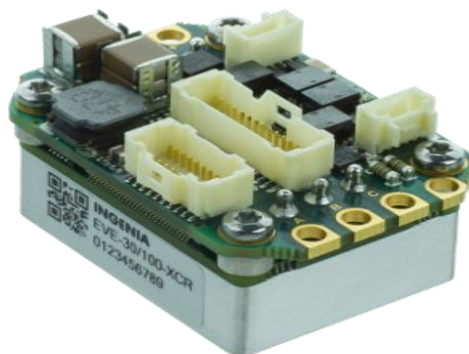


Figura 2.2. Everest XCR.

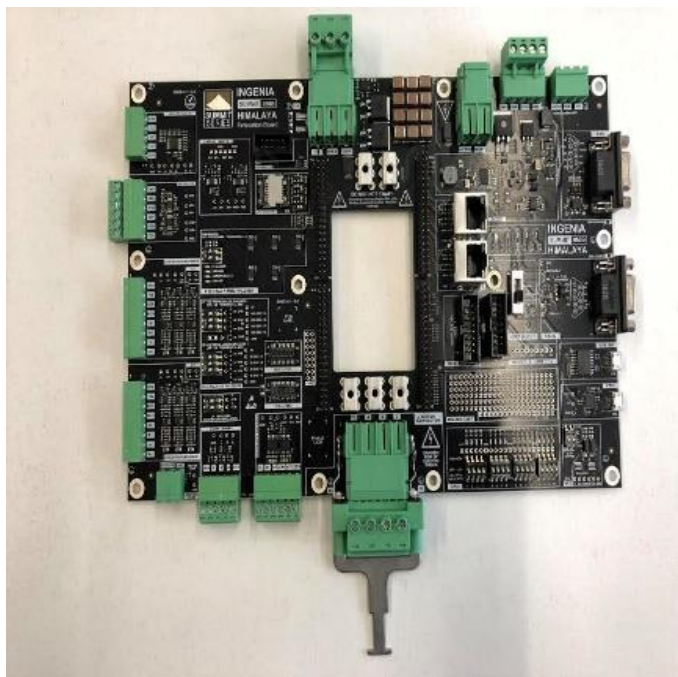


Figura 2.3. Himalaya Development Board.

Per tal de simular una càrrega, la maqueta del Projecte SMART PHM compta amb un fre electromecànic que actuarà com a càrrega i el seu valor pot ser modificat elèctricament. També s'observa l'alimentació de la placa de desenvolupament i la del fre electromecànic, les quals són generadors de tensió DC. El muntatge final de la planta queda recollit a la Figura 2.4.

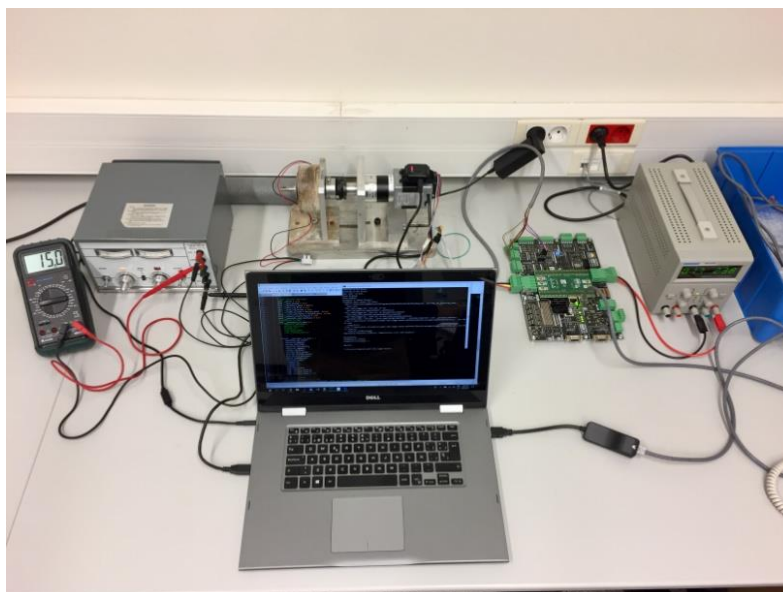


Figura 2.4. Elements de la planta necessaris per l'assaig d'implementació de l'objecte d'aquest treball.

2.2. Objectius

L'objectiu d'aquest treball és el de desenvolupar un sistema de supervisió i diagnosi per un ampli ventall de fallades dels motors del tipus *brushless* que es pogués implementar en un *servodriver*. Es consideren diferent tipus de fallades (abruptes i incipients) en els components del motor tant en llaç obert com en llaç tancat, aquest segon amb control de posició i velocitat.

Per tal de desenvolupar aquest sistema es desenvoluparà un simulador i un algorisme en l'entorn MATLAB® i Simulink que permetrà introduir fallades i deterioraments en els seus components. Depenent de l'evolució del treball es planteja també utilitzar un motor real per validar el sistema de monitoratge desenvolupat.

A continuació es defineixen quatre objectius que es deriven de l'objectiu principal, el qual ja s'ha esmentat abans. Cadascun d'aquests objectius presenta tasques a mode de mitjans:

Objectiu 1: Elaborar un estat de l'art sobre la diagnosi de fallades i les fallades d'un motor BLDC.

Tasca 1: Llegir bibliografia (llibres i articles) sobre la diagnosi de fallades i fallades a motors BLDC.

Objectiu 2: Desenvolupar el model d'un motor DC equivalent al motor BLDC.

Tasca 1: Revisió d'equacions d'estat de la planta.

Tasca 2: Revisió de les transformades de Laplace.

Tasca 3: Conversió del domini de Laplace al domini en Z.

Tasca 4: Assimilació de la transformada a temps discret pel mètode d'Euler.

Objectiu 3: Dissenyar un simulador d'aquest motor DC equivalent al BLDC.

Tasca 1: Entorn Simulink: conèixer el funcionament dels blocs per generar fallades i/o incerteses.

Tasca 2: Transmissió de la informació obtinguda per Simulink a Script.

Tasca 3: Entorn Script: conèixer funcions de les biblioteques de MATLAB® per tal de generar un codi el més eficient possible.

Objectiu 4: Dissenyar un algorisme que realitzi la diagnosi de fallades a partir de les dades generades pel simulador.

Tasca 1: Entendre el concepte de residu i generar-ne segons metodologia.

Tasca 2: Generació de l'indadors a partir dels residus creats.

Tasca 3: Entendre el concepte de Matriu de Signatura de Fallades (FSM).

Tasca 4: Generació d'una FSM i utilitzar-la per la diagnosi de fallades.

Objectiu 5: Comprovar el funcionament de l'algorisme i el simulador per tal de que pugui ser aplicat a la maqueta real.

Tasca 1: Implementar un algorisme de detecció i diagnosi de fallades que tingui en compte problemes pràctics i verificar el seu funcionament en simulació.

Tasca 2: Comparació dels resultats amb l'esperat teòricament.

2.3. Abast

Com s'ha esmentat abans, l'objecte del present treball és realitzar un estudi per dissenyar un sistema que permeti diagnosticar (detectar i aïllar) un extens nombre de fallades en un motor tipus *brushless*. La planta, com es menciona anteriorment, ha estat definida pel Projecte SMART PHM, concretament amb la intenció de poder oferir una alternativa quant a la supervisió de fallades a les empreses dedicades al disseny de controladors de motors. El sistema de supervisió dissenyat suposarà que es disposa d'un mecanisme de control del motor, el qual no és objecte d'estudi d'aquest treball.

A causa de la pandèmia de la COVID-19, el treball ha quedat limitat a experiments simulats, encara que amb un alt grau de fidelitat a la realitat. En cas contrari, es tenia previst comprovar el funcionament del sistema de supervisió dissenyat amb una planta real dissenyada pel projecte SMART PHM.

3. Estat de l'art

3.1. Concepte i tipus de fallades

En un sistema de control, s'entén per fallada qualsevol canvi en el funcionament d'algun dels elements (components o paràmetres) del sistema, la qual afecta de tal manera que no s'aconsegueix dur a terme la tasca o la finalitat esperada per la qual ha estat concebut (Blanke, 2016).

A banda de les fallades, el comportament del sistema pot ser alterat degut a entrades no desitjables però que per naturalesa estaran presents, com poden ser les perturbacions o el soroll. La diagnosi ha de ser robusta davant d'aquestes entrades, però sensible quant a fallades.

Les perturbacions són entrades desconegudes del sistema que es tenen presents a l'hora de dissenyar el control en llaç tancat, però si no és així, es consideren com a fallades.

El soroll també és una entrada desconeguda, la qual normalment s'assumeix mitja nul·la i que s'ha de tenir en compte en el disseny de control del sistema.

Seguint amb les fallades, aquestes poden ser tipificades en funció de l'efecte (Blanke, 2016):

- Fallades de procés additiu: Són les perturbacions que no s'han tingut presents durant el disseny del llaç de control. Aquest tipus de fallades produeixen efectes independents a les entrades conegudes.
- Fallades de procés multiplicatiu: Són canvis en algun dels paràmetres que conformen la planta, com pot ser un deteriorament o l'embrutiment d'un component.

Una segona classificació mostra com les fallades es poden diferenciar en funció de la ubicació (Blanke, 2016):

- Fallades en la planta: Fallades que provoquen un canvi en el funcionament, entrades o sortides del sistema.
- Fallades en sensors: Existeix la possibilitat d'haver un error en la lectura de la mesura el qual pot ser degut a un problema de calibratge del sensor, per problemes d'alimentació elèctrica o pel deteriorament del propi sensor. Aquesta fallada produeix una certa diferència entre el valor real del paràmetre i el valor que s'obté del sensor. Si bé aquesta fallada no afecta el funcionament de la planta en llaç obert pot portar a problemes greus de funcionament en llaç tancat.
- Fallades en actuadors: Les propietats de la planta no es veuen afectades, però si es veu afectada l'acció de control del sistema, de manera que pot quedar modificat o interromput.

A la Figura 3.1 es mostra l'esquema d'un sistema de control automàtic sotmès a fallades en actuadors (F_a), planta (F_p) i sensors (F_s) on s'ha implementat un sistema supervisor que, a més d'implementar la

diagnosi de fallades, permet re-configurar el controlador en la presència d'aquestes. A aquesta estructura de re-configuració del controlador davant la presència de fallades se la coneix com "Control tolerant a fallades".

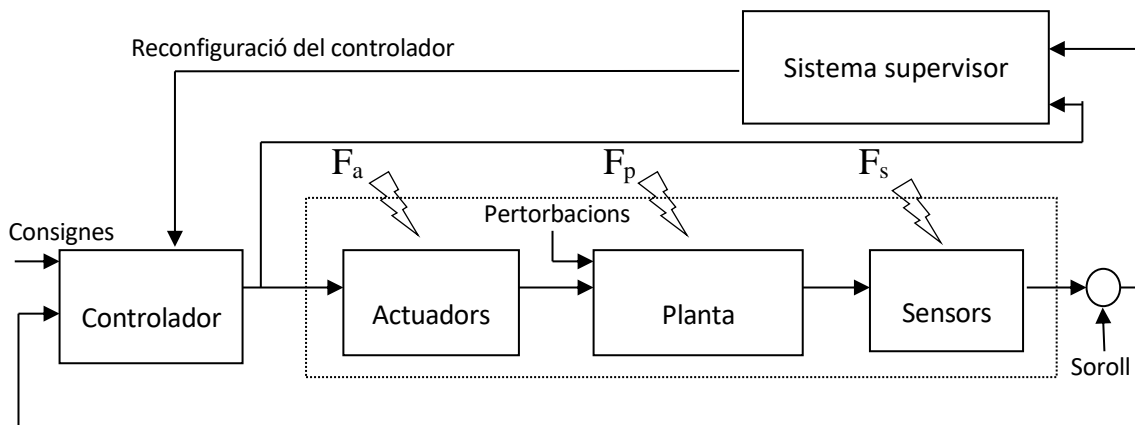


Figura 3.1. Diagrama de blocs del sistema de control amb supervisió de fallades.

Una tercera i última classificació determina de quin tipus de fallada es tracta depenent de la seva evolució temporal (Escobet, 2019):

- **Fallades abruptes:** Aquest tipus de fallada succeeix en un instant específic de temps. Pot ser modelat com un graó.
- **Fallades incipients:** Apareixen en un determinat moment i creixen lentament, i sobretot en el seu inici, pot no semblar una fallada. Poden ser modelades per rampes, funcions exponencials o paràboles.
- **Fallades intermitents:** Aquestes no són permanents i es van repetint de manera periòdica. Es modelen mitjançant tren de polsos on l'amplitud i l'amplada pot variar.

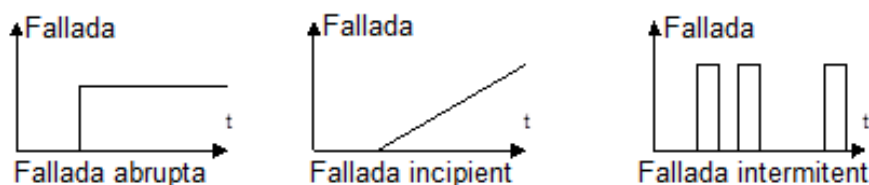


Figura 3.2. Exemplificació de la classificació d'una fallada segons la seva evolució temporal.

3.2. Taxonomia de la diagnosi de fallades

Al llarg de les últimes dècades han sorgit diferents metodologies a partir de les quals es pot arribar a detectar i aïllar una fallada en un sistema de control. La Fig. 2 presenta la taxonomia de la diagnosi de fallades amb diferents tècniques recollida a (Venkatasubramanian, 2002).

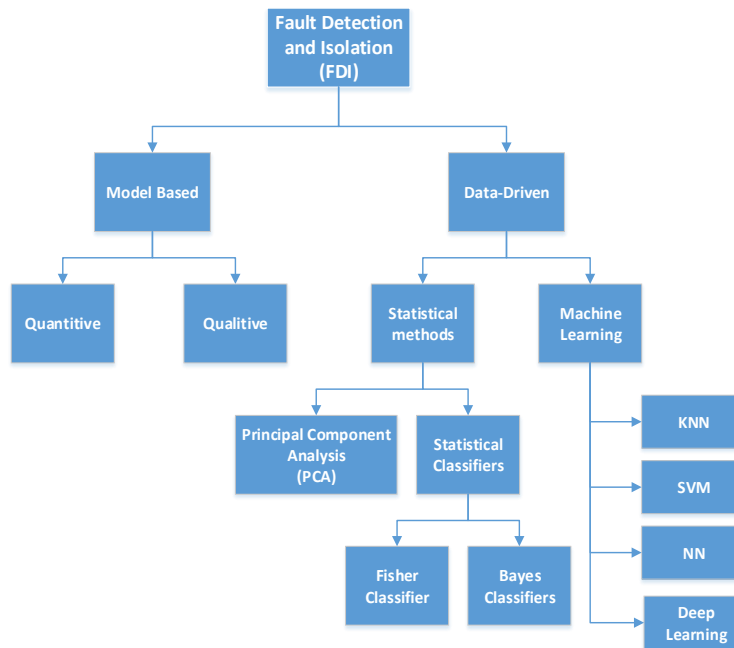


Figura 3.3. Taxonomia de la diagnosi de fallades.

La diferència entre els dos grans grups radica en la informació inicial que es coneix sobre el sistema.

La diagnosi mitjançant *Model Based* (aproximació basada en models) requereix una base de coneixement en tant que fonaments físics del procés. Aquesta tècnica es pot dividir en dues subcategories: la *Quantitative* (quantitativa) que es emprava eines matemàtiques; i la *Qualitative* (qualitativa) que emprava Intel·ligència Artificial.

La diagnosi mitjançant *Data-Driven* (basat en dades) requereix precisament de dades obtingudes per assajos prèviament realitzats. La tècnica pot ser dividida en dues subcategories: els *Statistical methods* (mètodes estadístics) focalitzats en classificar la informació; i el *Machine Learning* (aprenentatge automàtic) amb l'objectiu d'aprendre i fer prediccions de les dades assumint relacions matemàtiques però sense cap coneixement físic previ del sistema (Kohavi, 1998).

Els mètodes de diagnosi de fallades que el present treball emprava són mètodes basats en models quantitius, és a dir, basats en models matemàtics extrets d'un model físic del sistema a supervisar.

L'elecció d'aquests ha estat influenciada a la formació de l'autor en Enginyeria electrònica i Automàtica, la qual és més propera a aquest tipus de mètodes que deriven de l'àrea d'enginyeria de control (Castelló, 2016) que als altres tipus de mètodes de diagnosi.

3.3. Detecció de fallades

Si bé en aquest apartat s'ha de tractar la *detecció de fallades*, és fonamental conèixer els conceptes de *redundància física* i *redundància analítica* (Blanke, 2016). En el present, són moltes les indústries que empren sensors com a mètode de detecció de fallades, els quals poden alertar d'una específica alteració en el normal funcionament d'un procés. Aquest tipus de sistemes de detecció estan condicionats a què el sensor mesuri una variable física i quan superi un llindar, indicar que existeix una fallada. Aquest sistema és útil per a sistemes simples i, sempre que, el sensor no sigui defectuós. En molts casos per assegurar el correcte funcionament, s'incorpora una segona unitat (redundància física), amb la que comparar ambdues mesures per determinar el correcte funcionament dels sensors. La qüestió és: Si existeix una inconsistència entre els dos sensors quin és el que està fallant? Per tant per establir un sistema de votació s'hauria d'implementar almenys un tercer sensor. Aquesta opció no és sempre econòmicament o físicament viable.

En general en sistemes complexos que requereixen una gran precisió en la diagnosi per un important ventall de fallades la redundància física no és suficient. És aquí on entra la *redundància analítica*, la qual és l'aplicada en l'estudi del present treball. La redundància analítica es basa en la utilització de models matemàtics que relacionen les mesures de les diferents variables físiques obtingudes dels diferents sensors del sistema a supervisar per detectar inconsistències (fallades). D'aquesta manera es pot monitoritzar en temps real les variables d'interès sense la necessitat de duplicar sensors i alhora detectar qualsevol anomalia de variables no. Així doncs la detecció de fallades basada en models suposa una reducció econòmica enfront de la *redundància física* a més d'oferir un grau de diagnosi més ample.

Es coneix com a *detecció de fallades* quan el sistema de supervisió s'assabenta que ha ocorregut una fallada funcional a la planta. En el cas dels mètodes de diagnosi basats en models analítics la detecció es produeix per una inconsistència en un model. La manera més simple per detectar la inconsistència d'un model és estimar el valor d'una variable mesurada amb el valor dels altres sensors i després avaluar la discrepància entre la mesura i l'estimació.

La discrepància entre una mesura real i l'estimació proporcionada per un es coneix com a *residu*. En un supòsit ideal sense cap error de modelat, perturbació o soroll, aquest residu hauria de ser nul en una situació lliure de fallades i només es veuria alterat quan el sistema experimentés una fallada (Blesa, 2011). En aquest escenari ideal, un residu no nul implicaria una fallada en el sistema.

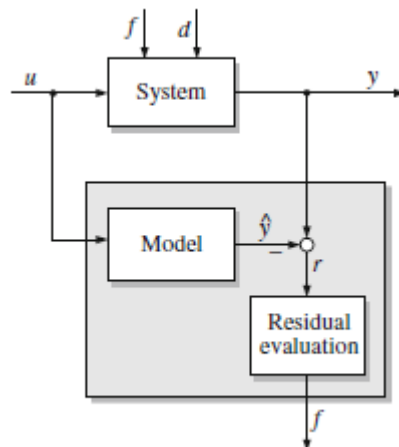


Figura 3.4. Esquema de blocs de la diagnosi mitjançant aproximació basada en model.

En un escenari real, amb un model pròxim al sistema real, aquest tindrà errors de modelat i quedarà afectat per pertorbacions i sorolls en les mesures. A causa d'aquestes incerteses, encara que el sistema funcioni sota règim normal aquest residu no serà nul i, per tant, el valor del residu s'haurà d'avaluar per un sistema de detecció de fallades robust (Blesa, 2011). Els mètodes de detecció de fallades robustos es poden dividir en dos tipus: actius o passius. Els mètodes de detecció de fallades actius intenten eliminar l'efecte de les incerteses en els residus mentre que els passius propaguen els efectes de les incerteses en els residus i determinen si el valor del residu observat és coherent amb les possibles incerteses o no. El mètode més senzill de detecció de fallades robust passiu és generar el residu en una situació de no fallada tenint en compte les diferents incerteses i generar un llindar σ_i amb el valor màxim de l'error absolut observat. Si en una situació on no se sap si hi ha fallada o no, es produeix un residu en valor absolut més gran a aquest llindar es determina que hi ha hagut una fallada. Aquesta detecció es pot implementar matemàticament de la següent manera:

$$\varphi_i = \begin{cases} 0 & \text{si } |r_i| \leq \sigma_i \\ 1 & \text{si } |r_i| > \sigma_i \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

On el senyal binari φ_i indica si s'ha produït una inconsistència (fallada) en el residu r_i si el seu valor és igual a 1 o no si el seu valor és igual a 0.

3.4. Diagnosi de fallades

La *diagnosi de fallades* s'encarrega de localitzar la fallada i generalment necessita més d'un residu per poder portar-la a terme mentre que per la *detecció de fallades* només és necessari un residu. Per tant, és necessari prèviament haver generat un conjunt de residus robustos associats cadascun d'ells a un

llindars calculat adientment. A continuació s'ha de determinar quins residus han excedit els llindars aplicant (2.1) a cada residu i obtenint el vector de signatura de fallada observada φ , finalment es determina quina fallada ha pogut produir les inconsistències observades als residus i recollida al vector φ . Aquesta etapa de la supervisió també és coneguda com a aïllament de la fallada.

Per aïllar i determinar la fallada que prèviament ha estat detectada per qualsevol dels residus del sistema models, normalment s'utilitza la *matriu de signatures de fallades* (FSM de l'anglès *Fault Signature Matrix*), en aquesta matriu es consideren totes les fallades (columnes) que es volen diagnosticar i els residus que es disposa (fileres). Els valors de la matriu són binaris i indiquen quines fallades afecten a quins residus (valor columna i filera associats igual 1) i quines no (valor igual a 0). Un cop construïda una FSM, l'aïllament de la fallada consisteix a determinar quina de les columnes de la FSM (signatures de fallada) ajusta a la signatura de fallada observada φ . A més de la FSM es pot extreure el grau d'aïllabilitat del sistema de diagnosi, o sigui quines fallades es poden aïllar. A la *Taula 3.1* es presenta una FSM on es consideren 4 residus i 4 fallades i on cada fallada afecta només a un residu que al mateix temps només és afectat per aquesta fallada. Per tant, el sistema és totalment aïllable: Les quatre columnes de la FSM són diferents.

Taula 3.1. Exemple de matriu de signatures de fallades (FSM) de sistema totalment aïllable.

FSM	Fallada 1	Fallada 2	Fallada 3	Fallada 4
Residu 1	1	0	0	0
Residu 2	0	1	0	0
Residu 3	0	0	1	0
Residu 4	0	0	0	1

Però depenent de les fallades que volem aïllar i els residus que es disposa, es pot donar el cas que no totes les fallades són aïllables. Suposem que disposem dels residus

$$r_1 = (\alpha + \alpha_f) \theta(t) + (\beta + \beta_f) \frac{d\theta}{dt} + (\gamma + \gamma_f)(-2) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$r_2 = (\mu + \mu_f) \theta(t) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$r_3 = (\mu + \mu_f) \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

On $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ són els paràmetres nominals i $\alpha_f, \beta_f, \gamma_f, \mu_f$ són possibles fallades paramètriques. Llavors considerant l'afectació de les quatre fallades als tres residus es pot construir la FSM que es mostra a la Taula 4.2. Com es pot observar, les tres primeres columnes són iguals a $(1 \ 0 \ 0)^t$ per tant quan s'observi un vector φ amb aquest valor no es podrà determinar quina de les tres fallades: α, β, γ s'ha produït.

Taula 3.2. Exemple FSM amb problema d'aïllament.

FSM	Fallada α	Fallada β	Fallada γ	Fallada μ
Residu 1	1	1	1	0
Residu 2	0	0	0	1
Residu 3	0	0	0	1

En aquests casos on tenim diferents fallades amb la mateixa signatura teòrica de fallada, hem d'aplicar altres metodologies per poder fer un bon aïllament com: l'*estimació paramètrica* o la *sensibilitat de les equacions de paritat* (Isermann, 2006).

L'*estimació paramètrica* ens permet identificar els paràmetres del model en cada instant de temps, una variació en els paràmetres pot significar una fallada en el sistema. Aquest mètode és especialment útil en l'aïllament de fallades paramètriques quan les entrades al sistema compleixen un ordre d'excitació suficient per garantir una correcta identificació de paràmetres (Ljung, 1999).

La *sensibilitat de les equacions de paritat* diferencia les fallades amb la mateixa signatura a partir de la derivada dels residus en funció de la variable a la qual representa aquella fallada. Aquesta idea es basa en el fet de, com s'ha mencionat en la tipologia de fallades, aquestes poden ser additives o multiplicatives, i per tant, en derivar el residu que ha excedit el líndar en funció del paràmetre que representa la fallada, si conté una fallada, el resultat serà diferent de zero i serà equivalent al producte que acompanya a aquest paràmetre per la magnitud de la fallada (Isermann, 2006). Continuant amb l'exemple descrit pels 3 residus de les equacions (3.7)-(3.9), si considerem les tres fallades que no podem distingir: $\alpha_f, \beta_f, \gamma_f$ i calculem la sensibilitat dels tres residus a cadascuna de les tres fallades obtenim

$$\frac{\partial r_1}{\partial \alpha_f} = \theta(t) ; \frac{\partial r_1}{\partial \beta_f} = \frac{d\theta}{dt} ; \frac{\partial r_1}{\partial \gamma_f} = -2 ; \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial \alpha_f} = \frac{\partial r_2}{\partial \beta_f} = \frac{\partial r_2}{\partial \gamma_f} = 0$$

$$\frac{\partial r_3}{\partial \alpha_f} = \frac{\partial r_3}{\partial \beta_f} = \frac{\partial r_3}{\partial \gamma_f} = 0$$

Aquesta informació es pot resumir de manera compacta en la Taula 4.3. on es pot veure que malgrat que les tres fallades actuïn sobre el mateix residu ho fan de manera diferent. I per tant es podran aïllar malgrat que tinguessin la mateixa signatura teòrica binària.

Taula 3.3. Exemple matriu de sensibilitat de fallada.

Sensibilitat de fallada	Fallada α	Fallada β	Fallada γ
Residu 1	$\theta(t)$	$\frac{d\theta}{dt}$	-2
Residu 2	0	0	0
Residu 3	0	0	0

En el present treball s'empra aquesta tècnica per acabar d'aïllar fallades quan comparteixen signatura binària de fallada.

3.5. Fallades del motor

A partir d'un exhaustiu estudi sobre fallades en motors elèctrics (Ruiz, 2009)(Gandhi, 2011)(Tolivat, 2012)(Singleton, 2016) s'ha determinat que a més del sensor de posició i de corrent, són de gran utilitat monitoritzar variables físiques a partir de sensors de temperatura, acústics, de vibracions i del parell generat pel motor.

Així doncs, un sobreescalfament al motor és un clar indicador del fet que una fallada s'està produint o es produirà al futur si es continua aplicant aquesta temperatura al motor durant un cert temps. Per altra banda, moltes fallades mecàniques en els motors elèctrics es manifesten amb l'aparició de vibracions que es poden detectar per mitjà de sensors acústics o de vibracions. Finalment, el parell

teòric generat pel motor es pot estimar mitjançant la intensitat consumida pel motor, si es disposa d'un sensor de parell generat pel motor, fent la diferència entre el teòric i el llegit pel sensor pot esdevenir un indicador de possibles fallades elèctriques al motor. En aquest treball s'estudia la possibilitat de poder diagnosticar un ampli ventall de fallades amb tan sols els sensors utilitzats pel sistema control.

Seguidament es mencionen les fallades principals (més freqüents) en motors elèctrics (Hamid, 2012):

Fallada en coixinets: Aquests representen més del 40% de les fallades en motors elèctrics que treballen en ambients industrials i són deguts que els coixinets treballen en condicions no ideals i es troben sota efectes com la fatiga, les vibracions mecàniques, sobrecàrrega, desalineació, etc. Aquestes condicions no ideals comencen com a defectes marginals que es propaguen als diferents elements del rodament. Al cap d'un temps el defecte es converteix en significatiu i genera vibracions mecàniques amb el conseqüent soroll acústic associat.

Fallada a l'estator: La fallada de l'estator més freqüent és l'avaría del debanament d'aïllament i és degut a grans tensions produïdes per corrents de bobina, envelliment tèrmic per múltiples cicles de calefacció i refrigeració, i vibracions mecàniques de fonts internes i externes. Aquesta fallada pot produir curtcircuits a terra.

Trencament d'una barra del rotor: Aquest tipus de fallada representa més del 5% de fallades en la indústria. Les causes de la fallada en una barra del rotor poden ser diverses: tensions tèrmiques, magnètiques, dinàmiques, ambientals, mecàniques i residuals. Normalment, les tensions romanen dins de l'amplada de banda de tolerància i el motor funciona correctament durant anys. Però un problema incipient en una barra del rotor s'agreuja gairebé exponencialment en el temps, ja que s'espera que el flux de corrent excessiu es centri en les barres adjacents en lloc de la defectuosa, la qual cosa proporciona tensió elèctrica propagada a les àrees adjacents. Quan qualsevol d'aquestes tensions supera els nivells permesos, la vida útil del motor s'escurça. Una barra de rotor trencada es pot considerar com una asimetria del rotor que causa corrents de línia desequilibrades, pulsacions de parell i una torsió mitjana disminuïda.

Fallada d'excentricitat: L'excentricitat es coneix com una condició que ocorre quan hi ha una distància no uniforme entre el rotor i l'estator en l'espai d'aire que els separa. Quan hi ha una excentricitat, les inductàncies variables causen un flux magnètic desequilibrat dins de l'espai d'aire que cregui harmònics de fallada en el corrent de línia, que es poden identificar en l'espectre. Hi ha dos tipus de fallades d'excentricitat: l'excentricitat estàtica i l'excentricitat dinàmica. Quan es produeix una excentricitat estàtica, la línia central de l'eix està en un desplaçament constant respecte al centre de l'estator o el rotor està desalineat al llarg de l'orifici de l'estator. D'altra banda, quan es produeix una excentricitat dinàmica, la línia central de l'eix està en una desviació variable del centre de l'estator o l'espai d'aire

mínim gira amb el rotor. Si la distància entre l'orifici de l'estator i el rotor no és igual en tota la màquina, el flux magnètic variable dins de l'espai d'aire crea desequilibris en el flux de corrent, que es poden identificar en l'espectre instantani. Un muntatge incorrecte, una desalineació o un desequilibri del rotor poden ser causa d'excentricitat.

4. Metodologia

En aquest capítol s'exposa el procediment establert per l'anàlisi de la supervisió de les fallades d'un motor tipus *brushless*, indicant amb un cert grau de detall la teoria emprada.

4.1. Motor BLDC

Un motor del tipus *brushless* s'assembla a una màquina síncrona d'imants permanents (*PMSM*): imants permanents sobre la superfície del rotor i bobinat trifàsic a l'estator. Però a diferència de la força electromotriu sinusoidal a l'estator de les *PMSM*, la del motor tipus *brushless* és trapezoïdal (Pillay, 1989).

La Figura 4.1 mostra un circuit de tres fases del motor BLDC, alimentat per un inversor *full-bridge*, que transforma la tensió en corrent continu V_{dc} en alterna trifàsica a través dels patrons d'activació dels 6 IGBT, els quals s'activen segons el senyal que els arriba dels sensors Hall que detecten la posició del rotor.

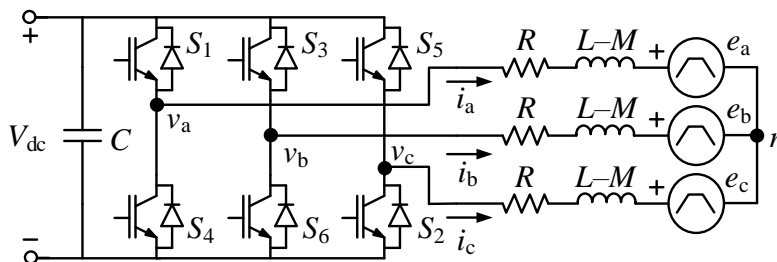


Figura 4.1. Circuit d'un motor BLDC amb alimentació per inversor *full-bridge* (Xia, 2002) .

Aquest circuit queda modelat a partir de les següents equacions:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_r \omega_r \quad ; \quad T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

On v_{abc} és la tensió a cada fase de l'estator, i_{abc} és el corrent a cada fase de l'estator, R és la resistència a cada fase de l'estator, L és l'auto-inductància a cada fase de l'estator, M és la inductància mutual entre cada parell de bobinat, T_e és el parell electromagnètic, T_L és el parell que exerceix la càrrega, J és el moment d'inèrcia rotacional del sistema (motor BLDC i càrrega), B_r és el coeficient del fregament mecànic, ω_r és la velocitat angular, θ_r és la posició del rotor (valor obtingut a través dels sensors Hall), d/dt és la derivada respecte al temps i e_{abc} és la força electromotriu induïda en cada fase de l'estator exercida en els seus bobinats i causada pels imants permanents del rotor, amb un comportament definit en la següent relació:

$$\begin{bmatrix} e_a & e_b & e_c \end{bmatrix}^T = p\omega_r\lambda'_m \begin{bmatrix} f_a(p\theta_r) & f_a(p\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & f_a(p\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \quad (\text{Eq. 4.3})$$

On p és el nombre de parells de pols, λ'_m és l'amplitud del flux d'unió establert pels imants permanents al rotor amb els bobinats de l'estator, $f_a(p\theta_r)$ és la funció trapezoïdal (definida entre 1 i -1) vist a la Figura 4.2. Remarcar que el producte $p\theta_r$ correspon a l'angle elèctric, θ_e , del motor BLDC.

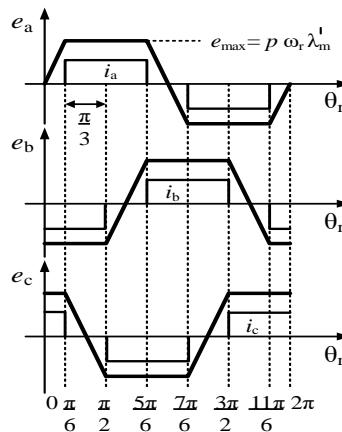


Figura 4.2. Força contraelectromotriu trapezoïdal per cada fase i corrent al bobinat de l'estator.

Les següents condicions han de complir-se per tal de realitzar l'equivalència amb un model de motor DC (Blesa, 2020):

- Els bobinats de l'estator han de ser simètrics (mateix nombre d'espines, inductància i resistència) i estar equidistantment distribuïts.
- No existeixi saturació del nucli magnètic.
- No existeixin pèrdues al ferro.
- S'ignora la reacció a l'armadura.
- El camp magnètic a l'espai buit té una forma trapezoïdal que implica una força contraelectromotriu trapezoïdal al bobinat de l'estator (vist a la Figura 4.2).

- No necessita cap particularitat el rotor perquè els imants permanents tenen alta resistivitat.
- Com els imants permanents es troben sobre la superfície del rotor no hi ha saliència, és a dir, l'espessor de l'espai buit és constant, fet que propicia que no hi hagi parell motor d'engranatge.

Sota aquestes circumstàncies s'obté el següent model que defineix el circuit de la Figura 4.3. (Paper PHM, 2020):

$$v_{ab} = v_{dc} = 2Ri + 2(L-M) \frac{di}{dt} + 2e_a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{dc} = R_{eq}i + L_{eq} \frac{di}{dt} + k_e \omega_r \quad (\text{Eq. 4.4})$$

On $i = i_a = -i_b$, $e_a = -e_b$, V_{dc} és l'entrada de tensió, $R_{eq} = 2R$ és la resistència equivalent de la línia, $L_{eq} = 2(L-M)$ és la inductància equivalent de la línia, and $k_e = 2p\lambda'_m$ és el coeficient de la força electromotriu (*fem*).

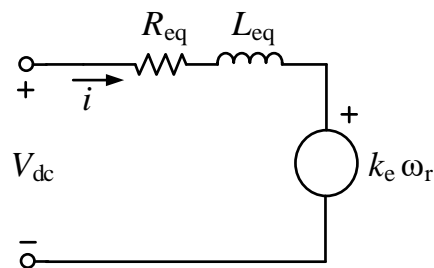


Figura 4.3. Circuit equivalent del motor BLDC.

Pel que fa a l'equació mecànica el parell elèctric pot expressar-se a partir de:

$$T_e = 2p\lambda'_m i = k_T i \quad (\text{Eq. 4.5})$$

On $k_T = 2p\lambda'_m$ és el coeficient mecànic del parell.

4.2. Modelat: Model Motor DC equivalent

A partir del desenvolupament realitzat a l'apartat anterior, s'afirmen les següents relacions:

$$R_{eq} = 2R \ ; \ L_{eq} = 2(L - M) \ ; \ k_e = 2p\lambda'_m \quad (\text{Eq. 4.6})$$

El sistema que modela el motor DC amb les equivalències aplicades recollides a les anteriors equacions (Eq. 4.4)(Eq. 4.5)(Eq. 4.6) és:

$$\left. \begin{aligned} V_{dc} &= R_{eq}i + L_{eq}\frac{di}{dt} + k_e w_r \\ k_T i - T_L &= B_r w_r(t) + J\frac{dw_r}{dt} \\ w_r &= \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \right\} ; \quad k_e = k_T = 2p\lambda'_m \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Un cop les equivalències han estat integrades a les equacions modeladores de la planta, l'estudi requereix transformar les anteriors equacions del domini temporal al domini freqüencial, per mitjà de la transformada de Laplace:

$$\left. \begin{aligned} V_{dc}(s) &= R_{eq}I(s) + L_{eq}sI(s) + k_e\Omega_r(s) \\ k_T I(s) - T_L(s) &= \Omega_r(s)[Js + B_r] \\ \Omega_r(s) &= s\theta_r(s) \end{aligned} \right\} ; \quad k_e = k_T = 2p\lambda'_m \quad (\text{Eq. 4.8})$$

A partir de les equacions (Eq. 4.8) i amb la idea de realitzar l'estudi amb el programari "Simulink", es construeix el diagrama de blocs del motor DC:

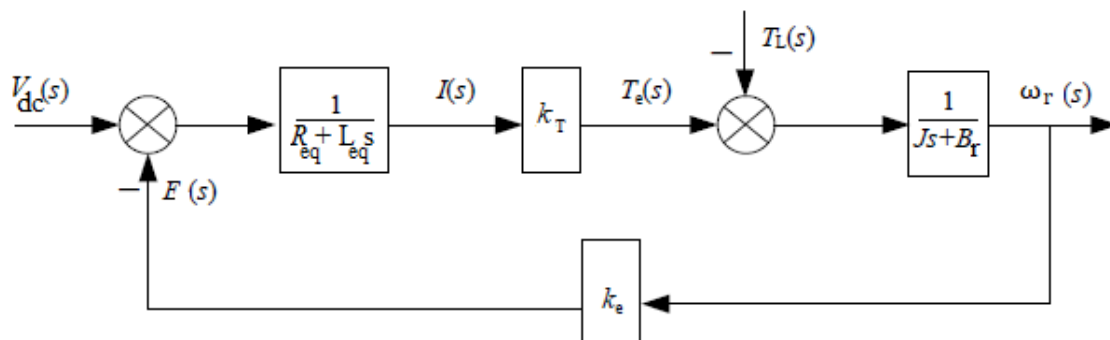


Figura 4.4. Diagrama de blocs del motor DC equivalent al motor tipus *brushless*.

Aquest model queda recollit en l'equació en espai d'estats en domini temporal següent:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & -\frac{k_e}{L_{eq}} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dc} \\ T_L \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$y = \begin{bmatrix} I \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x$$

Aquesta equació en espai d'estats queda segons la següent relació en domini de Laplace:

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$Y(s) = CX(s)$$

On

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & -\frac{k_e}{L_{eq}} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3. Generació de residus

La generació de residus és fonamental per tal d'aconseguir detectar i aïllar fallades d'una manera adequada. Per generar-los, s'ha seguit la idea de residus estructurals proposada per (Isermann, 2006), on es defineix el concepte de residu estructurat com un conjunt de residus on cada residu és independent d'una fallada i dependent de totes les altres. Aquest tipus de residus són considerats de fort aïllament, és a dir, difícilment es pot classificar una fallada com a una altra malgrat que hi hagi un error en l'activació d'un residu. El problema d'aquesta metodologia és que en aquesta estructura de residus només es garanteix el fort aïllament en les fallades additives d'entrades i sortides.

Seguint la bibliografia mencionada, es parteix de l'equació d'error considerant un sistema descrit en espai d'estat mitjançant (Eq. 4.10). L'equació d'error s'obté d'aïllar l'estat $X(s)$ de les dues equacions en espai d'estat (Eq. 4.10), d'aquesta manera s'obté una igualtat que relaciona les sortides $Y(s)$ amb les entrades $U(s)$ mitjançant les matrius $A_m(s)$ i $B_m(s)$. L'equació del residu genèrica queda d'acord amb l'expressió següent:

$$r(s) = A_m(s)Y(s) - B_m(s)U(s) \quad (\text{Eq. 4.11})$$

On (càlculs a l'Annex B: Procediment matemàtic per obtenir A_m i B_m):

$$A_m(s) = B^{-1}(sI - A)C^{-1} = \begin{bmatrix} -L_{eq}s - R_{eq} & -k_e \\ k_t & -Js - B \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$B_m(s) = B^{-1}B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir d'una matriu generadora de residus ($W(s)$) que multiplicarà l'anterior expressió s'aïlla un dels termes d'entrada o de sortida, aconseguint que el residu sigui independent d'una anomalia en aquest terme (fallada additiva). Aquesta expressió es recull de la següent forma:

$$r^*(s) = W(s)[A_m(s)Y(s) - B_m(s)U(s)] \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Per aconseguir aquesta independència d'una de les entrades o de les sortides, la multiplicació matricial entre la matriu generadora de residus i la matriu que conté els coeficients de les entrades o de les sortides ha de ser zero. Expressada la condició matemàticament:

$$W_{Yi}(s)A_m(s) = 0 \quad \& \quad W_{Ui}(s)B_m(s) = 0$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_{Y1}(s) \\ W_{Y2}(s) \\ \dots \\ W_{U1}(s) \\ W_{U2}(s) \\ \dots \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Per observar de millor manera quins vectors multipliquen cada entrada o sortida, es separen les matrius A_m i B_m , deixant l'equació generadora de residus següent:

$$r(s) = W(s) \left[\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_{dc}(s) + \begin{bmatrix} -L_{eq}s - R_{eq} \\ k_T \end{bmatrix} I(s) + \begin{bmatrix} -k_e \\ -Js - B_r \end{bmatrix} \Omega_r(s) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_L(s) \right] \quad (\text{Eq. 4.15})$$

De la qual es pot determinar la composició de la matriu $W(s)$ seguint la condició (Eq. 4.14):

$$W_{U2}(s) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \rightarrow W_{U2}(s) = [1 \quad 0] \quad (\text{independent de } T_L(s))$$

$$W_{U1}(s) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \rightarrow W_{U1}(s) = [0 \quad 1] \quad (\text{independent de } V_{dc}(s))$$

$$W_{Y2}(s) \begin{bmatrix} k_e \\ Js + B_r \end{bmatrix} = 0 \rightarrow W_{Y2}(s) = [Js + B_r \quad -k_e] \quad (\text{independent de } \Omega_r(s))$$

$$W_{Y1}(s) \begin{bmatrix} L_{eq}s + R_{eq} \\ -k_T \end{bmatrix} = 0 \rightarrow W_{Y1}(s) = [k_T \quad L_{eq}s + R_{eq}] \quad (\text{independent de } I(s))$$

Donat com a resultat:

$$W(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ Js + B_r & -k_e \\ k_T & L_{eq}s + R_{eq} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Cada residu contempla una variable de sortida d'entre les dues sortides del sistema que són el corrent i la velocitat. Aquesta sortida queda supeditada a la relació entre les altres dues variables del residu que actuen com a entrada. D'aquesta manera cada residu és independent d'una variable d'estat.

$$r1: I(s) = f(V_{dc}(s), \Omega_r(s)) \text{ independent de } T_L(s)$$

$$r2: \Omega_r(s) = f(T_L(s), I(s)) \text{ independent de } V_{dc}(s)$$

$$r3: I(s) = f(V_{dc}(s), T_L(s)) \text{ independent de } \Omega_r(s)$$

$$r4: \Omega_r(s) = f(V_{dc}(s), T_L(s)) \text{ independent de } I(s)$$

D'aquesta manera s'obtenen quatre residus ($r1, r2, r3, r4$), els quals permetran poder analitzar les fallades individualment. Aquests residus contenen derivades de primer i segon ordre, fet que serà essencial en el seu comportament i la seva diagnosi. L'expressió de cada residu és la següent:

$$r_1(s) = R_{eq}I(s) + L_{eq}sI(s) + k_e\Omega_r(s) - V_{dc}(s) \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$r_2(s) = \Omega_r(s)(Js + B_r) - k_T I(s) + T_L(s) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$r_3(s) = (JL_{eq}s^2 + (R_{eq}J + BL_{eq})s + BR_{eq} + k_e k_T)I(s) - (Js + B)V_{dc}(s) - k_e T_L(s) \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$r_4(s) = (JL_{eq}s^2 + (R_{eq}J + BL_{eq})s + BR_{eq} + k_e k_T)\Omega_r(s) - k_T V_{dc}(s) + (L_{eq}s + R_{eq})T_L(s) \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Un ordinador serà l'encarregat de computar els residus amb les mesures dels sensors i els paràmetres del sistema. Per tant els residus (Eq. 4.17)-(Eq. 4.20) en domini continu transformat s , es transformen a domini temporal discret k (passant pel domini discret z). Per mitjà del mètode d'Euler amb *Forward Rectangular Rule* (Eq. 4.21) els residus (Eq. 4.17)-(Eq. 4.20) es poden convertir a domini transformat z .

$$s = \frac{z - 1}{T_S} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Seguidament s'exposa el procediment per obtenir el primer residu $r_1(k)$ a partir de l'equació (Eq. 4.17) de manera que representi com serà tractat pel *software* del computador. Primerament es realitza la conversió al domini en transformada Z :

$$r_1(z) = R_{eq}I(z) + L_{eq}I(z) \frac{z - 1}{T_S} + k_e\Omega_r(z) - V_{dc}(z) \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Considerant el residu ideal $r_1(z) = 0$ s'obté la següent relació en transformada Z :

$$I(z) \left(\frac{L_{eq}}{T_S} z + R_{eq} - \frac{L_{eq}}{T_S} \right) = V_{dc}(z) - k_e\Omega_r(z)$$

$$I(z) \left(z + \frac{\Delta t}{L_{eq}} R_{eq} - 1 \right) = \frac{T_S}{L_{eq}} V_{dc}(z) - \frac{T_S}{L_{eq}} k_e \Omega_r(z) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

D'aquesta relació en transformada Z es troba una equació en diferències discretes:

$$i(k+1) = a_1^1 i(k) + b_1^1 \Omega(k) + c_1^1 v_{dc}(k)$$

(Eq. 4.24)

$$a_1^1 = 1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} T_S ; \quad b_1^1 = -\frac{k_e}{L_{eq}} T_S ; \quad c_1^1 = \frac{1}{L_{eq}} T_S$$

Aquesta equació en diferències serveix per estimar el corrent a l'instant "k+1" ($i(k+1)$) coneixent el valor de les variables $v_{dc}(k)$ i $w(k)$ i el corrent $i(k)$. Considerant que es té la mesura en un instant de temps "k" del corrent $i_m(k)$ el residu $r_1(k)$ es pot calcular de dues maneres (Gertler, 1998). Mitjançant una equació de paritat en forma MA (*Moving Average*):

$$r_1(k) = i_m(k) - a_1^1 i_m(k-1) - b_1^1 \Omega_m(k-1) - c_1^1 v_{acm}(k-1) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

O mitjançant una equació de paritat en forma ARMA (*Auto Regressive Moving Average*):

$$r_1(k) = i_m(k) - a_1^1 i(k-1) - b_1^1 \Omega_m(k-1) - c_1^1 v_{acm}(k-1) \quad (\text{Eq. 4.26})$$

On

$$a_1^1 = 1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} T_S ; \quad b_1^1 = -\frac{k_e}{L_{eq}} T_S ; \quad c_1^1 = \frac{1}{L_{eq}} T_S$$

I el subíndex "m" significa variable mesurada.

La diferència entre l'equació de paritat en forma MA (Eq. 4.25) i en forma ARMA (Eq. 4.26) radica que en el primer cas s'utilitza per estimar el corrent mesurat en l'instant "k" el corrent mesurat en l'instant "k-1" mentre que en el segon cas s'utilitza una estimació del corrent en l'instant k-1 obtinguda aplicant el model en l'instant anterior. El fet d'utilitzar una forma o una altra té unes determinades característiques (Costa, 2016) i en aquest treball s'ha optat pel segon cas, l'equació de paritat en forma ARMA.

Amb la mateixa idea és desenvolupen la resta de residus, on primerament es realitza la conversió al domini discret en transformada Z per mitjà del mètode d'Euler:

$$r_2(z) = \Omega_r(s) \left(J \frac{z-1}{T_S} + B_r \right) - k_T I(s) + T_L(s) \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$r_3(z) = \left(J L_{eq} \left(\frac{z-1}{T_s} \right)^2 + (R_{eq}J + B L_{eq}) \frac{z-1}{T_s} + B R_{eq} + k_e k_T \right) I(s) - \left(J \frac{z-1}{T_s} + B \right) V_{dc}(s) - k_e T_L(s)$$

$$r_4(z) = \left(J L_{eq} \left(\frac{z-1}{T_s} \right)^2 + (R_{eq}J + B L_{eq}) \frac{z-1}{T_s} + B R_{eq} + k_e k_T \right) \Omega_r(s) - k_T V_{dc}(s) + \left(L_{eq} \frac{z-1}{T_s} + R_{eq} \right) T_L(s)$$

Operant els residus, s'arriba a les equacions en diferències de cada residu, de tal manera que es pot arribar a l'equació de paritat en forma ARMA per cada residu, com ja s'ha explicat en el procediment pel primer residu. El procediment d'aquests residus queda recollit a l'Annex C: *Procediment matemàtic per obtenir residus en temps discret*:

$$r_2(k) = \Omega_m(k) - b_1^2 \Omega(k-1) - a_1^2 i_m(k-1) - d_1^2 t_{Lm}(k-1)$$

$$b_1^2 = 1 - \frac{B}{J} T_s ; \quad a_1^2 = \frac{k_T}{J} T_s ; \quad d_1^2 = -\frac{1}{J} T_s ; \quad (\text{Eq. 4.28})$$

$$r_3(k) = i_m(k) - a_1^3 i(k-1) - a_2^3 i(k-2) - c_1^3 v_{dcm}(k-1) - c_2^3 v_{dcm}(k-2) - d_1^3 t_{Lm}(k-2)$$

$$a_1^3 = 2 - \frac{(R_{eq}J + B L_{eq})}{J L_{eq}} T_s ; \quad a_2^3 = \frac{1}{J L_{eq}} T_s \left((R_{eq}J + B L_{eq}) - (B R_{eq} + k_e k_T) T_s \right) - 1 ;$$

(Eq. 4.29)

$$c_1^3 = \frac{1}{L_{eq}} T_s ; \quad c_2^3 = \frac{T_s}{L_{eq}} \left(\frac{B}{J} T_s - 1 \right) ; \quad d_1^3 = \frac{k_e}{J L_{eq}} T_s^2 ;$$

$$r_4(k) = \Omega_m(k) - b_1^4 \Omega(k-1) - b_2^4 \Omega(k-2) - c_1^4 v_{dcm}(k-1) - d_1^4 t_{Lm}(k-1) - d_1^4 t_{Lm}(k-2)$$

$$b_1^4 = 2 - \frac{R J + B L}{J L} T_s ; \quad b_2^4 = \frac{1}{J L_{eq}} T_s \left((R_{eq}J + B L_{eq}) - (B R_{eq} + k_e k_T) T_s \right) - 1 ;$$

(Eq. 4.30)

$$c_1^4 = \frac{k_T}{J L_{eq}} T_s^2 ; \quad d_1^4 = \frac{1}{J} T_s ; \quad d_1^4 = \frac{T_s}{J} \left(1 - \frac{R}{L_{eq}} T_s \right) ;$$

Observant les expressions dels quatre residus podem extreure que per poder computar-los farien falta les mesures de corrent $i_m(k)$, tensió aplicada $v_{dcm}(k)$, velocitat angular $\Omega_m(k)$ i parell exercit per la càrrega $t_{Lm}(k)$. Però, aquestes dues darreres mesures no s'obtiniran directament si no que la velocitat angular s'estimarà mitjançant la mesura de posició (donada per l'encoder) calculant la seva derivada i el parell exercit per la càrrega es considera conegut o estimat per un experiment lliure de fallada. D'aquesta manera, amb els sensors que utilitza el *servodriver* per realitzar el control automàtic de velocitat/posició es tenen les mesures suficients.

4.4. Diagnosi de fallades

En aquest treball s'han considerat fallades de sensors y fallades de planta i actuador tant elèctriques com mecàniques en motors BLDC. En concret s'han considerat:

- Fallades en sensors: posició (f_θ) i corrent (f_i).
- Fallades en planta (paramètriques): resistència (f_{Req}), inductància (f_{Leq}), fregament mecànic (f_B) i moment d'inèrcia (f_j).
- Fallades en planta (entrades): tensió d'entrada (f_{Vdc}), parell de la càrrega (f_{TLoad}).

La diagnosi d'aquestes fallades es basa en l'avaluació dels 4 residus descrits anteriorment. Aquesta avaluació es divideix en dues etapes: Detecció de fallada i aïllament de fallada. A continuació es descriu el funcionament d'aquestes dues etapes.

4.4.1. Detecció de fallades

La detecció de fallades consisteix en determinar si algun dels quatre residus detecta una inconsistència que pot ser deguda a una fallada. A questa inconsistència pot ser definida per un valor màxim del residu que afiti l'error del model. Així doncs per cada residu es genera el que es coneix com a signatura de fallada observada, un senyal binari ϕ_i $i=1,\dots,4$ que determini si el residu és consistent o no amb l'error del model de la següent manera:

$$\phi_i = \begin{cases} 0 & \text{si } |r_i| \leq \sigma_i \\ 1 & \text{si } |r_i| > \sigma_i \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.31})$$

On σ_i és ell llinard (*threshold* en anglès) que determina la consistència o no del residu amb l'error del model. Per calcular el *threshold* σ_i s'ha de disposar d'un conjunt de dades suficientment representatives del funcionament del motor en situació lliure de fallada. Amb aquestes dades es pot calcular el valor de cada residu y calcular σ_i com el valor absolut màxima d'aquest residu que seria l'error màxim absolut del model. Finalment es calcula un percentatge de seguretat per sobre d'aquest valor calculat en el punt anterior pel qual encara el residu es considera que treballa en règim lliure de fallades. D'aquesta manera es minimitza la probabilitat de tenir falses alarmes en l'etapa de detecció. En el present treball aquest percentatge de seguretat s'ha establert en un 20%. El valor resultant per tant, és el llinard d'aquest residu, i s'aplicarà de forma simètrica com a llinard superior (valors positius) com a llinard inferior (valors negatius).

$$\sigma_i = \left(1 + \frac{\% \text{ de seguretat}}{100}\right) \cdot \max(|r_i|) \quad (\text{Eq. 4.32})$$

Amb el llindar calculat, el sistema està capacitat per poder detectar fallades en elements o paràmetres que intervinguin en aquest residu, degut a que aquestes fallades produiran variacions en el residu que excedeixen els llindars. Es pot parlar per tant, de que s'ha pogut detectar una fallada.

4.4.2. Aïllament de fallades

L'aïllament consisteix en localitzar quin element ha provocat la fallada del sistema a partir de quins residus han experimentat una inconsistència, les quals queden determinades amb la signatura de fallada observada definit anteriorment per la detecció ϕ_i $i=1,\dots,4$. Considerant les fallades definides als quatre residus es pot construir la FSM introduïda al capítol 2.4 i que es mostra en el cas d'aquest treball a la Taula 4.1.

Taula 4.1. Matriu de signatures de les fallades (FSM) considerades en el model motor DC equivalent.

	f_B	f_J	f_{TLoad}	f_{Vdc}	f_{Req}	f_{Leq}	f_θ	f_i
ϕ_1	0	0	0	1	1	1	1	1
ϕ_2	1	1	1	0	0	0	1	1
ϕ_3	1	1	1	1	1	1	0	1
ϕ_3	1	1	1	1	1	1	1	0

Recordem que el comportament teòric de les diferents fallades queda definit per les columnes d'aquesta taula (signatures de fallada) i podem estudiar el grau d'aïllament teòric de les diferents fallades considerades. Com s'observa a la Taula 4.1, dues fallades: f_θ i f_i , tenen una signatura independent de la resta i per tant poden ser aïllades, concloent la diagnosi. Alhora s'observa que hi ha dos grups de fallades: fallades mecàniques (f_B, f_J i f_{TLoad}) i fallades elèctriques (f_{Req}, f_{Leq} i f_{Vdc}) que comparteixen la mateixa signatura de fallada $(0\ 1\ 1\ 1)^t$ i $(1\ 0\ 1\ 1)^t$, de tal manera que amb la matriu binària FSM no es pot aconseguir l'aïllament dintre de les tres fallades de cada tipus. Per resoldre aquesta situació, s'empra un altre recurs: la *sensibilitat de la fallada*. Aquesta s'aplica per mitjà de la derivada parcial d'un dels residus respecte la fallada dels elements els quals comparteixen signatura de fallada.

Tal com queda configurada la FSM, els paràmetres que modelen l'equació electromagnètica que modela el motor equivalent comparteixen la mateixa signatura de fallada (V_{DC}, R_{eq} i L_{eq}). Per realitzar la derivada parcial respecte cada paràmetre, s'emprarà l'equació continua del primer residu en domini temporal:

$$r_1 = R_{eq}i(t) + L_{eq}\frac{di}{dt} + k_e\Omega_r(t) - V_{dc}(t) \quad (\text{Eq. 4.33})$$

Cadascun dels paràmetres que pot esdevenir fallada serà considerat una variable additiva com a fallada:

$$r_1 = (R_{eq} + f_{Req})i(t) + (L_{eq} + f_{Leq})\frac{di}{dt} + k_e\Omega_r(t) - (V_{dc}(t) + f_{vdc}) \quad (\text{Eq. 4.34})$$

Seguidament s'aplica la sensibilitat de cada fallada per determinar quin comportament tindrà el residu en cas de fallada:

$$\frac{\partial r_1}{\partial f_{Req}} = i(t); \quad \frac{\partial r_1}{\partial f_{Leq}} = \frac{di}{dt}; \quad \frac{\partial r_1}{\partial f_{vdc}} = -1 \quad (\text{Eq. 4.35})$$

D'aquesta manera s'aconsegueix diferenciar i, per tant, aïllar cada fallada per localitzar la fallada, com es mostra a la taula següent:

Taula 4.2. Matriu de sensibilitat de les fallades elèctriques considerant el residu r_1 .

	f_{vdc}	f_{Req}	f_{Leq}
r_1	-1	$i(t)$	$\frac{di}{dt}$

D'igual forma, els paràmetres que modelen l'equació mecànica del motor equivalent també tenen la signatura de fallada en comú (B , J i T_{Load}). Per realitzar la derivada parcial respecte cada paràmetre, s'emprarà l'equació continua del primer residu en domini temporal:

$$r_2(t) = B_r w_r(t) + J \frac{dw_r}{dt} - k_T i(t) + T_L(t) \quad (\text{Eq. 4.36})$$

Cadascun dels paràmetres que pot esdevenir fallada serà considerat una variable additiva com a fallada:

$$r_2(t) = (B_r + f_B)w_r(t) + (J + f_J)\frac{dw_r}{dt} - k_T i(t) + (T_L(t) + f_{TLoad}) \quad (\text{Eq. 4.37})$$

Seguidament s'aplica la sensibilitat de cada fallada per determinar quin comportament tindrà el residu r_2 en cas de fallada:

$$\frac{\partial r_2}{\partial f_B} = w_r(t); \quad \frac{\partial r_2}{\partial f_J} = \frac{dw_r}{dt}; \quad \frac{\partial r_2}{\partial f_{TLoad}} = 1 \quad (\text{Eq. 4.38})$$

D'aquesta manera s'aconsegueix diferenciar i, per tant, aïllar cada fallada per localitzar la fallada, com es mostra a la taula següent:

Taula 4.3. Matriu de sensibilitat de les fallades elèctriques considerant el residu r_2 .

	f_B	f_J	f_{TLoad}
r_2	$\omega(t)$	$\frac{d\omega}{dt}$	1

Per tal de comprovar la tendència del comportament del residu i així aproximar-lo a la sensibilitat de fallada que li pertoca, s'empra el recurs matemàtic de la correlació. Aquest recurs utilitza la idea del producte escalar:

$$\cos(\varphi) = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \quad (\text{Eq. 4.39})$$

On:

φ : És l'angle que formen els vectors \vec{u} i \vec{v} .

La idea de la correlació doncs, és comprovar quin cosinus s'obté a partir de dos vectors de dades (de mateixa longitud), sent "1" la millor correlació, ja que suposaria un angle de 0º entre els vectors, és a dir, són vectors proporcionals a partir d'un paràmetre. Les correlacions quedarien per tant de la següent forma:

$$\text{correl}_{\alpha_i} = \frac{r_i \cdot s_{m_i}}{|r_i| \cdot |s_{m_i}|} \quad (\text{Eq. 4.40})$$

$$\text{correl}_{d\alpha_i} = \frac{r_i \cdot s_{deriv_i}}{|r_i| \cdot |s_{deriv_i}|}$$

On:

r_i : És el vector amb les dades del residu corresponent.

s_{m_i} : És el vector amb les dades del senyal mesurat corresponent.

s_{deriv_i} : És el vector calcular a partir de les dades del senyal mesurat corresponent.

D'aquesta manera, si $correl_{\alpha_i}$ és més propera a la unitat que $correl_{d\alpha_i}$, la fallada es troba al paràmetre la sensibilitat del qual és el senyal. Si pel contrari, $correl_{d\alpha_i}$ és més proper a la unitat que $correl_{\alpha_i}$, la fallada es troba al paràmetre la sensibilitat del qual és la derivada del senyal. Si cap de les dues correlacions superés un cert llindar de seguretat (establert de forma empírica) es tractaria d'una fallada la sensibilitat de la qual no depèn del senyal mesurat.

A causa de les pertorbacions o soroll existent en l'entorn, el residu es veu afectat per variacions de poca amplitud, les quals afecten de manera crítica quan es calcula la derivada d'una variable. En aquest punt es fa necessari una etapa de filtratge passa baixos, com es mostra a la figura d'exemple (Figura 4.5).

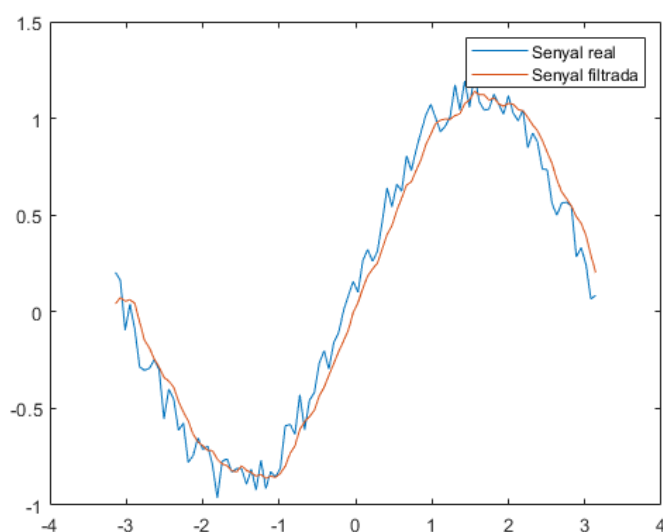


Figura 4.5. Filtratge d'un senyal per eliminar l'arissada.

El tipus de filtre escollit ha estat el filtre de Butterworth passa baixos, ja que l'autoria d'aquest treball l'havia treballat anteriorment, a més de la ja coneguda eficàcia i bon resultat que s'aconsegueix amb aquest filtre. És pertinent mostrar els detalls del disseny d'aquest filtre, on a partir d'un ordre especificat com "n" i la freqüència de tall normalitzada " w_n ", es determina la funció de transferència del filtre.

4.5. Algorisme FDI

En aquesta secció es descriu un algorisme que permetrà implementar les etapes de detecció i aïllament descrites a la secció anterior en un computador mitjançant un programa informàtic escrit en qualsevol llenguatge de programació. A més aquest algorisme té en compte possibles problemes pràctics no contemplats a la teoria com: Quan es produeix una fallada no tots els residus que es veuen afectats per aquesta fallada s'activen al mateix temps ni tots s'activen de manera persistent. O quan es produeix una fallada que té la mateixa signatura d'altres fallades la correlació amb les diferents hipòtesis (sensibilitats de fallada) amb els residus s'haurà d'avaluar en una finestra temporal suficientment ampla per poder fer un bon aïllament. L'amplada d'aquesta finestra dependrà de la riquesa d'excitació del motor en el moment de la detecció de la fallada.

Aquest algorisme requereix l'entrada d'unes dades: els quatre residus (r_i), els quatre llimars (σ_i) i el senyal del corrent mesurat (i_m) així com la variable de la velocitat (ω_m) estimada a partir de la mesura de la posició. Aquestes dues darreres mesures permeten calcular les diferents sensibilitats de fallades utilitzades a l'aïllament.

La primera part de l'algorisme consisteix en la detecció d'una possible fallada. Per a tal tasca s'ha de generar un vector columna de quatre files (4x1) de zeros el qual seguidament serà modificat en funció de la condició si cap residu excedeix el seu llimar. Aquest vector representa la signatura de fallada observada (ϕ), explicat anteriorment. Aquestes condicions seran avaluades en un bucle fins que un dels quatre elements del vector sigui passi a 1, és a dir, un residu excedeixi el llimar. Es conclou que existeix una fallada i s'ha detectat.

Tot seguit, la segona part de l'algorisme pretén classificar la fallada segons els llimars que han estat excedits. Aquesta idea sorgeix de la simplificació de la FSM, ja que s'observa que hi ha quatre signatures de fallada diferents i dues d'aquestes ja permeten aïllar fallada. Aquestes dues signatures són la tercera i la quarta fallada, que defineixen, respectivament, una fallada localitzada al sensor de posició f_θ o *encoder* i una fallada localitzada al sensor de corrent f_i . La Taula 4.4 recull la simplificació de la matriu binària FSM.

Taula 4.4. Matriu dels quatre tipus de signatura de fallada existents.

	<i>fallada</i> ₁	<i>fallada</i> ₂	<i>fallada</i> ₃	<i>fallada</i> ₄
ϕ_1	1	0	1	1
ϕ_2	0	1	1	1

ϕ_3	1	1	0	1
ϕ_4	1	1	1	0

Per poder determinar el tipus de fallada es genera un vector columna de quatre files (4x1) de 1, el qual recull la hipòtesi de fallada (fh). Cada posició d'aquest vector serà modificada depenent si el residu amb el mateix subíndex ha excedit el seu llindar o no, passant a 0 el valor d'aquesta posició en el vector fh en cas afirmatiu. Aquesta avaluació es torna a fer en bucle fins que només resti una posició amb valor unitari. La Taula 4.5 exposa la idea de cada fallada en funció del vector d'hipòtesi de fallada.

Taula 4.5. Matriu d'hipòtesi de fallada.

	$fallada_1$	$fallada_2$	$fallada_3$	$fallada_4$
fh_1	1	0	0	0
fh_2	0	1	0	0
fh_3	0	0	1	0
fh_4	0	0	0	1

Un cop finalitzat la determinació del tipus de fallada, l'algorisme escull el cas en què es troba la fallada, sent el tercer i quart tipus, casos on ja es determina l'aïllament de la fallada com ja s'ha esmentat anteriorment. Cadascun dels altres dos tipus de fallades engloben tres fallades: el primer tipus de fallada recull la signatura dels elements electromagnètics (f_{Req}, f_{Leq} i f_{Vac}), mentre que el segon tipus de fallada recull al signatura dels elements mecànics (f_B, f_J i f_{Tload}).

En aquesta última part, l'algorisme únicament es centrarà en el primer i segon tipus de fallada. És en aquesta part on s'utilitza el senyal mesurat del corrent o de la velocitat, depenent si la fallada es troba en el primer tipus o en el segon, respectivament. Cal puntualitzar el fet que tant el residu, com el senyal mesurat i la seva derivada, passen per una etapa de filtratge per tal de pal·liar el possible soroll que contenen i que, de si no es realitzés, el càlcul de la correlació quedaria falsejat, posant èmfasi en la derivada. S'empra el filtre de Butterworth en aquesta etapa, el qual s'ha explicat anteriorment.

A partir del senyal mesurat, es pot aproximar el càlcul de la derivada d'aquest, de tal manera que mitjançant el recurs matemàtic de la correlació es podrà diferenciar si el comportament del residu es troba més pròxim al senyal mesurat ($\alpha_j \forall j = 1,2$), a la derivada d'aquest ($\beta_j \forall j = 1,2$), o pel

contrari no s'assembla a cap; aconseguint l'aïllament dels tres paràmetres que compartien signatura de fallada. Per tal d'evitar possibles mal interpretacions dels resultats per part de l'algorisme a causa de la mida de la finestra, dos llindars $(\lambda_j^{sup}, \lambda_j^{inf} \forall j = 1,2)$ seran els encarregats d'augmentar la mida de la finestra mentre la major de les dues correlacions es trobi en l'interval dels llindars, aconseguint quan surti d'aquest interval una fiabilitat en el resultat molt major però, per contra, sacrificant temps necessari per a l'adquisició de dades de la finestra.

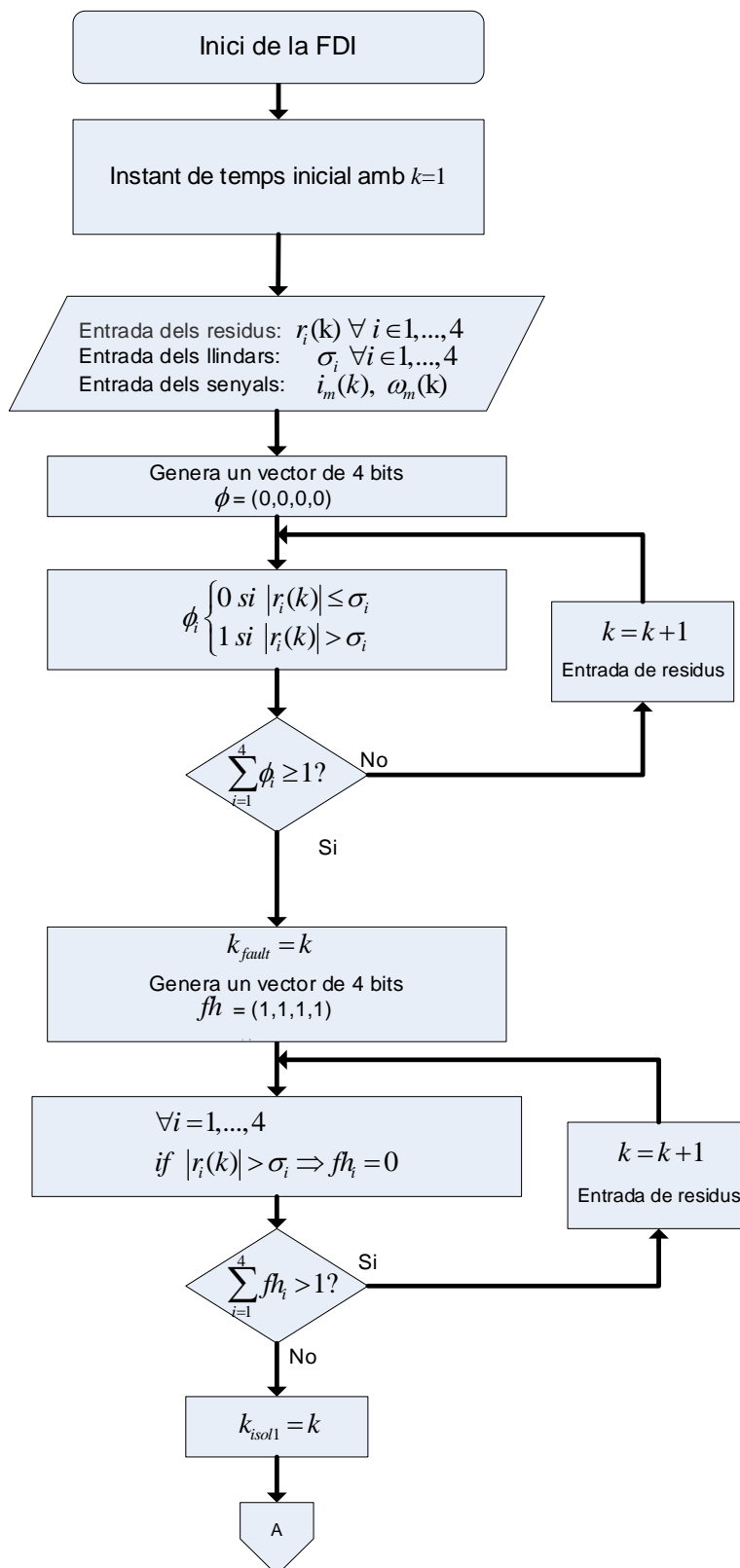


Figura 4.6. Diagrama de flux de l’algorisme FDI (Part 1/4): Detecció de fallada i aïllament per FSM.

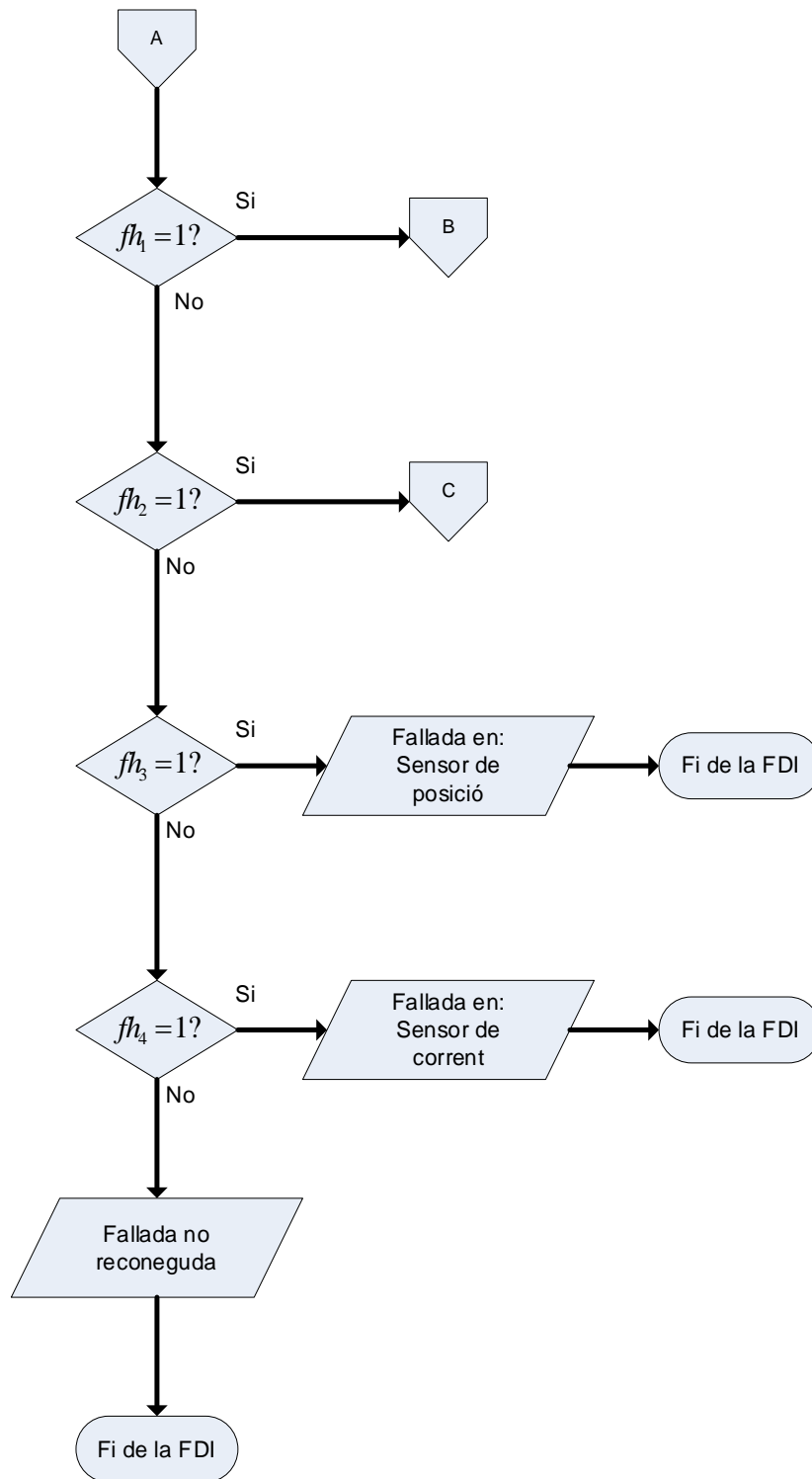


Figura 4.7. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 2/4): Classificació per FSM i aïllament de dues fallades.

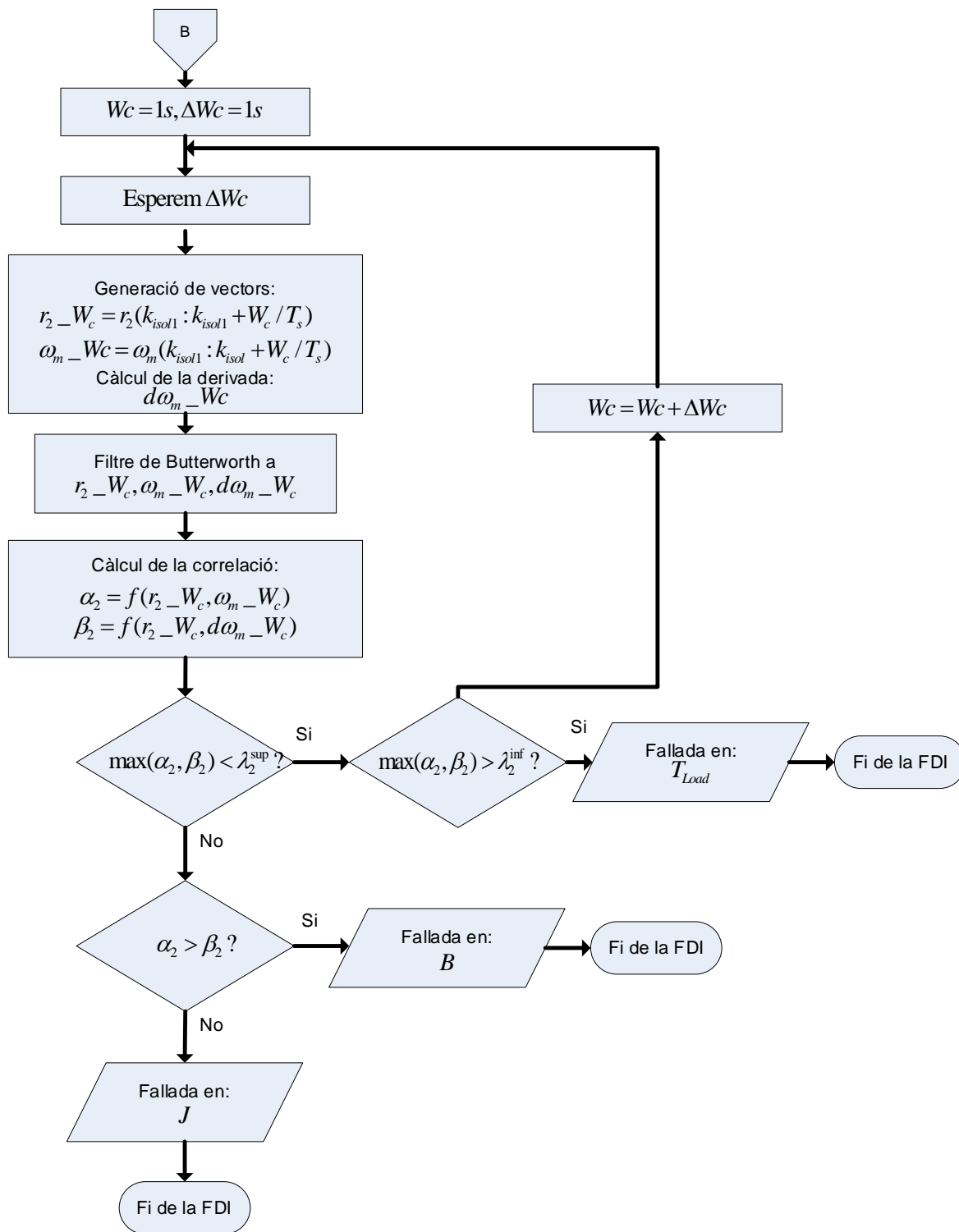


Figura 4.8. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 3/4): Aïllament de les tres fallades mecàniques a partir de la sensibilitat de fallada.

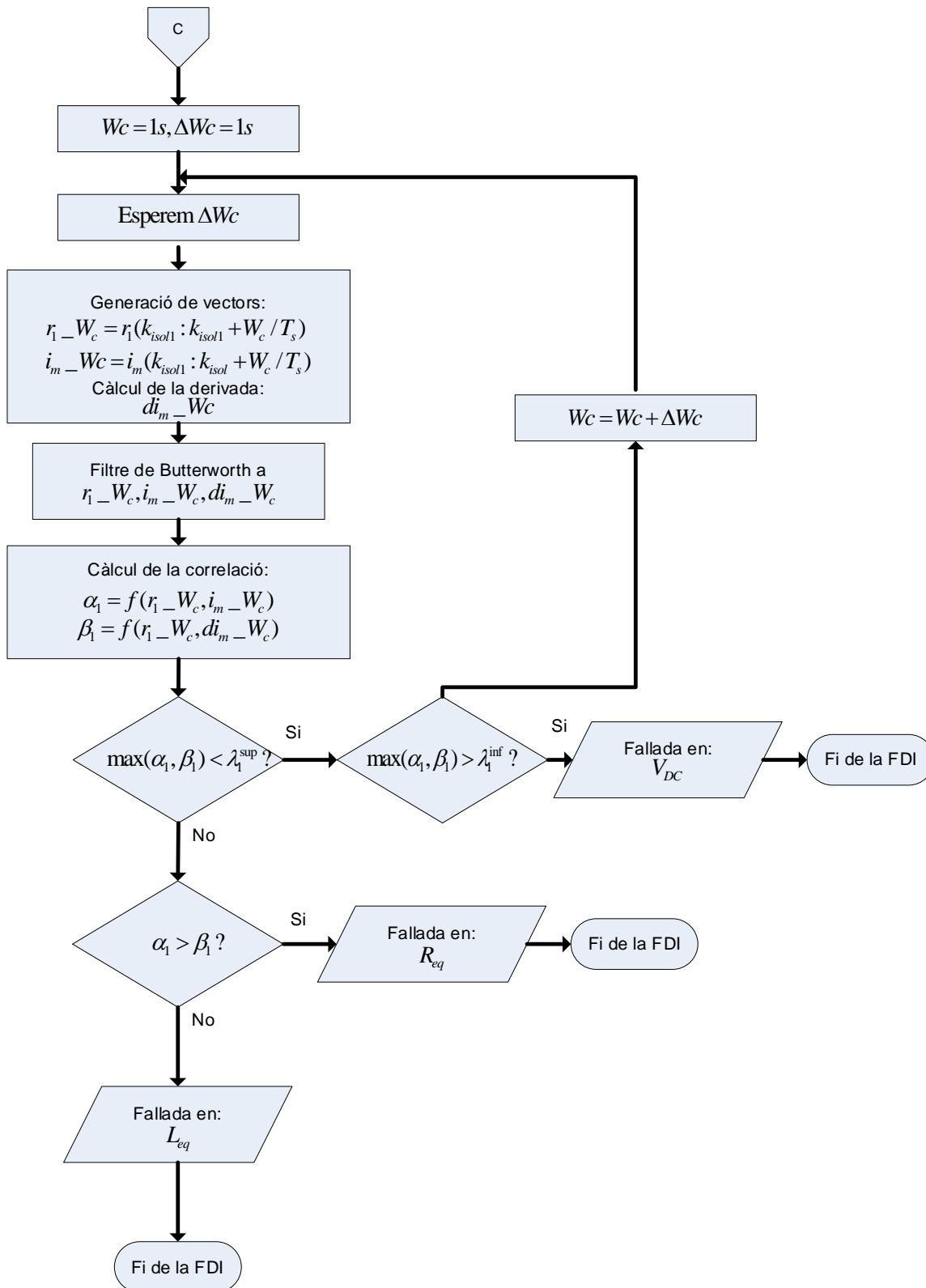


Figura 4.9. Diagrama de flux de l'algorisme FDI (Part 4/4): Aïllament de les tres fallades elèctriques a partir de la sensibilitat de fallada.

5. Simulador en MATLAB®/Simulink

Amb la finalitat de provar en primera instància el funcionament del sistema diagnòstic de fallades, s'ha desenvolupat un Simulador de la planta real a supervisar en l'entorn MATLAB®/Simulink basat en el model Motor-DC equivalent descrit al Capítol 4.2 tenint en compte les dades del motor real. Per tal de fer un simulador el més realista possible s'han tingut en compte toleràncies en components, sorolls en les mesures dels sensors i totes les fallades descrites al Capítol 4.4 que es poden produir de manera abrupta (en forma de graó) o incipient (en forma de rampa). A la Figura 5.1 es mostra l'esquema del model Motor-DC equivalent del simulador on es mostra la connexió de tots els seus components implementats mitjançant blocs Simulink.

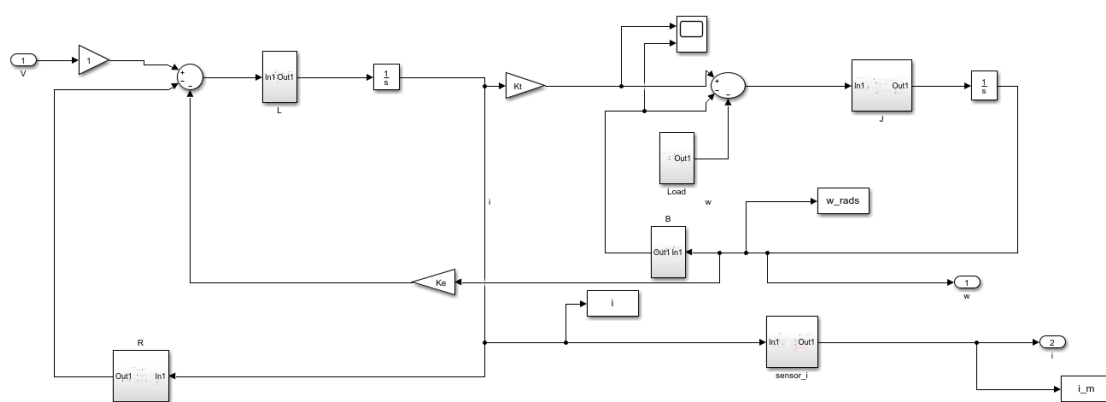


Figura 5.1. Planta del motor DC equivalent creada en MATLAB®/Simulink per la realització de simulacions.

Seguidament s'examina cada bloc per conèixer l'estructura interna i quins elements el componen.

Els primers elements a examinar l'interior són blocs que implementen els components de les equacions que modelen el motor DC: R, B, L i J. Es mostra com a exemple l'estructura del bloc corresponent al component de la resistència R, estructura idèntica al component del coeficient de fregament B a la Figura 5.2. Es pot observar tres parts diferenciades que convergeixen en un sumador: el valor del component R nominal, la incertesa deguda a la tolerància del component i la fallada que en un determinant instant actuarà de forma abrupta o incipient. El resultat d'aquest sumador multiplicarà l'entrada que, en aquest cas, és el corrent.

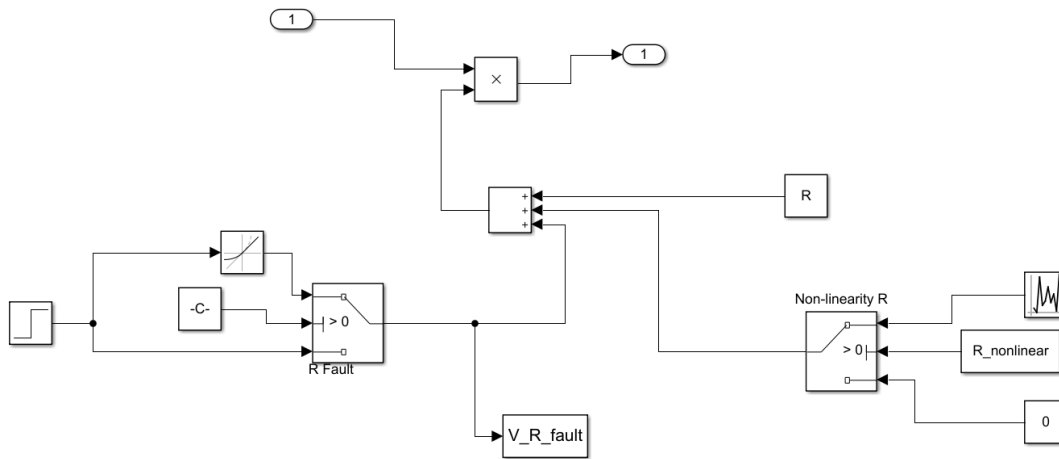


Figura 5.2. Interior del bloc de la resistència R equivalent, on es diferencien tres parts: el valor de la resistència, la tolerància d'aquesta i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient.

De manera similar, l'estructura del component de la inductància L i la del component del moment d'inèrcia J són idèntiques. Aquesta darrera es mostra a la Figura 5.3 i es divideix en les tres parts mencionades anteriorment. A diferència de l'anterior estructura, aquest sumador dona com a resultat el valor pel qual es divideix l'entrada d'aquest bloc que, en aquest cas, és el parell generat.

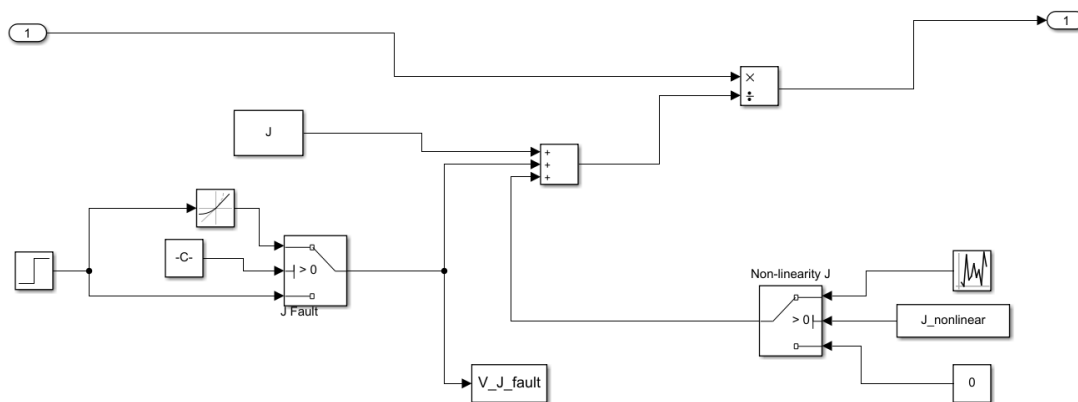


Figura 5.3. Interior del bloc de la inèrcia J , on es diferencien tres parts: el valor de la inèrcia, la tolerància d'aquesta i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient.

Per últim també el paràmetre $T_L(s)$ corresponent a la càrrega, amb el seu valor nominal, paràmetres d'incertesa i paràmetres de fallada. L'estructura del diagrama que es proposa per aquest paràmetre es mostra a la Figura 5.4.

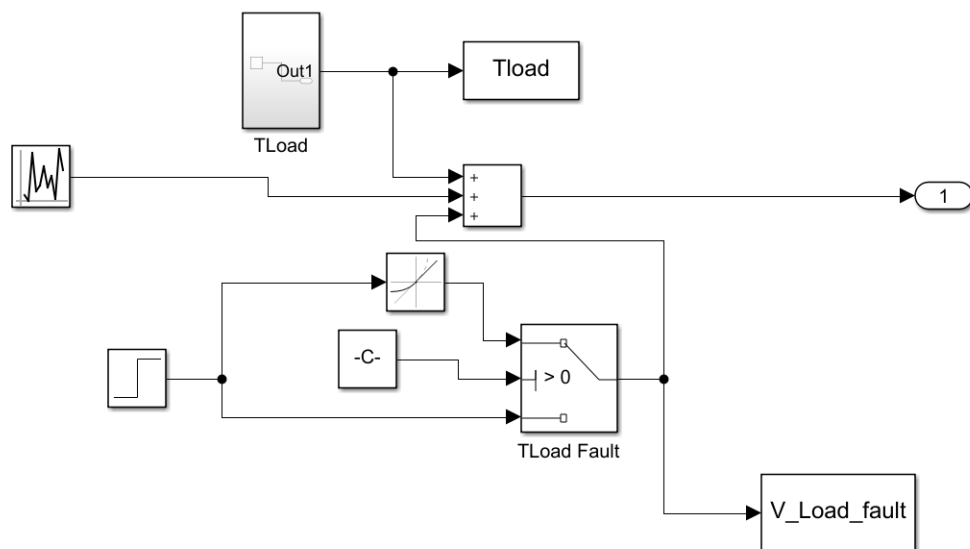


Figura 5.4. Interior del bloc de la càrrega TLoad, on es diferencien tres parts: el valor nominal de la càrrega, la seva incertesa i la part que governa la fallada que pot ser abrupta o incipient.

El bloc que es situa a l'entrada del model recull l'estructura que permet generar la fallada del voltatge d'entrada. Aquest bloc compta amb una estructura idèntica a la del bloc de la càrrega, però substituint el bloc generador de valors uniformes aleatoris pel que seria l'entrada d'aquest bloc, és a dir, el voltatge (V_{dc}).

Un altre element que s'observa és el sensor de corrent. Aquest és un transductor que, en aquest cas concret, a través de la caiguda de voltatge en una resistència, de valor relatiu envers el sistema negligible, calcula el valor del corrent. Aquest, no està exempt de fallada ni de incertesa en aquest cas degut al soroll en la mesura.

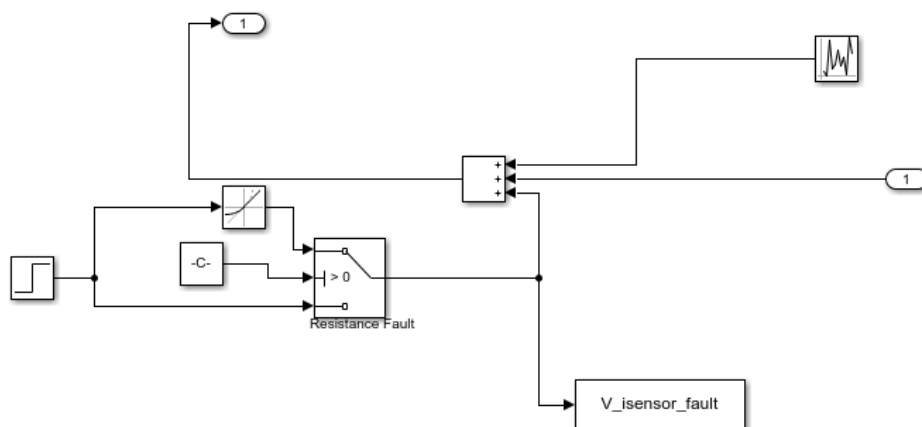


Figura 5.5. Interior del bloc del sensor de corrent, on es diferencien dues parts que es sumaran a la mesura del corrent: un soroll variant i la fallada que pot ser abrupta o incipient.

Totes les estructures anteriorment observades contenen la part de la generació de la fallada. Aquesta es produeix en un determinat instant i , de manera abrupta o incipient que es superposa al valor nominal i la incertesa. Al programari “Simulink” s'utilitza un bloc *Step* per generar la fallada i determinar la magnitud d'aquesta. Depenent de l'entrada d'activació del bloc *Switch* la fallada s'aplicarà directament de forma abrupta o mitjançant un bloc *Rate Limiter* que aplicarà una fallada incipient.

L'altra part que representa la tolerància dels diferents components o soroll en mesura que s'empren es genera amb el bloc *Uniform Random Number*.

Un últim element, aquest posicionat externament al motor, pot ocasionar fallada en el sistema. És el cas del sensor de posició o *encoder*.

L'*encoder* és un transductor que transforma el moviment mecànic en senyal elèctric (bits) i està definit pel nombre de polsos per volta, en aquest cas, 1024 polsos per volta. Aquest element no està exempt de possibles fallades, essent l'omissió d'algun pols la més comuna i, per tant, la que s'estudiarà en apartats posteriors respecte a aquest element. Al ser un *encoder* òptic les incerteses degudes a sorolls de mesura es poden considerar negligibles. Encara que en la realitat aquest transductor actua obtenint informació de la posició, s'utilitza per calcular la velocitat. Per tant, el model d'aquest bloc té com a entrada la velocitat i realitza les conversions necessàries per obtenir el valor de la posició angular θ_r amb una precisió de 1024 polsos per volta. Aquest sensor de posició permet conèixer la velocitat estimada (w_{est}) en tot moment amb una molt bona precisió.

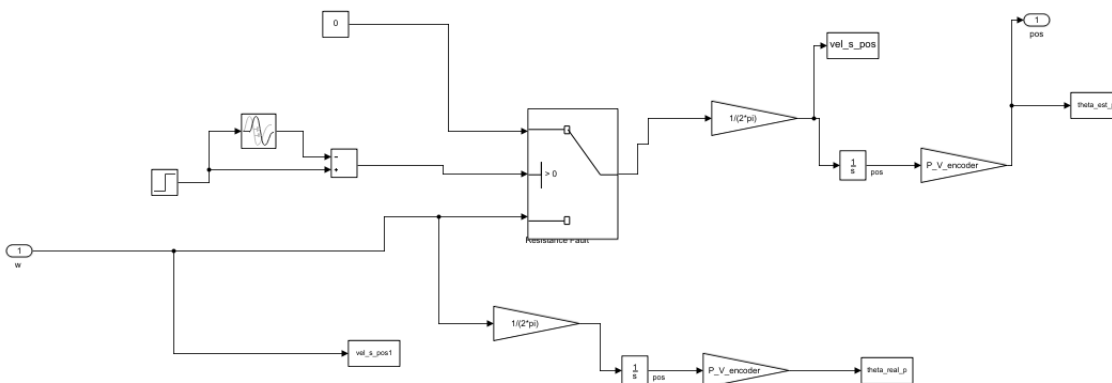


Figura 5.6. Interior del bloc de l'*encoder*, on s'observa com actua aquesta única fallada, de tipus abrupta, a partir d'un bloc d'allargament de temps que farà que el sensor llegeixi nul.

Pel que fa a la fallada a l'*encoder*, al software “Simulink” s'utilitza el bloc *Step* unitari juntament amb la resta del mateix graó aplicat a un bloc *Transport Delay* generant un pols d'una duració determinada

que activa el bloc *Switch*, el qual permet desconnectar el sensor de posició de la velocitat d'entrada durant aquest temps tal i com es detalla a la Figura 5.6.

Finalment, el motor funciona dins d'un sistema retroalimentat que permet el control de posició o velocitat programat al controlador del motor (*driver*) i al simulador desenvolupat s'han tingut en compte aquestes configuracions. A la Figura 5.7 es mostra l'esquema del simulador del sistema controlat amb control de velocitat on s'utilitza una estructura en cascada de dos reguladors *Proportional-Integer (PI)*. El bloc "DC-motor" es correspon al model de Motor DC equivalent explicat anteriorment. En aquesta figura també apareix el bloc del sistema supervisor implementat en MATLAB®. En aquesta mateixa figura també s'inclou un bloc *Matlab Function* el qual conté l'algorisme FDI presentat en aquest treball.

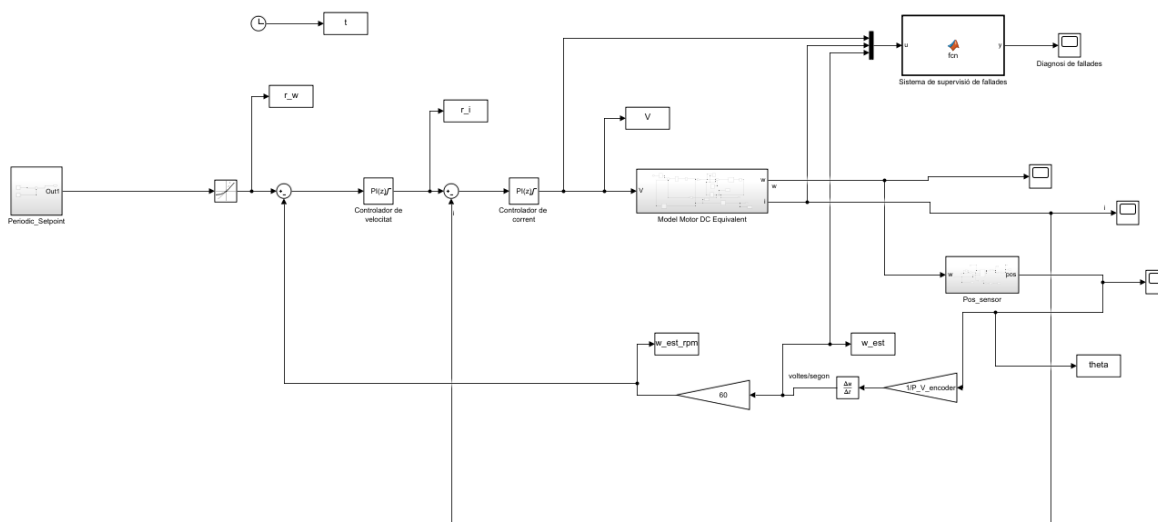


Figura 5.7. Diagrama de blocs general de tot el sistema amb control de velocitat mitjançant dos controladors *PI* en cascada.

6. Resultats i discussió

En els anteriors capítols s'han presentat les metodologies seguides per estudiar la diagnosi de diferents fallades d'un motor BLDC utilitzant el model equivalent DC i com s'ha implementat un model realístic en l'entorn MATLAB® i Simulink. Aquest capítol té la intenció de mostrar els resultats obtinguts aplicant les metodologies utilitzant escenaris de fallades realistes al simulador.

Els valors utilitzats per a la simulació han sigut els corresponents al *datasheet* del motor tipus BLDC de Crouzet objecte d'estudi, que és el model 801405. El fet que el model sigui d'un motor DC i no el tipus de motor que correspon al *datasheet* ha requerit realitzar una equivalència entre el valor dels paràmetres d'un i altre per tenir concordança en les accions preses. A la Taula 6.1 es mostren els paràmetres amb els valors i les unitats que es corresponen amb el model equivalent DC.

Taula 6.1. Paràmetres generals del model del motor DC equivalent.

Paràmetre	Valor	Definició
R_{eq}	$3,44 \Omega$	Resistència equivalent del motor tipus brushless
L_{eq}	$7,6 \cdot 10^{-3} H$	Inductància equivalent del motor tipus brushless
k_e	$74,5 \cdot 10^{-3} \frac{V}{rad/s}$	Constant electromagnètica
B	$3,2 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{rad/s}$	Fregament mecànic
J	$5 \cdot 10^{-6} kgm^2$	Moment d'inèrcia
k_T	$74,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{A}$	Constant mecànica
$PV_{Encoder}$	1024 <i>polsos</i>	Polsos per volta de l' <i>encoder</i>
T_S	$10^{-4} s$	Temps de mostreig
$T_{SIMULACIÓ}$	100 <i>s</i>	Temps de simulació

Per crear cadascun dels escenaris i poder fer un estudi exhaustiu de cada fallada, es declaren seguit dels paràmetres del model les variables que governen les fallades i la inserció de toleràncies

(incerteses) amb l'objectiu d'obtenir un model més pròxim a la realitat. La Taula 6.2 explica les variables generals que governen paràmetres de configuració de les fallades així com el temps de predicció. A la taula Taula 6.3 es declara la magnitud, la velocitat en el cas de fallada incipient i la tolerància de cada paràmetre on pot existir fallada.

Taula 6.2. Variables de configuració del simulador i predictor.

Variable	Valor	Definició
$t_{fallada}$	10 s	Temps en que es genera la fallada
$t_{predicció}$	<i>inf</i>	Nombre de passos que l'eina <i>Predict</i> de MATLAB® utilitza per fer prediccions.
$ramp_f_X$	0: <i>abrupta</i> ; 1: <i>incipient</i>	Indica si la fallada en X és abrupta o incipient

Taula 6.3. Configuració de les fallades i toleràncies: magnitud, velocitat (incipients) i tolerància del paràmetre.

Paràmetre	Magnitud de fallada	Velocitat de fallada	Tolerància del paràmetre
f_{Req}	3,44 Ω	0,01 Ω/s	5 %
f_{Leq}	$7,6 \cdot 10^{-2} H$	0,1 H/s	5 %
f_{Vdc}	7 V	0,1 V/s	—
f_B	$6,4 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{rad/s}$	$0,1 \frac{Nm}{rad}$	5 %
f_J	$5 \cdot 10^{-4} kgm^2$	5 kgm^2/s	5 %
f_{TLoad}	0,1 Nm	0,1 Nm/s	0,05 Nm
f_{θ}	0	1 s	—
f_i	1 A	0,01 A/s	0,07 A

Un cop definit tots els paràmetres i funcions que es requereixen a l'inici, es procedeix a simular el sistema, en un escenari lliure de fallades, on inicialment s'observarà el correcte funcionament del motor observant les dues variables d'interès: el corrent i la velocitat. Cal remarcar que aquestes són, en essència, les variables que en el sistema real es llegirien per fer la supervisió del motor.

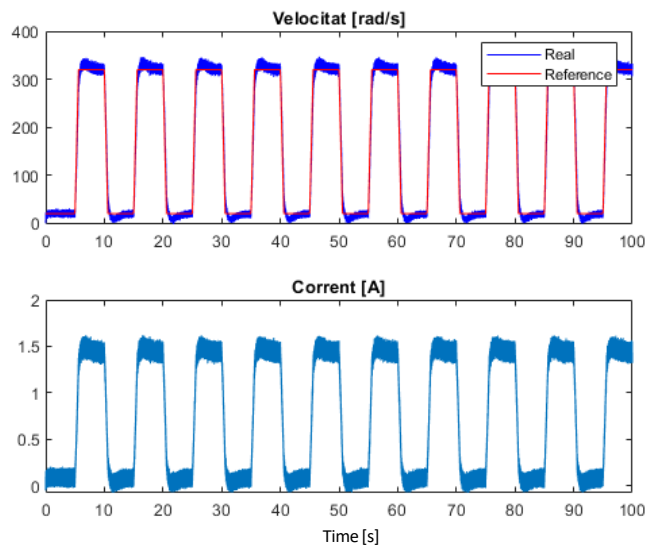


Figura 6.1. Funcionament del sistema en règim nominal lliure de fallades.

Seguint l'exposat a la metodologia, la forma ARMA presenta el residu com la diferència entre el valor mesurat i el valor estimat, aquest darrer, per facilitat i eficiència, es troba al simulador a partir del recurs "predict" de MATLAB, ja sigui per la variable de la velocitat com pel corrent. Aquest procediment es realitza en l'escenari lliure de fallades però considerant incerteses en components i mesures. El valor del llindar de cada residu s'ha calculat com s'explica a la metodologia. La Taula 6.4 mostra els valors dels llindars (simbolitzat amb σ) dels quatre residus.

Taula 6.4. Valor dels llindars dels residus.

$ \sigma_1 $	$ \sigma_2 $	$ \sigma_3 $	$ \sigma_4 $
0,1139 (A)	3,3294 (rad/s)	0,1176 (A)	2,4472 (rad/s)

Les figures Figura 6.2 - Figura 6.4 mostren el resultat obtingut per cada residu.

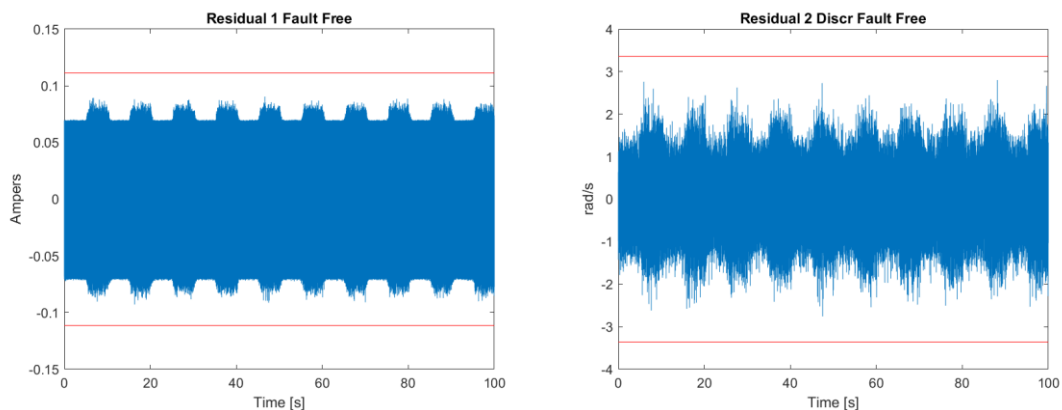


Figura 6.2. i Figura 6.3. Residu 1 i Residu 2, respectivament, en escenari lliure de fallades.

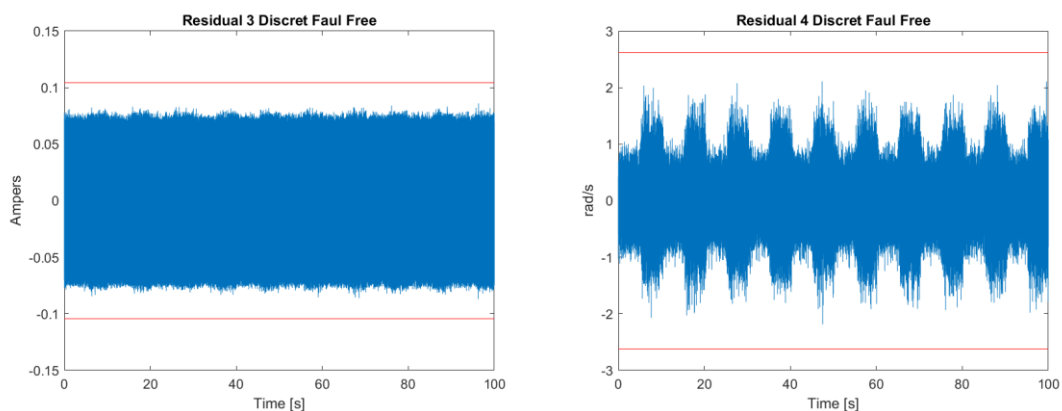


Figura 6.4. i Figura 6.5. Residu 3 i Residu 4, respectivament, en escenari lliure de fallades.

Pel que fa el filtre de Butterworth utilitzat a l'algorisme FDI, queda configurat sent un filtre de Butterworth de segon grau ($n = 2$) amb una freqüència de tall de $W_n = 20$ Hz.

S'ha de mencionar també els casos de les fallades de tipus 1 i 2, elèctriques i mecàniques, respectivament, els quals per aïllar cada fallada s'empra la sensibilitat de fallada, ja que la *FSM* no té suficient criteri per aïllar les fallades. Aquesta s'implementa a l'algorisme mitjançant el recurs de la correlació, explicat prèviament al Capítol 4. Per tal de fer robust l'algorisme es van determinar uns llindars entre els quals si la correlació major es trobava, s'havia d'augmentar la finestra de correlació fins que pogués sortir d'aquesta finestra, és a dir, determinar si es tendeix a aproximar-se a la unitat o a zero. La següent taula mostra el valor dels llindars d'aquestes situacions, els quals s'han determinat empíricament:

Taula 6.5. Llindars de determinació de la tendència de correlació.

Tipus de fallada (f_h)	Llindar inferior (λ_i^{inf})	Llindar superior (λ_i^{sup})
1 (mecàniques)	0,75	0,9
2 (elèctriques)	0,25	0,9

Un cop calibrats tots els paràmetres del sistema de detecció i aïllament s'ha comprovat el funcionament d'aquests en tots els escenaris de fallada definits i considerant tant el tipus abrupte i incipient. A continuació es mostraran els resultats obtinguts per 5 de les 8 fallades estudiades: fallada en el fregament mecànic (f_B), a la inductància (f_{Leq}), a la tensió d'entrada (f_{Vdc}) i al sensor de corrent (f_i) i fallada *encoder* (f_θ). En aquest darrer cas només s'ha tingut en compte la fallada de tipus abrupte ja que la fallada incipient no té sentit en fallada de *encoder*. Les 3 fallades restants no aporten informació diferent a les fallades que a continuació es mostren, ja que la fallada en la resistència (f_{Req}) experimenta un comportament tant pel que fa als residus com pel que fa a la resolució de la correlació similars a la fallada en el fregament mecànic, mateixa situació té la fallada en el moment d'inèrcia (f_j) amb la fallada en la inductància, o la fallada en el parell de la càrrega (f_{TLoad}) amb la fallada a la tensió aplicada al motor. Els programes MATLAB® que permeten la simulació dels diferents escenaris de fallades i l'algorisme de diagnosi s'han inclòs a l'Annex D: Codi en MATLAB® (.m) del simulador del Motor DC equivalent al BLDC i l'Annex E: Codi en MATLAB® (.m) de l'algorisme FDI per la diagnosi de fallades.

Amb tots aquest paràmetres els residus definits així com els seus llindars en escenari lliure de fallades, es procedeix a avaluar cadascuna de les fallades que es volen estudiar. Per tal de verificar de manera àmplia i robusta el funcionament del programa creat per a detectar i diagnosticar fallades es mostren cinc escenaris, primer amb fallades abruptes seguides dels mateixos escenaris amb fallades incipients. En aquest segon cas, no es contempla la fallada del sensor de posició o *encoder* (f_θ) com a fallada incipient ja que no té sentit. A part de l'escenari amb fallada al sensor de posició, els altres quatre escenaris contemplem fallada en el fregament mecànic (f_B), a la inductància (f_{Leq}), a la tensió d'entrada (f_{Vdc}) i al sensor de corrent (f_i).

6.1. Fallades abruptes

Escenari 1: Fallada en el fregament mecànic B

En aquest escenari es configura la fallada amb una magnitud equivalent al doble del mateix valor nominal del fregament mecànic ($f_B = 6,4 \frac{Nm}{rad/s}$) el qual s'indica a la Taula 6.3. A la Figura 6.6 es mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant $t_f = 10$ s la fallada s'activa de manera abrupta.

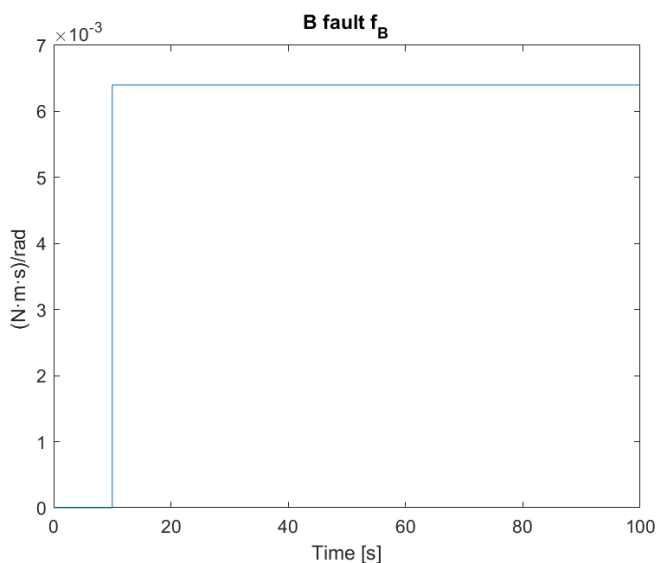


Figura 6.6. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en el fregament mecànic B a l'instant $t_{fault} = 10$ s.

A la Figura 6.7 es mostren els quatre senyals corresponents al voltatge aplicat al motor, el corrent mesurat, la posició mesurada i la velocitat calculada a partir de la posició mesurada.

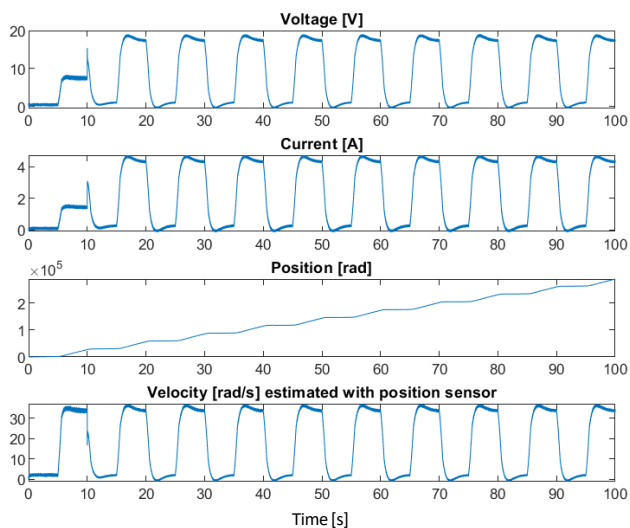


Figura 6.7. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en el fregament mecànic B.

En aquests senyals s'observa com a l' instant de la fallada ($t_f = 10$ s) existeix un pic tant en la tensió d'entrada com en el conseqüent corrent. Això es deu al fet que un augment del fregament mecànic exigeix al controlador a augmentar la tensió d'entrada de la planta i, com a conseqüència, el corrent. També es pot apreciar a la velocitat una singularitat a l' instant de fallada. Altre fet a considerar és que l'augment del fregament mecànic implica una atenuació de les ondulacions que formen part del sistema a causa de l'entrada de perturbacions o incerteses que poden tenir toleràncies.

No obstant això, on es veu més clar l'efecte de la fallada és amb els senyals dels quatre residus generats que a més ens permeten fer la detecció i aïllament de la fallada. Aquests quatre residus calculats amb els senyals anteriors juntament als seus llindars associats es mostren a les figures Figura 6.8 - Figura 6.10.

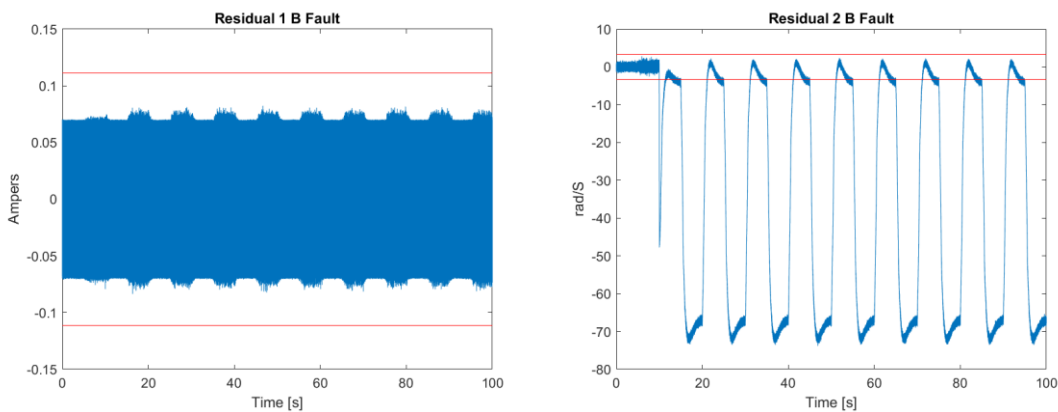


Figura 6.8. i Figura 6.9. Residu 1 i Residu 2 en escenari de fallada abrupta en el fregament mecànic B.

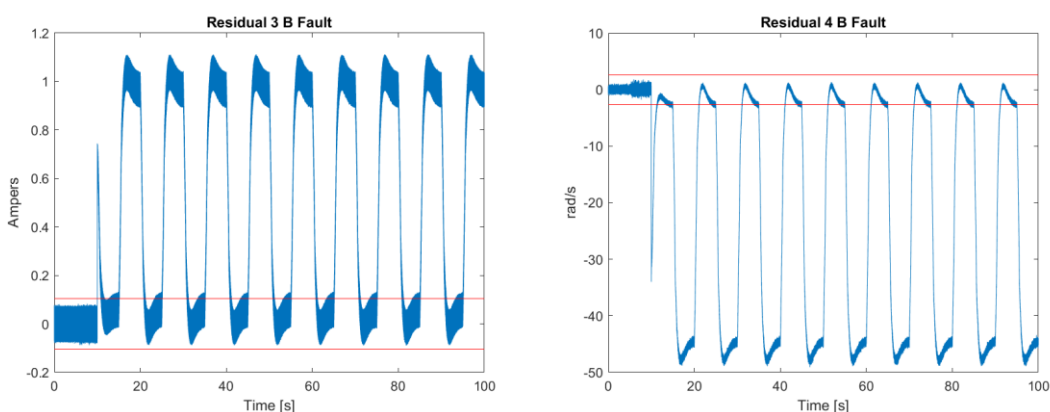


Figura 6.10. i Figura 6.11. Residu 3 i Residu 4 en escenari de fallada abrupta en el fregament mecànic B.

Es verifica amb la idea exposada a la metodologia, ja que s'han excedit el segon, tercer i quart residu mentre que el primer no s'ha vist alterat i és que aquesta fallada forma part de les fallades de segon

tipus, és a dir, de tipus mecàniques. Aquesta signatura de fallada ($\phi = (0,1,1,1)$) és compartida per altres dues fallades i per tant, a priori, no es podria aïllar el paràmetre que ha produït la fallada. En tant que a l'observació de la forma dels residus alterats es pot aproximar a la forma de la velocitat de consigna.

En aquest instant s'escull el segon residu ja que és significatiu en fallades mecàniques. Primerament es filtra el segon residu juntament amb el senyal de la velocitat i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal de la velocitat.

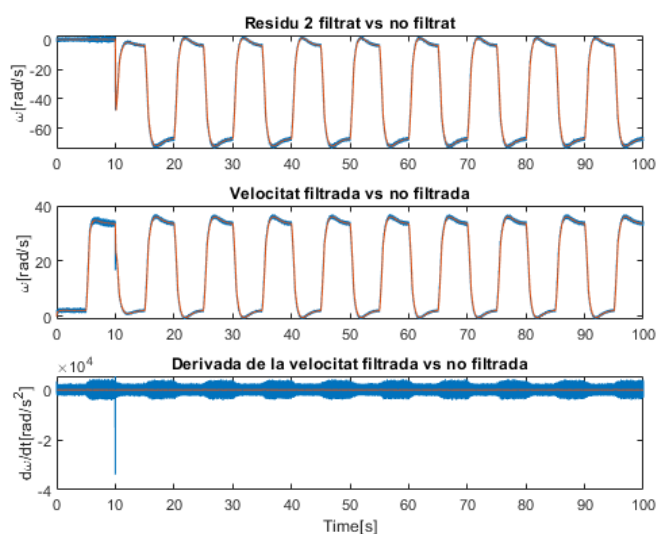


Figura 6.12. Filtratge del residu 2, el senyal de la velocitat i la derivada de la velocitat.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra de $W_{correl} = 1$ s per realitzar la correlació. La Figura 6.13 mostra la finestra emprada en aquest escenari i es pot observar la similitud entre el segon residu i el senyal de la velocitat amb una correlació de 0,928. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{detec} = 0,2$ ms per detectar, $t_{isolFSM} = 0,8$ ms per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura i, al ser de segon tipus (mecànica) i compartir signatura, requereix esperar un temps de $W_{correl} = 1$ s per calcular la correlació del segon residu amb el senyal de la velocitat; obtenint un temps total de $t_{diagnosi} = 1,001$ s.

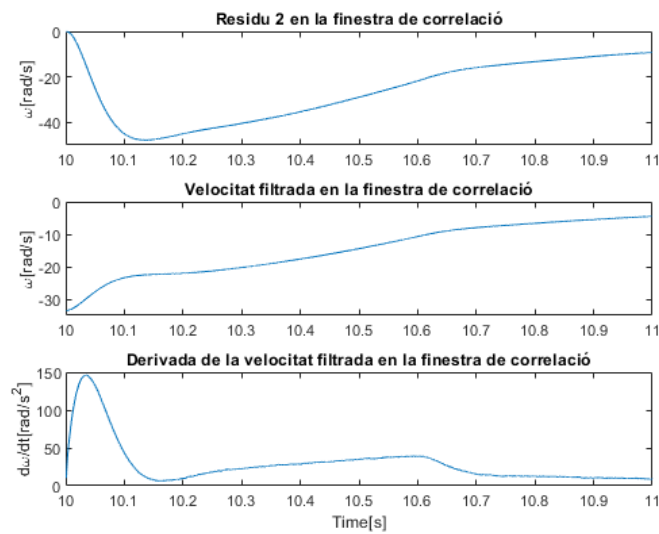


Figura 6.13. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 2 i la velocitat.

Escenari 2: Fallada en la inductància L_{eq}

En aquest escenari es configura la fallada amb una magnitud equivalent a deu vegades el valor nominal de la inductància equivalent ($f_{Leq} = 7,6 \cdot 10^{-2} H$). La Figura 6.14 mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant on a l'instant $t_f = 10$ s s'activa de manera abrupta.

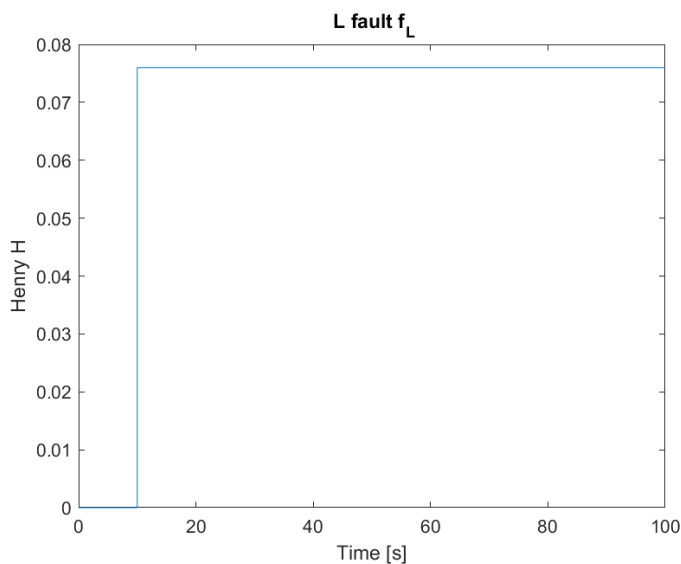


Figura 6.14. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en la inductància equivalent L_{eq} a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en l'escenari anterior: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

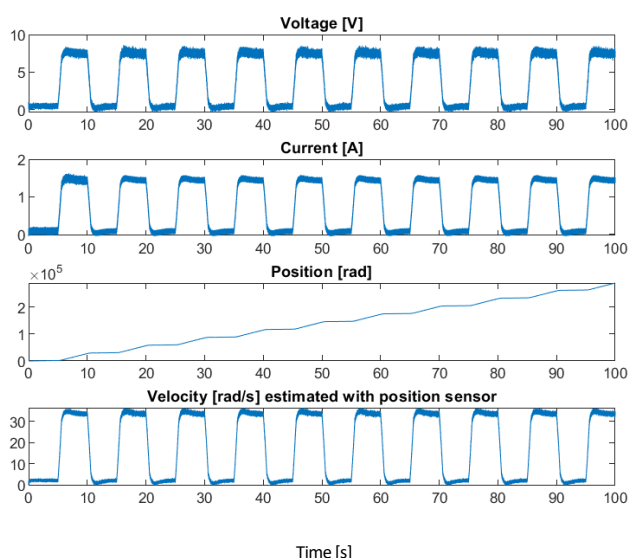


Figura 6.15. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10 \text{ s}$) a la inductància equivalent L_{eq} .

S'observa als senyals com a partir de l'instant de la fallada ($t_f = 10 \text{ s}$) les ondulacions del corrent s'atenuen a causa l'augment de la inductància. Per contra sí que es pot apreciar un sensible augment en l'arribada de la tensió d'entrada perquè el controlador força que el corrent es mantingui en un cert nivell. No s'observen alteracions en la posició i, per tant, en la velocitat.

Com a l'anterior escenari, l'efecte de la fallada s'aprecia amb major detall a través dels quatre residus generats, que permeten, a més, la detecció i l'aïllament. Les figures Figura 6.16 - Figura 6.18 mostren els residus juntament als seus llindars associats en l'escenari de fallada de la inductància abrupta.

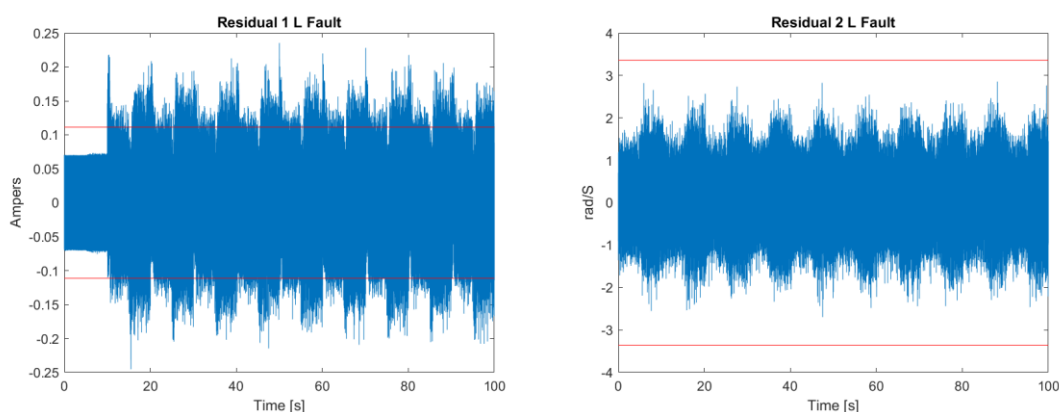


Figura 6.16. i Figura 6.17. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10 \text{ s}$) en la inductància equivalent L_{eq} .

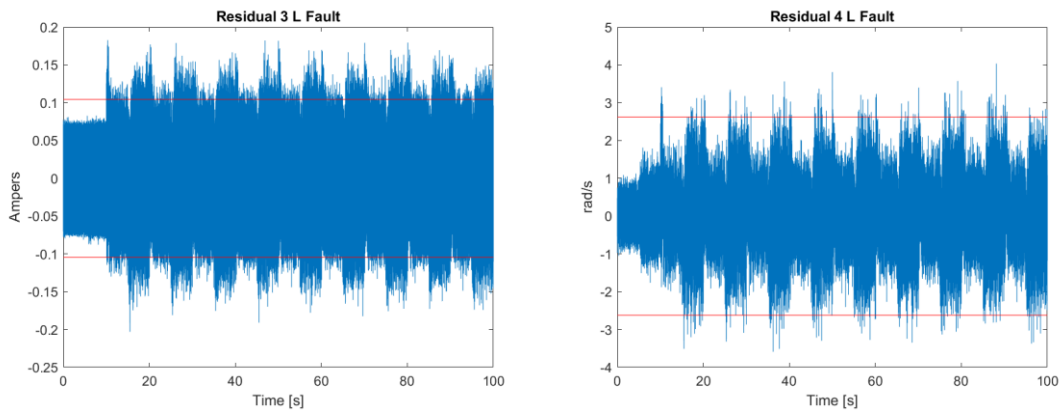


Figura 6.18. i Figura 6.19. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} .

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llinar que no és violat és el segon, propi d'una fallada dels paràmetres elèctrics. Aquesta signatura de fallada ($\phi = (1,0,1,1)$) és compartida per les altres dues fallades de paràmetres elèctrics i per tant, a priori, no es pot aïllar el paràmetre que ha produït la fallada. En tant que a l'observació de la forma dels residus alterats es pot aproximar a la forma de la derivada del corrent, la qual té aquesta quantitat de pics en ambdós sentits degut a l'arribada del senyal del corrent.

En aquest instant s'escull el primer residu ja que és significatiu en fallades elèctriques. Primerament es filtra el primer residu juntament amb el senyal del corrent i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal del corrent.

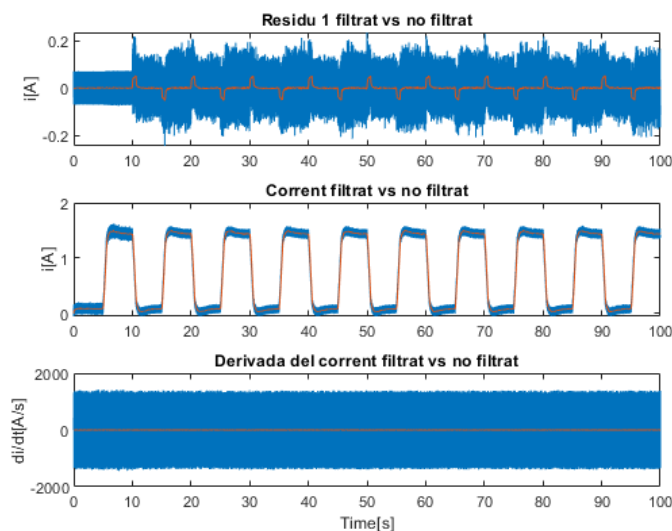


Figura 6.20. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra per realitzar la correlació. La Figura 6.21 mostra la finestra emprada en aquest escenari i es pot observar la similitud entre el primer residu i la derivada del senyal del corrent, amb una correlació de 0,999. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{detec} = 7 \text{ ms}$ per detectar, $t_{isolFSM} = 124 \text{ ms}$ per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura i, al ser de segon tipus (mecànica) i compartir signatura, requereix esperar un temps de $W_{correl} = 1 \text{ s}$ per calcular la correlació del segon residu amb el senyal de la velocitat; obtenint un temps total de $t_{diagnosi} = 1,131 \text{ s}$.

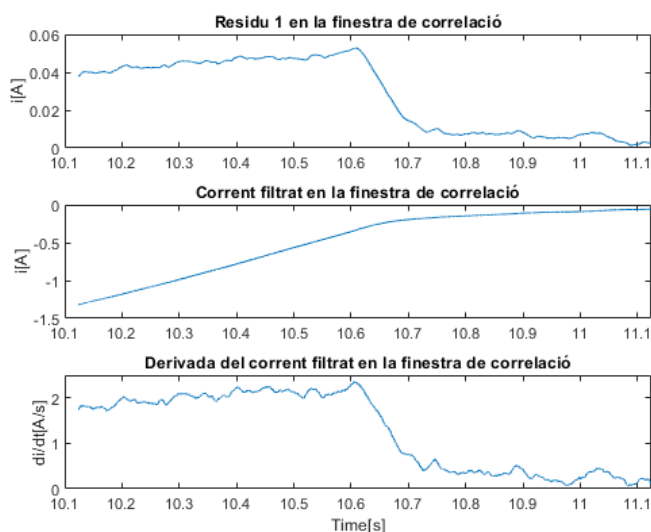


Figura 6.21. Finestra de $W_{correl} = 1 \text{ s}$ suficient per afirmar la bona correlació del residu 1 i la derivada del corrent.

Escenari 3: Fallada en la tensió d'entrada V_{DC}

En aquest escenari es configura la fallada amb una magnitud determinada, definida per una constant, en aquest cas $f_{V_{dc}} = 7 \text{ V}$. La figura Figura 6.22. **Evolució de la magnitud de la fallada abrupta a la tensió d'entrada V_{DC} a l'instant $t_{fault} = 10 \text{ s}$.** mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant $t_f = 10 \text{ s}$ s'activa de manera abrupta.

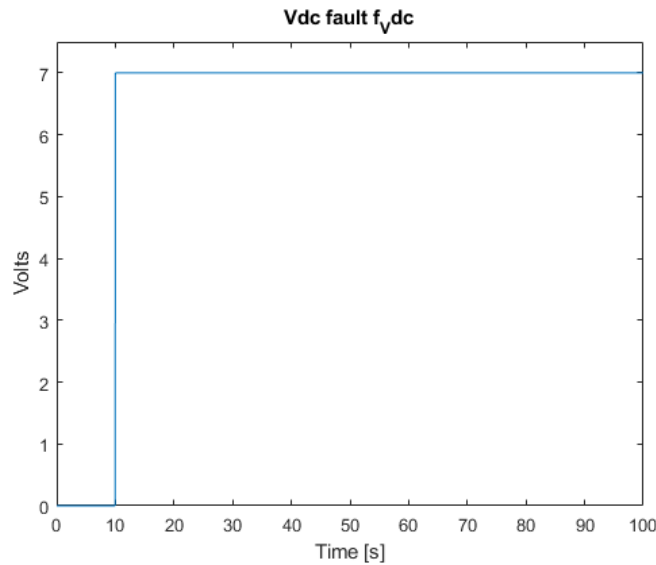


Figura 6.22. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta a la tensió d'entrada V_{DC} a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en el primer escenari: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

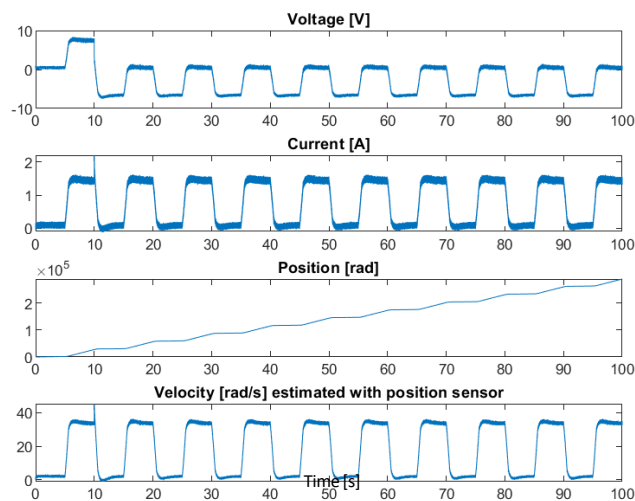


Figura 6.23. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .

S'observa als senyals com a partir de l'instant de la fallada ($t_f = 10$ s) s'observa un canvi dràstic a la tensió d'entrada, baixant l'offset a valors negatius a causa de la fallada la qual, encara que és positiva, com la sortida és el corrent la tensió queda negativa. En l'instant on es produeix la fallada el corrent sofreix un pic però es recupera gràcies al controlador que és capaç de corregir la tensió i conseqüentment el corrent. Tant la posició com la velocitat no experimenten grans alteracions llevat

de l'instant de la fallada on es pot apreciar que la velocitat té un pic instantani el qual ràpidament queda corregit amb el controlador.

No obstant, com es menciona al primer escenari, l'efecte de la fallada s'aprecia amb major detall a través dels quatre residus generats, que permeten, a més, la detecció i l'aïllament. Les figures Figura 6.24 - Figura 6.26 mostren els residus en l'escenari de fallada i els seus llindars associats de la tensió d'entrada abrupta.

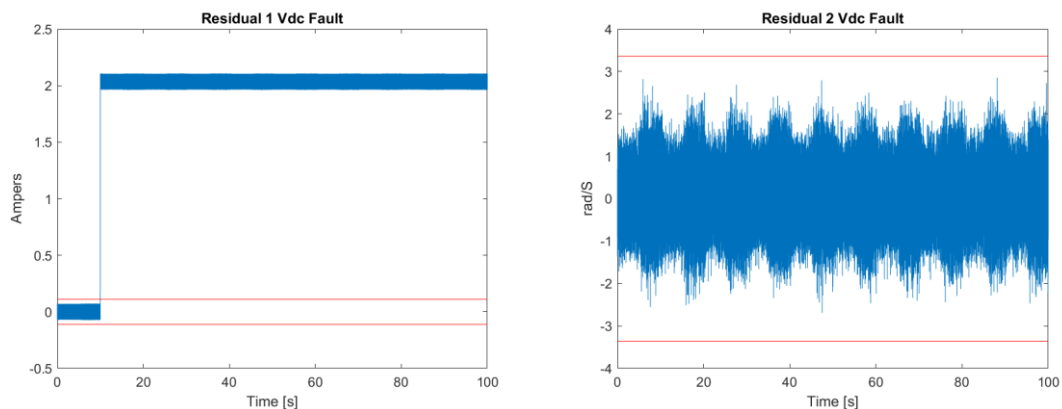


Figura 6.24. i Figura 6.25. Residu 1 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .

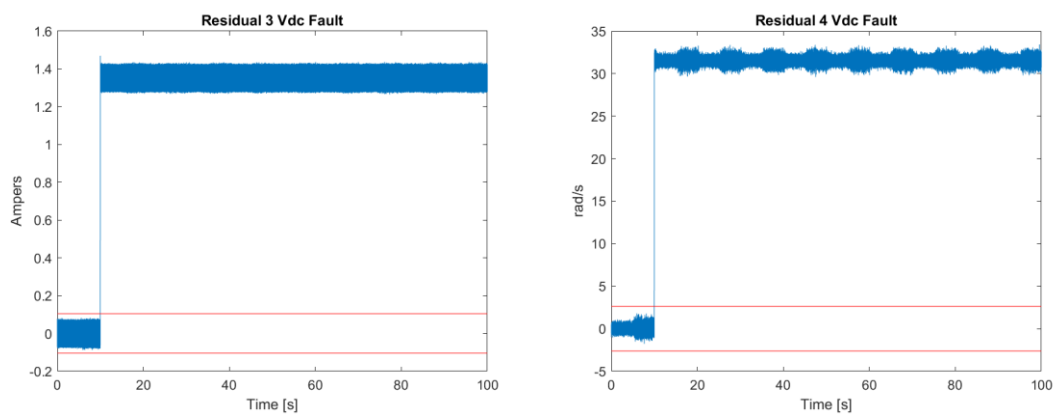


Figura 6.26. i Figura 6.27. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llindar que no és violat és el segon, propi d'una fallada dels paràmetres elèctrics. Aquesta signatura de fallada ($\phi = (1,0,1,1)$) és compartida per les altres dues fallades de paràmetres elèctrics i per tant, a priori, no es pot aïllar el paràmetre que ha produït la fallada. La forma dels residus alterats no segueix cap relació amb altres variables o senyals, ja que correspon a una constant.

En aquest instant s'escull el primer residu ja que es significatiu en fallades elèctriques i es filtra juntament amb el senyal del corrent i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal del corrent.

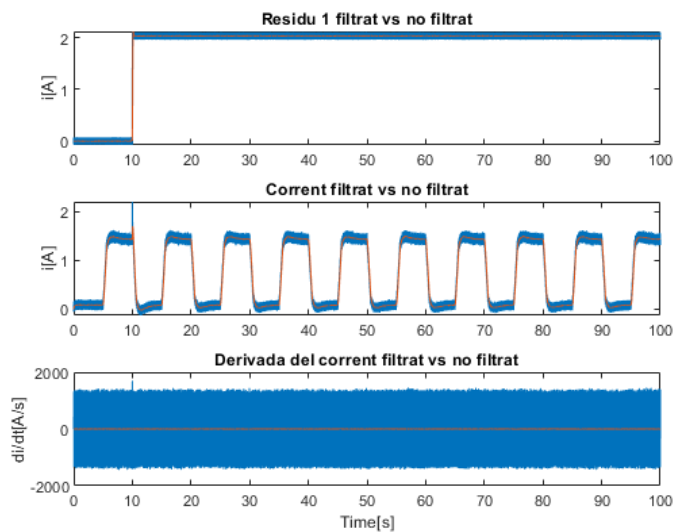


Figura 6.28. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra per realitzar la correlació, que en aquest cas s'ha hagut d'augmentar fins a $W_{correl} = 6 s$ per tenir suficient criteri per la determinació de la fallada. La Figura 6.29 mostra la finestra emprada en aquest escenari i es pot observar que no existeix cap relació entre el primer residu i el corrent o la seva derivada, tenint ambdues correlacions un valor inferior a 0,25. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{detec} = 0,3 ms$ per detectar, $t_{isolFSM} = 0,6 ms$ per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura i, al ser de segon tipus (mecànica) i compartir signatura, requereix esperar un temps de $W_{correl} = 6 s$ per calcular la correlació del segon residu amb el senyal de la velocitat; obtenint un temps total de $t_{diagnosi} = 6,0009 s$.

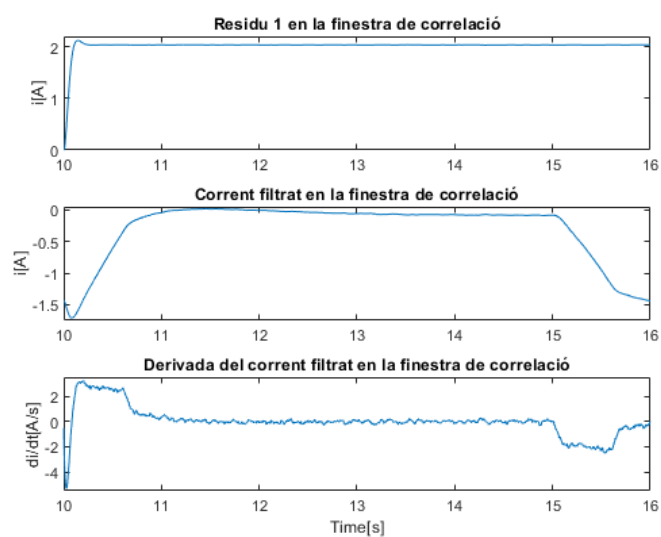


Figura 6.29. Finestra de $W_{\text{correl}} = 6$ s suficient per afirmar que no existeix una bona correlació del residu 1 amb cap dels dos altres senyals.

Escenari 4: Fallada en el sensor de posició s_θ

En aquest escenari es configura la fallada en el sensor de posició o *encoder*. Aquest és un escenari particular, ja que no es configura la magnitud de la fallada ja que no hi ha una magnitud com a tal, sinó que s'insereix a l'instant $t_f = 10$ s per un temps determinat ($f_\theta = stuck_{duration} = 1$ s) un zero com a lectura del sensor, simulant una fallada per omissió de lectura per part d'algun pols. La Figura 6.30 mostra en el gràfic superior el nombre de comptes que hauria de ser sense fallada (*Estimated*) i el nombre de comptes que és degut a la fallada (*Real*). El segon gràfic mostra l'evolució temporal del nombre de comptes que s'han omès.

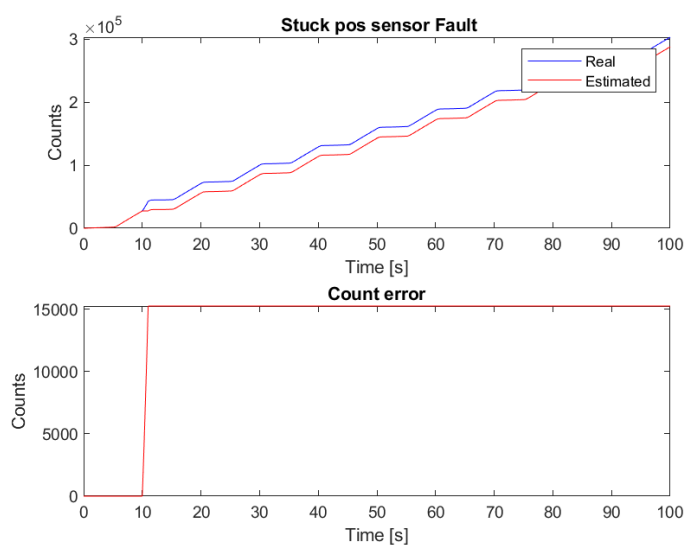


Figura 6.30. Evolució del nombre de comptes (gràfic superior) i nombre de comptes omesos (gràfic superior) de la fallada abrupta al sensor de posició o *encoder* s_0 a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en el primer escenari: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

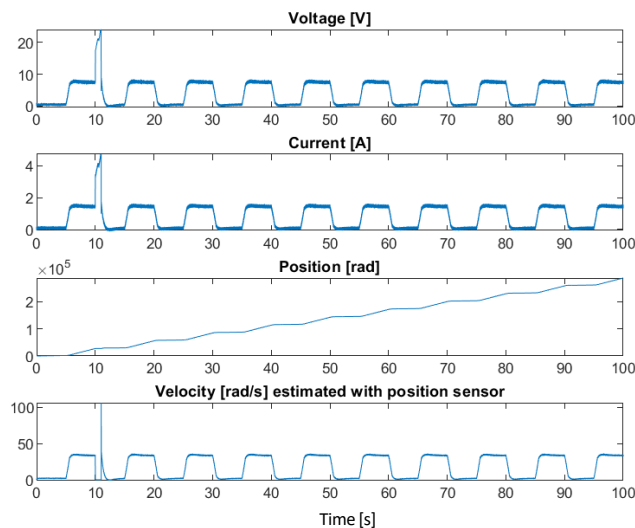


Figura 6.31. Senyals mesurats en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l'*encoder* s_0 .

S'observa als senyals com a l'instant de la fallada ($t_f = 10$ s) l'alteració a tots els senyals durant aproximadament 1 s, encara que en el senyal de la posició no s'arriba a apreciar del tot, però s'ha pogut comprovar en l'anterior figura. Pel que fa a la velocitat, el fet que aquesta s'aproxima a partir d'un càlcul que implica la posició provoca el pic de gran amplitud. D'igual manera aquest pic es transmet a la tensió i al corrent, ja que el controlador intenta seguir la tendència que s'havia estimat durant aquest temps de fallada que el sensor no omet polsos.

Com al primer escenari, l'efecte de la fallada s'aprecia amb major detall a través dels quatre residus generats, que permeten, a més, la detecció i l'aïllament. Les figures Figura 6.32 - Figura 6.34 mostren els residus i els seus llindars en l'escenari de fallada abrupta.

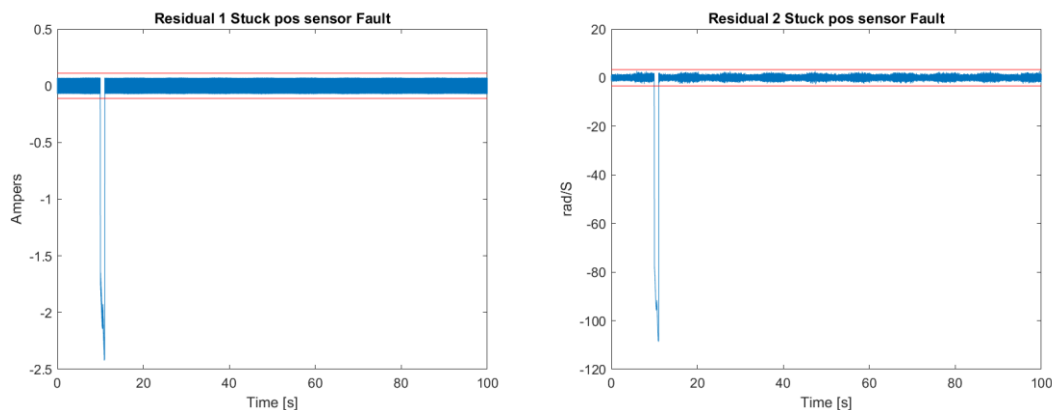


Figura 6.32. i Figura 6.33. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l'encoder s_0 .

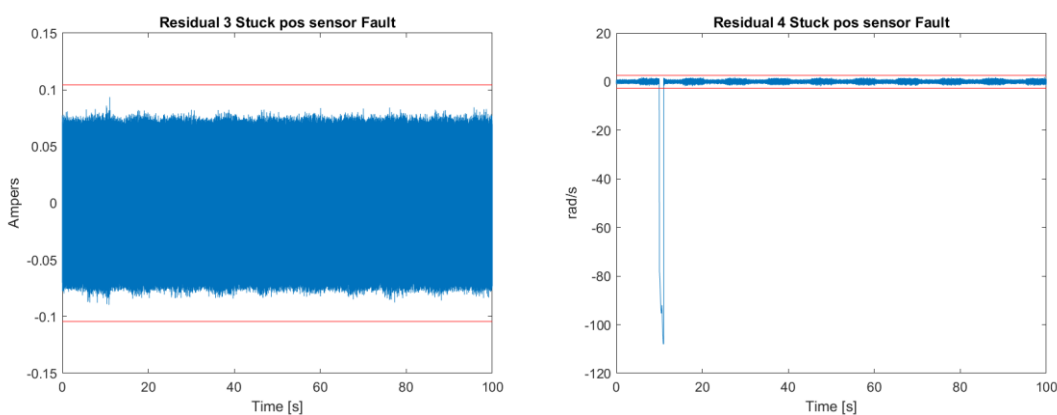


Figura 6.34. i Figura 6.35. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a l'encoder s_0 .

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llindar que no és violat és el tercer, i per tant, com que aquesta signatura de fallada ($\phi = (1,1,0,1)$) no és compartida per cap altra fallada, es pot detectar i aïllar, com es veurà a continuació a través de l'algorisme.

Mitjançant l'algorisme implementat en MATLAB®, es detecta la fallada i s'identifica com una fallada de tipus 3, pròpia del sensor de posició. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{\text{detec}} = 0,2$ ms per detectar i $t_{\text{isolFSM}} = 0,5$ ms per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura, obtenint un temps total de $t_{\text{diagnosi}} = 0,7$ ms.

Escenari 5: Fallada en el sensor de corrent s_i

En aquest escenari es configura la fallada amb una magnitud equivalent a un nivell *offset* en la mesura d'aquest sensor ($f_i = 1$ A). La Figura 6.36 mostra l'evolució temporal de la fallada, on a l'instant $t_f = 10$ s s'activa de manera abrupta.

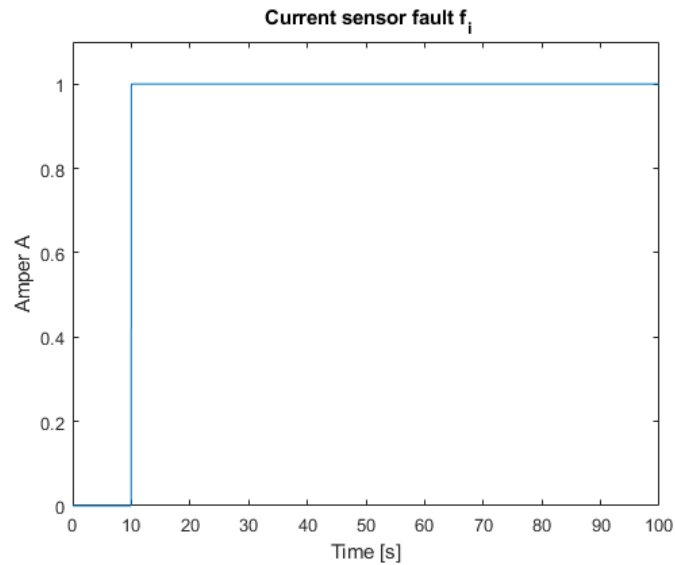


Figura 6.36. Evolució de la magnitud de la fallada abrupta en el sensor de corrent s_i a l' instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en el primer escenari: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

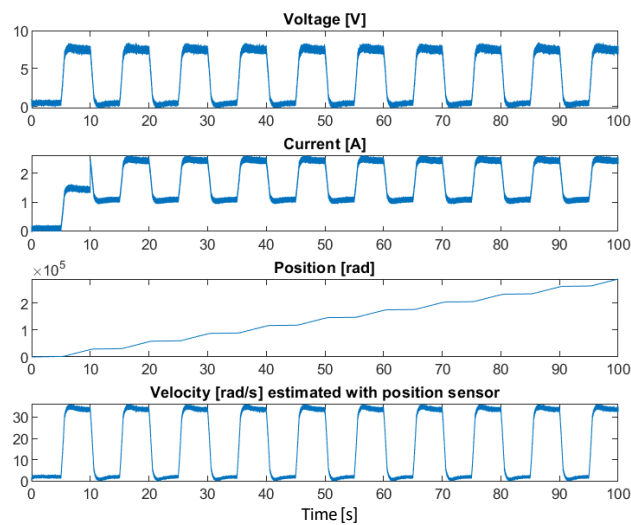


Figura 6.37. Senyals mesurats en escenari de fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .

S'observa als senyals com a partir de l' instant de la fallada ($t_f = 10$ s) puja el nivell *d'offset* al senyal del corrent en 1 A. En ser un error de mesura, aquesta no té efecte sobre els altres senyals com es pot apreciar al no haver cap alteració notòria.

Com al primer escenari, l'efecte de la fallada s'aprecia amb major detall a través dels quatre residus generats, que permeten, a més, la detecció i l'aïllament. Les figures Figura 6.38 - Figura 6.40 mostren els residus i llindars associats en l'escenari de fallada abrupta.

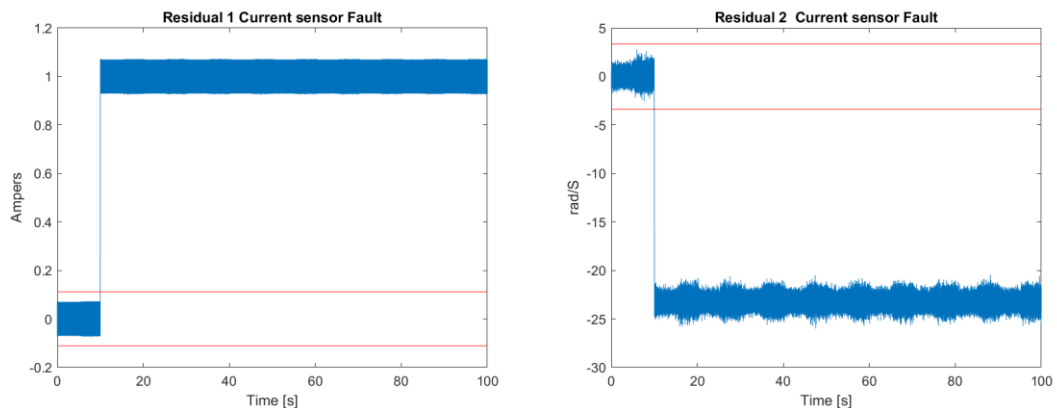


Figura 6.38. i Figura 6.39. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent

Si.

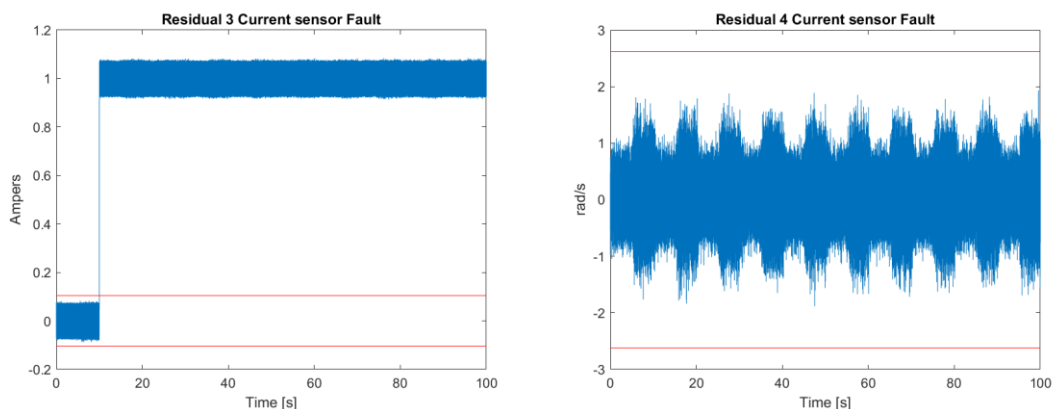


Figura 6.40. i Figura 6.41. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada abrupta ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent

Si.

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llindar que no és violat és el quart, propi d'una fallada del sensor de corrent $\phi = (1,1,1,0)$. La determinació d'aquest tipus de fallada segons la FSM es condició suficient perquè l'algorisme pugui aïllar la fallada. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{\text{detec}} = 0,1$ ms per detectar, $t_{\text{isolFSM}} = 0,3$ ms per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura, obtenint un temps total de $t_{\text{diagnosi}} = 0,4$ ms .

6.2. Fallades incipients

Escenari 1: Fallada en el fregament mecànic B

Mantenint la mateixa magnitud de la fallada ($f_B = 6,4 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{rad/s}$) cal configurar la velocitat de deteriorament de la fallada ($vel_{f_B} = 0,1 \frac{Nm}{rad}$). La Figura 6.42 mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant $t_f = 10$ s s'activa de manera incipient.

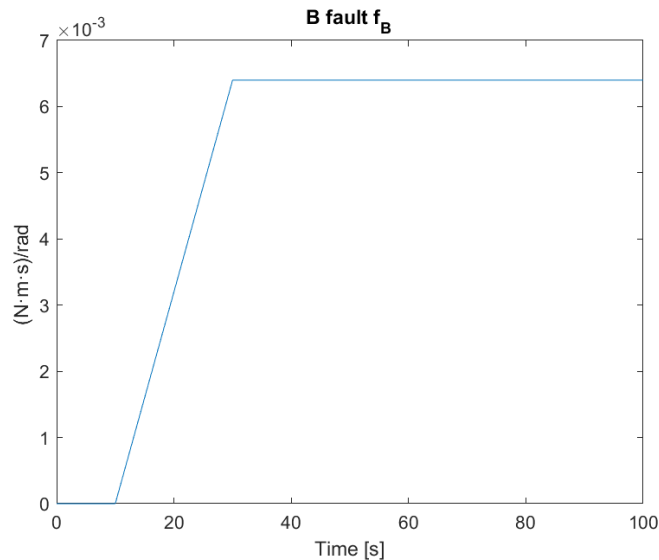


Figura 6.42. Evolució de la magnitud de la fallada incipient en el fregament mecànic B a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

Els quatre senyals d'interès mencionats en l'apartat anterior també s'empren en aquest amb el mateix objectiu: observar com afecta la fallada al funcionament del sistema. La Figura 6.43 mostra el comportament de cada senyal segons existeix o no fallada.

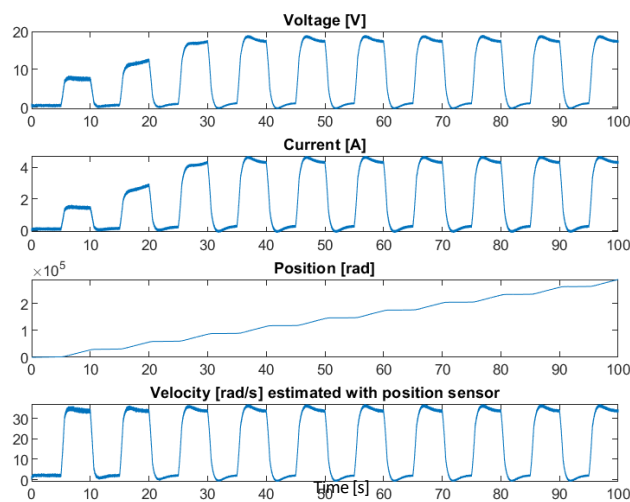


Figura 6.43. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B.

S'observa als senyals com a partir de l'instant de la fallada ($t_f = 10$ s) existeix un increment gradual en la tensió d'entrada i , per tant, en el corrent, a causa de la mateixa raó exposada en l'escenari amb la fallada abrupta: l'augment del fregament mecànic exigeix al controlador a augmentar la tensió d'entrada de la planta i , com a conseqüència, el corrent. En aquest escenari no s'aprecia cap alteració a la velocitat llevat de l'atenuació de l'arissada existent quan queda en repòs.

No obstant això, com s'exposa anteriorment, es veu més clar l'efecte de la fallada és amb els senyals dels quatre residus generats que a més ens permeten fer la detecció i aïllament de la fallada. Les figures Figura 6.44 - Figura 6.46 mostren els residus i els llindars associats.

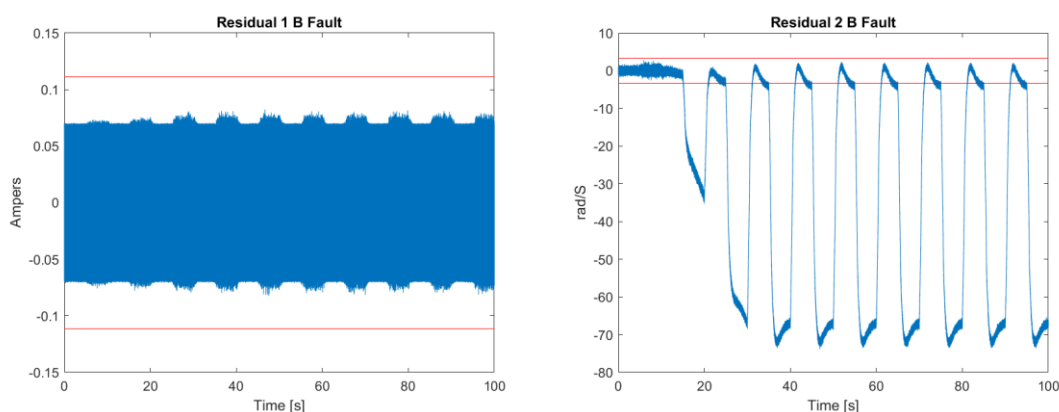


Figura 6.44. i Figura 6.45. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B.

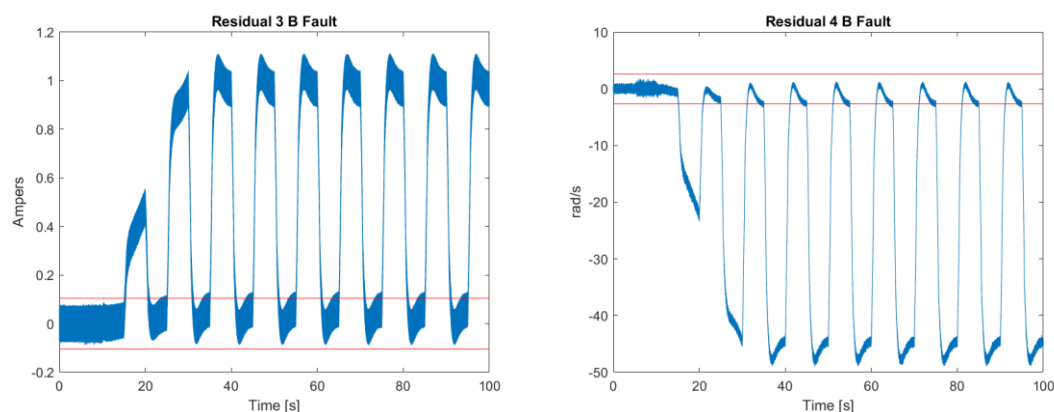


Figura 6.46. i Figura 6.47. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al fregament mecànic B.

Per un costat, es segueix verificant l'exposat a la metodologia, ja que segueixen el segon, tercer i quart residu excedint el llindar, és a dir, una signatura pròpia de les fallades mecàniques ($\phi = (0,1,1,1)$). El comportament dels residus que violen el llindar segueix amb la tendència a seguir la forma del corrent.

Per poder diferenciar entre les fallades mecàniques el que s'ha de fer primerament és filtrar el segon residu juntament amb el senyal de la velocitat i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal de la velocitat.

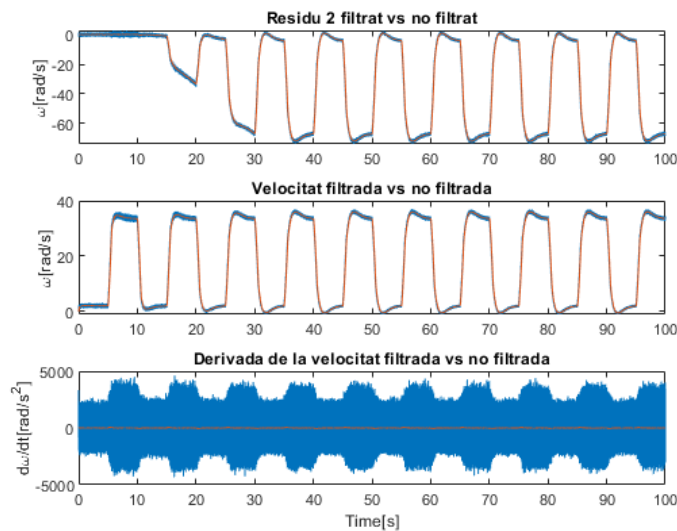


Figura 6.48. Filtratge del residu 2, el senyal de la velocitat i la derivada de la velocitat.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra de $W_{correl} = 1 \text{ s}$ per realitzar la correlació. La Figura 6.49 mostra la finestra emprada en aquest escenari i es pot observar la similitud entre el segon residu i el senyal de la velocitat amb una correlació de 0,999. No hi ha grans diferències respecte a la diagnosi de la mateixa fallada en tipus abrupta, ja que la finestra de correlació en ambdós casos és de 1 s. El fet de ser una fallada incipient afecta en el temps de detecció i aïllament, ja que s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{detec} = 5,089 \text{ ms}$ per detectar, $t_{isolFSM} = 12 \text{ ms}$ per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura. El temps total que necessita l'algorisme per la diagnosi és $t_{diagnosi} = 6,101 \text{ s}$.

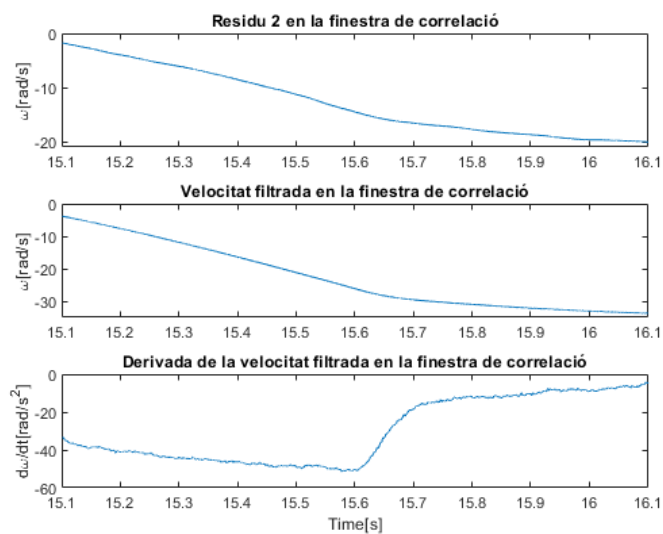


Figura 6.49. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar la bona correlació del residu 2 i la velocitat.

Escenari 2: Fallada en la inductància L_{eq}

Amb la mateixa idea que el primer escenari, la fallada es configura amb una magnitud deu vegades el valor nominal de la inductància equivalent ($f_{Leq} = 7,6 \cdot 10^{-2} H$) i una velocitat ($vel_{f_{Leq}} = 0,1 H/s$). La Figura 6.50 mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant $t_f = 10$ s s'activa de manera incipient.

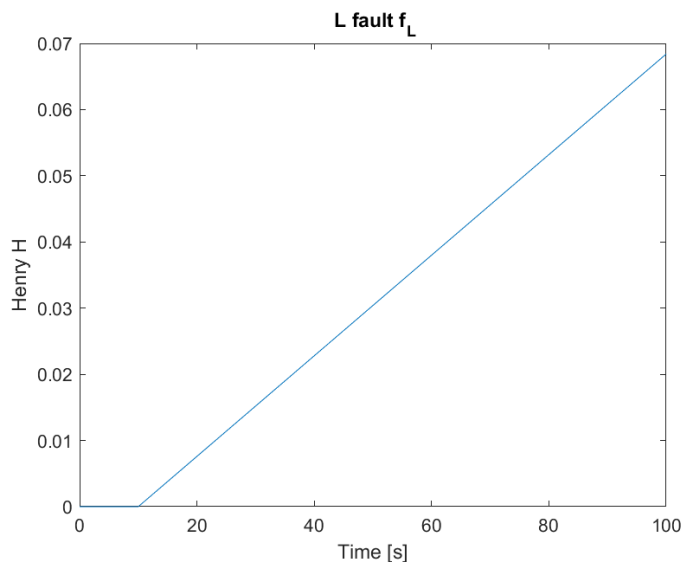


Figura 6.50. Evolució de la magnitud de la fallada incipient a la inductància equivalent L_{eq} a l'instant $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en l'escenari anterior: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

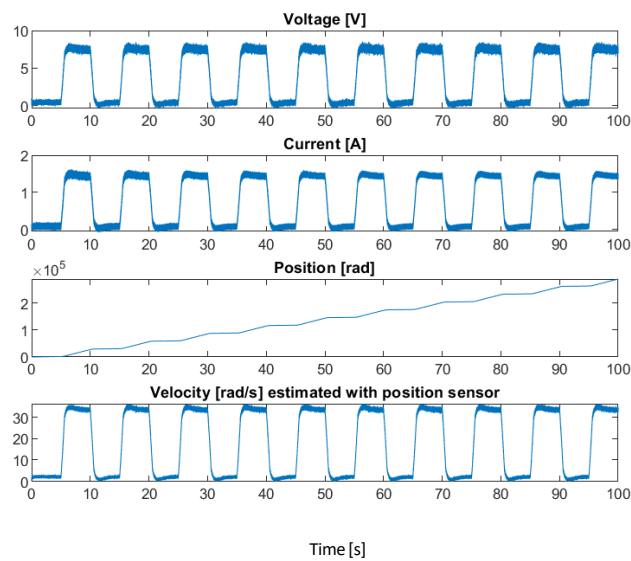


Figura 6.51. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la inductància equivalent L_{eq} .

En aquest escenari no existeix cap alteració diferent a l'esmentat en el mateix escenari però amb fallada abrupta.

Com a l'anterior escenari, l'efecte de la fallada s'aprecia amb major detall a través dels quatre residus generats, que permeten, a més, la detecció i l'aïllament. Les figures Figura 6.52 - Figura 6.54 mostren els residus i llindars associats.

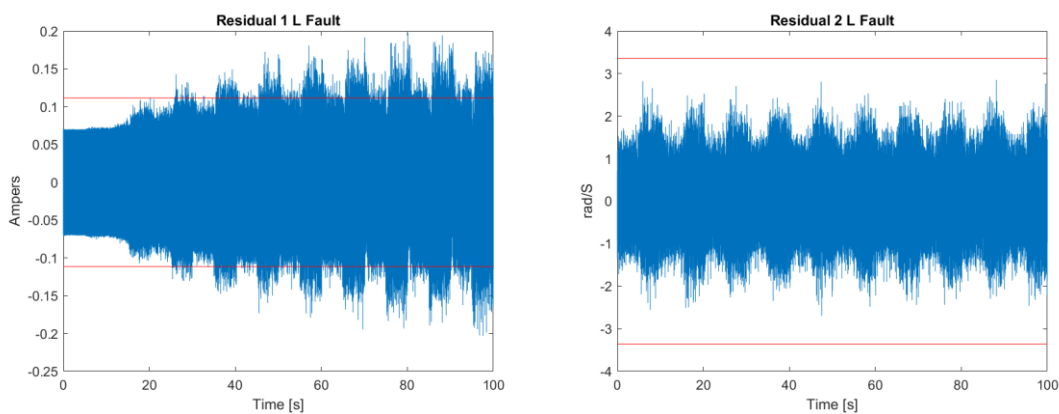


Figura 6.52. i Figura 6.53. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} .

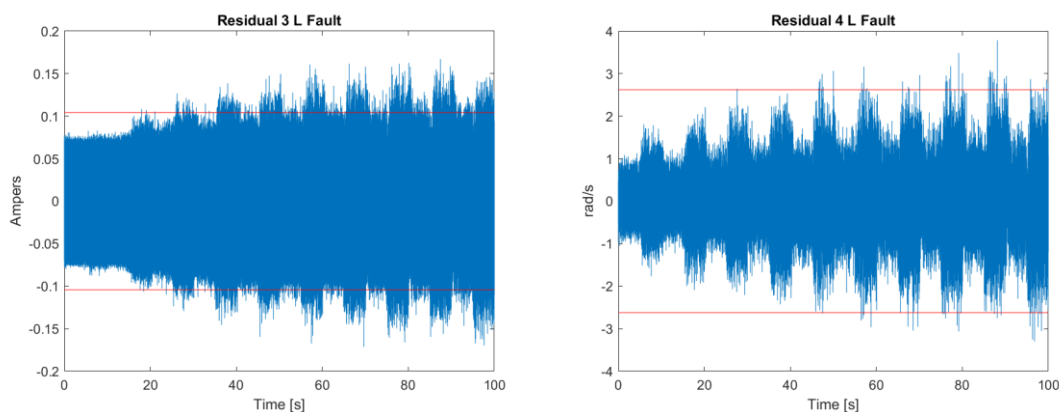


Figura 6.54. i Figura 6.55. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) en la inductància equivalent L_{eq} .

Si bé s'observa una diferència a causa de l'evolució gradual de la fallada en el primer, tercer i quart residu, els quals excedeixen el seu lílindar; es segueix verificant l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic lílindar que no és violat és el segon, propi d'una fallada dels paràmetres elèctrics ($\phi = (1,0,1,1)$). Com a partir d'únicament de la FSM no es pot aïllar, es requereix l'ús de la sensibilitat de fallada, eina emprada a l'algorisme.

Per aplicar l'algorisme correctament mitjançant el *software* MATLAB® s'ha de filtrar el primer residu, juntament amb el senyal del corrent i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal del corrent.

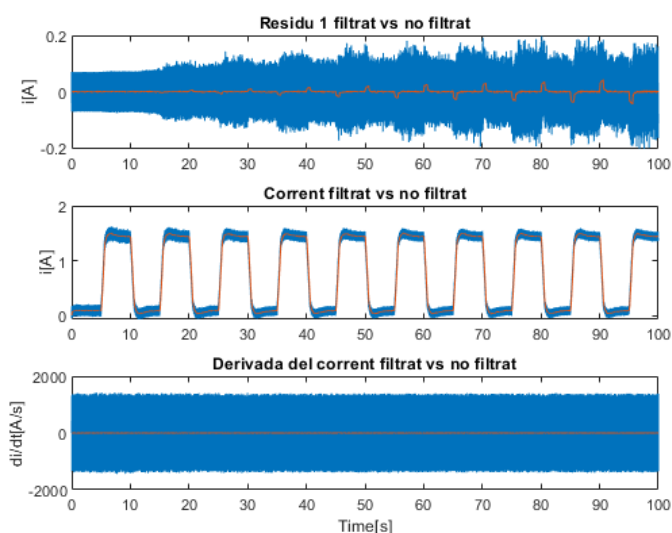


Figura 6.56. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent amb fallada incipient.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra per realitzar la correlació. Es realitzarà una configuració de la finestra de correlació de forma recursiva fins que la finestra sigui suficient per obtenir uns valors de correlació que puguin determinar l'aïllament de la

fallada ($W_{\text{correl}} = 3 \text{ s}$), obtenint una correlació de 0,966. La Figura 6.57 mostra la finestra final que s'ha emprat en aquest escenari. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{\text{detec}} = 7,935 \text{ s}$ per detectar, $t_{\text{isolFSM}} = 9,698 \text{ s}$ per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura i, al ser de primer tipus (elèctrica) i compartir signatura, requereix esperar un temps de $W_{\text{correl}} = 3 \text{ s}$ per calcular la correlació del primer residu amb la derivada del senyal de la velocitat amb garanties; obtenint un temps total de $t_{\text{diagnosi}} = 20,633 \text{ s}$.

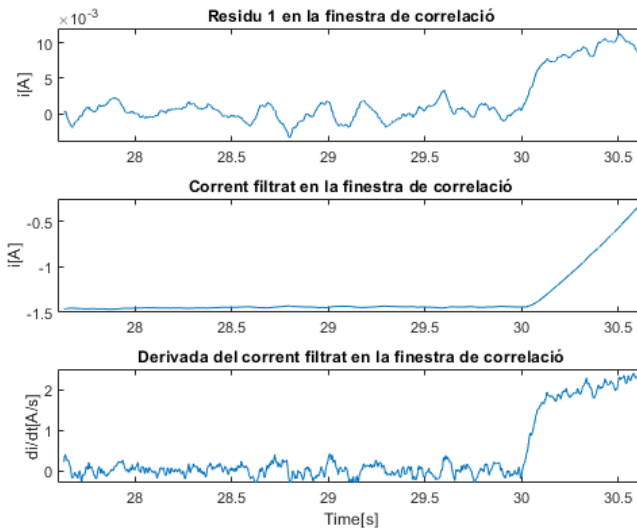


Figura 6.57. Finestra de $W_{\text{correl}} = 3 \text{ s}$ suficient per afirmar la bona correlació del residu 1 i el corrent.

Escenari 3: Fallada en la tensió d'entrada V_{DC}

Es configura la magnitud de la fallada ($f_{V_{\text{DC}}} = 7 \text{ V}$) i la velocitat d'aquesta ($vel_{f_{V_{\text{DC}}}} = 0,1 \text{ V/s}$). La Figura 6.58 mostra l'evolució de la fallada, on a l'instant $t_f = 10 \text{ s}$ s'activa de manera incipient.

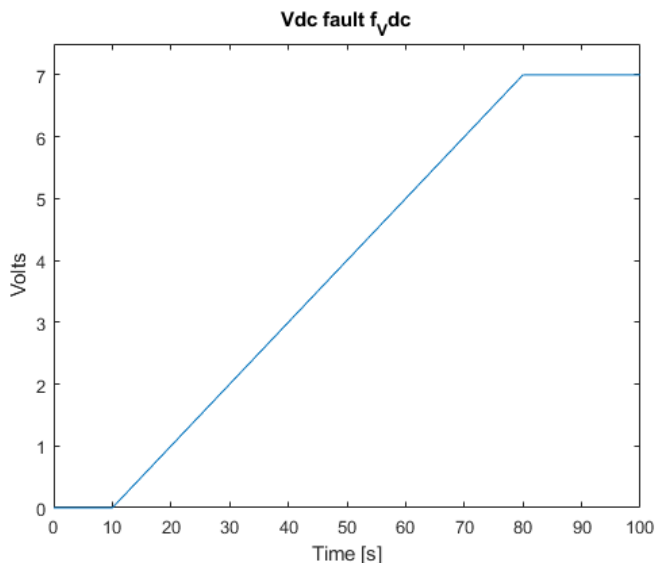


Figura 6.58. Evolució de la magnitud de la fallada incipient a la tensió d'entrada V_{dc} a l'instant $t_{fault} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals mencionats en l'escenari anterior: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

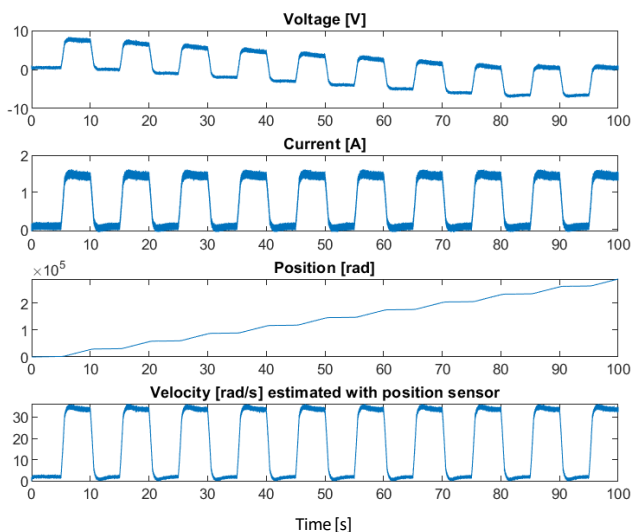


Figura 6.59. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{fault} = 10$ s) a la inductància equivalent V_{dc} .

S'observa als senyals com a partir de l'instant de la fallada ($t_f = 10$ s) s'observa un canvi gradual a la tensió d'entrada, baixant l'offset a valors negatius a causa de la fallada la qual, encara que és positiva, com la sortida és el corrent, la tensió queda negativa. No s'aprecien alteracions en els altres senyals, probablement degut al bon funcionament del controlador.

Tot seguit les figures Figura 6.60 - Figura 6.62 mostren els residus juntament amb els seus llindars associats on sí s'aprecien les inconsistències.

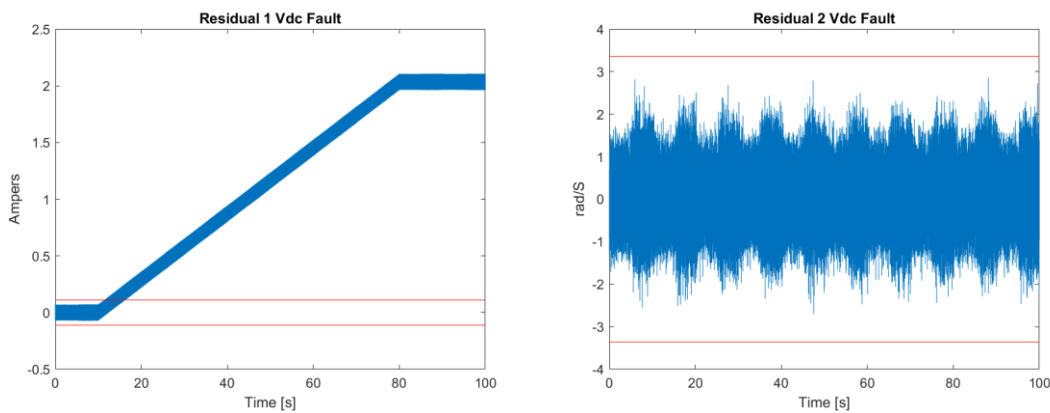


Figura 6.60. i Figura 6.61. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .

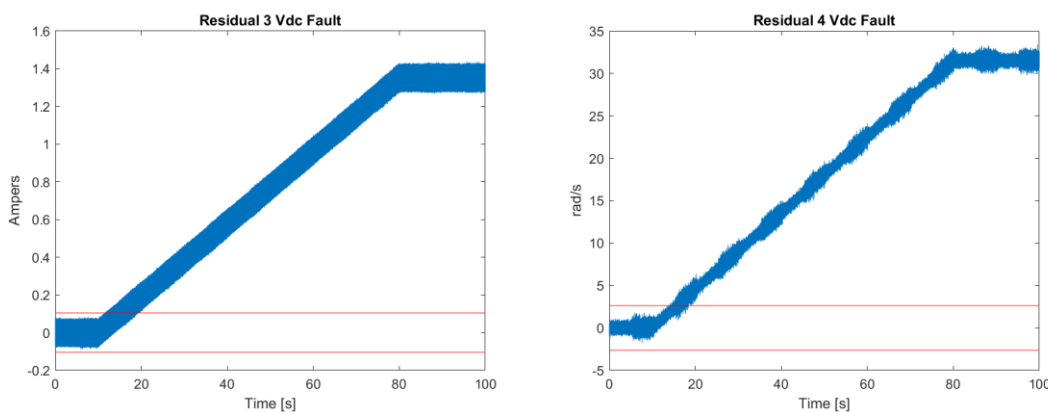


Figura 6.62. i Figura 6.63. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) a la tensió d'entrada V_{DC} .

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llindar que no és violat és el segon, propi d'una fallada dels paràmetres elèctrics. Aquesta signatura de fallada ($\phi = (1,0,1,1)$) és compartida per les altres dues fallades de paràmetres elèctrics i per tant, a priori, no es pot aïllar el paràmetre que ha produït la fallada. La forma dels residus alterats no segueix cap relació amb altres variables o senyals, ja que correspon a una constant.

En aquest instant s'escull el primer residu ja que és significatiu en fallades elèctriques. Primerament es filtra el primer residu juntament amb el senyal del corrent i la derivada, que ha estat calculada a partir del senyal del corrent.

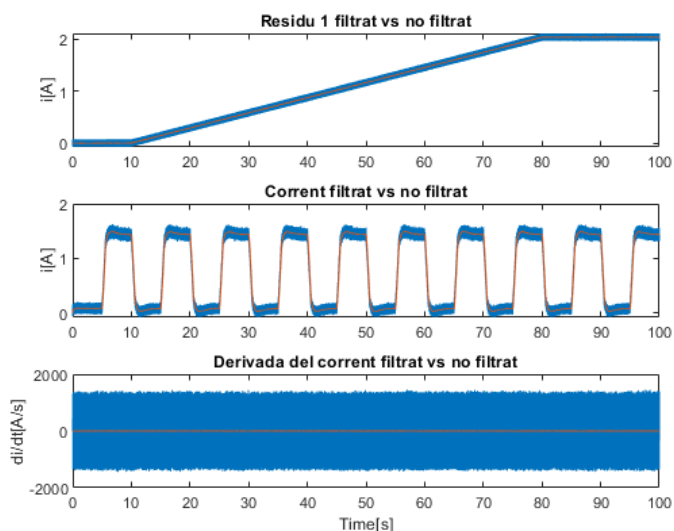


Figura 6.64. Filtratge del residu 1, el senyal del corrent i la derivada del corrent amb fallada incipient.

Un cop filtrats els diferents vectors amb les dades d'interès, es genera una finestra per realitzar la correlació. La Figura 6.65 mostra la finestra final de correlació emprada en aquest escenari ($W_C = 1$ s) i com el senyal del residu 1 dista del senyal del corrent o el senyal de la seva derivada, obtenint valors en les correlacions inferiors al llindar inferior ($\lambda_i^{inf} = 0,25$) i, per tant, determinant que la fallada s'ha produït a la tensió d'entrada. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{detec} = 1,444$ s per detectar, $t_{isolFSM} = 2,314$ ms per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura i, al ser de segon tipus (mecànica) i compartir signatura, requereix esperar un temps de $W_{correl} = 1$ s per calcular la correlació del segon residu amb el senyal de la velocitat; obtenint un temps total de $t_{diagnosi} = 4,758$ s .

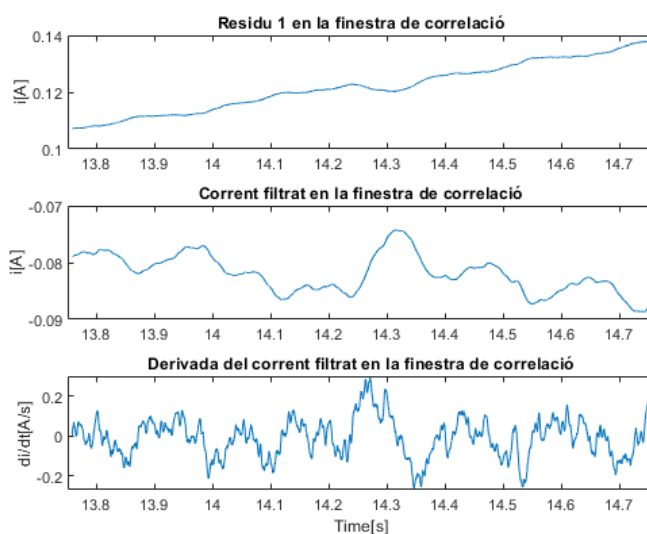


Figura 6.65. Finestra de $W_{\text{correl}} = 1$ s suficient per afirmar que no existeix correlació entre el residu 1 i el corrent o la derivada del corrent.

Escenari 4: Fallada en el sensor de corrent s_i

La configuració de la fallada en aquest escenari es realitza a partir de la magnitud de la fallada ($f_i = 1$ A) que actuarà com a nivell d'*offset* i la velocitat d'actuació d'aquesta ($vel_{f_i} = 0,01$ A/s). La Figura 6.66 mostra l'evolució temporal de la fallada, on a l'instant $t_f = 10$ s s'activa de manera incipient.

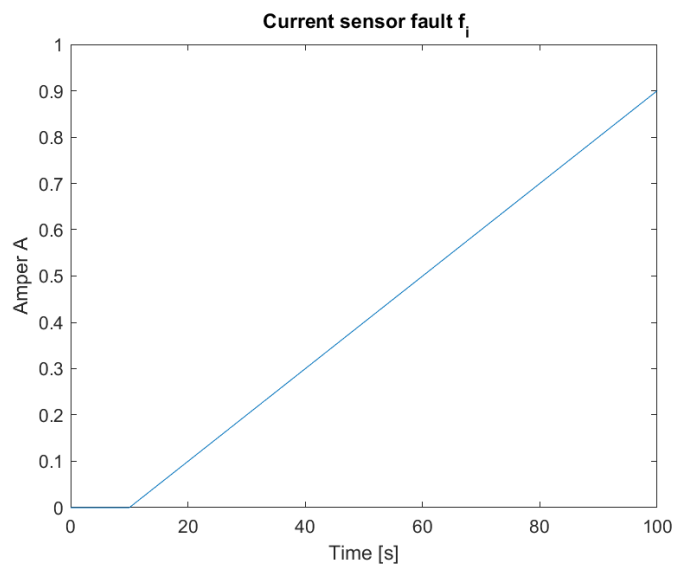


Figura 6.66. Evolució de la magnitud de la fallada incipient al sensor de corrent s_i a l'instanc $t_{\text{fault}} = 10$ s.

S'observen els mateixos quatre senyals que el respectiu escenari en fallada abrupta: la tensió d'entrada, el corrent, la posició i la velocitat a partir de la posició.

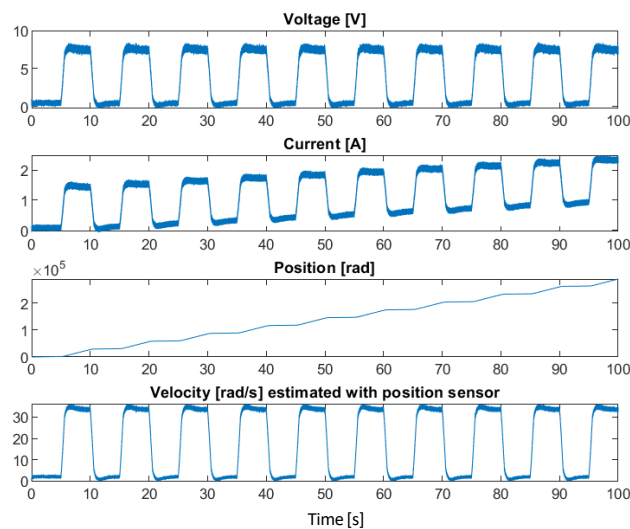


Figura 6.67. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .

S'observa als senyals com a partir de l'instant de la fallada ($t_f = 10$ s) puja el nivell *d'offset* de manera gradual al senyal del corrent en 1 A. En ser un error de mesura, aquesta no té efecte sobre els altres senyals com es pot apreciar al no haver cap alteració notòria.

No obstant això, on es veu més clar l'efecte de la fallada és amb els senyals dels quatre residus generats que a més ens permeten fer la detecció i aïllament de la fallada. Les figures Figura 6.68 - Figura 6.70 mostren els residus i els seus llindars associats.

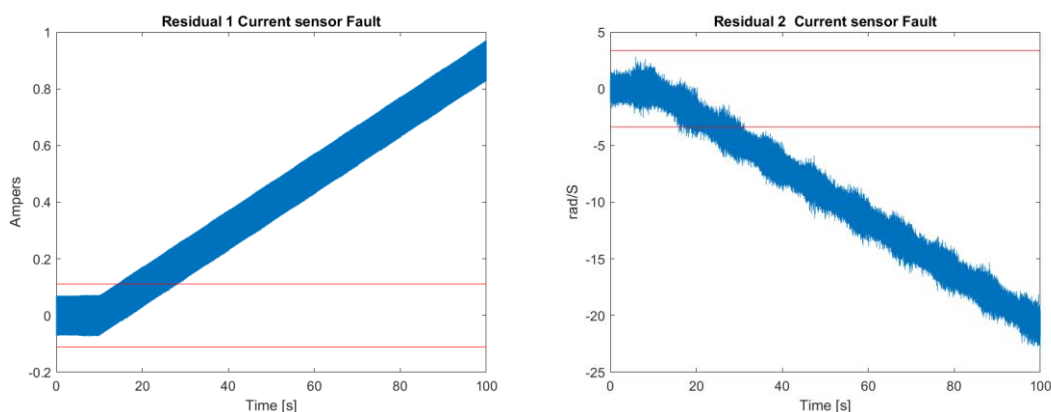


Figura 6.68. i Figura 6.69. Residu 1 i Residu 2 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .

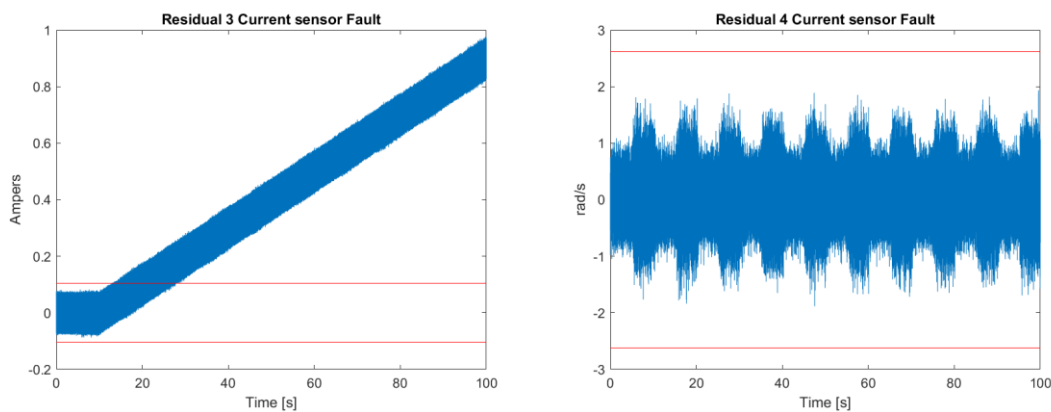


Figura 6.70. i Figura 6.71. Residu 3 i Residu 4 en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent s_i .

Queda verificat l'exposat a la metodologia, en aquest cas, l'únic llindar que no és violat és el quart, propi d'una fallada del sensor de corrent ($\phi = (1,1,1,0)$). La determinació d'aquest tipus de fallada segons la FSM es condició suficient perquè l'algorisme pugui aïllar la fallada. Pel que fa a l'eficiència de l'algorisme, s'obté que en aquest escenari es necessiten $t_{\text{detec}} = 2,863$ s per detectar, $t_{\text{isolFSM}} =$

3,065 s per determinar quin tipus de fallada és segons la seva signatura, obtenint un temps total de $t_{diagnosi} = 5,928$ s.

6.3. Resum dels resultats de l'algorisme

Per tal de resumir els resultats més rellevants en quant a eficiència, es mostren els temps obtinguts a través de l'algorisme de tots els escenaris en els diferents tipus de fallades a la Taula 6.6. La taula mostra per cada fallada a quin tipus de fallada correspon segons la seva signatura, el temps que triga en ser detectada des que es produeix, el temps que triga en aïllar-se mitjançant la FSM i, en cas de encara no haver aïllat la fallada per compartir signatura, el temps necessari (marcat per la finestra de correlació) per realitzar la correlació i poder determinar de manera segura la localització de la fallada; així com la correlació màxima d'entre les dues existents (α i β , residu amb senyal i residu amb derivada del senyal, respectivament).

Taula 6.6. Resultats en temps de l'algorisme FDI.

Fallada	Fallada abrupta					Fallada incipient				
	FSM	t_{detec} (s)	$t_{isolFSM}$ (s)	W_{correl} (s)	$Correl_{m\grave{a}x}$	FSM	t_{detec} (s)	$t_{isolFSM}$ (s)	W_{correl} (s)	$Correl_{m\grave{a}x}$
f_{Req}	2	0,0002	0,0008	1	0,934	2	8,439	7,754	1	0,999
f_{Leq}	2	0,007	0,124	1	0,999	2	7,935	9,698	3	0,966
f_{Vdc}	2	0,0003	0,0006	6	0,028	2	1,444	2,314	1	- 0,077
f_B	1	0,0002	0,0008	1	0,928	1	5,089	0,012	1	0,999
f_J	1	0,0085	0,006	1	0,999	1	5,528	4,783	1	0,999
f_{TLoad}	1	0,0086	0,0158	1	-0,471	1	0,0086	0,0234	1	- 0,471
f_{θ}	3	0,0002	0,0005	-	-	-	-	-	-	-
f_i	4	0,0001	0,0003	-	-	4	2,863	3,065	-	-

Un cop vist els resultats, s'ha pogut comprovar com l'algorisme dissenyat ha estat capaç de detectar i aïllar totes les fallades que s'han considerat en aquest motor, essent les incipients les més exigents quant a temps requerit. Es comprova una relació de dependència entre la robustesa de l'algorisme i l'eficiència en temps requerit.

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

D'acord amb la bibliografia emprada en aquest treball una detecció i diagnosi de fallada a temps pot ser vital per un sistema, com en el cas d'estudi, un motor, del qual en gran part dels casos de greus accidents es deuen a petites fallades originades en un cert paràmetre. És per això que mitjançant algorismes com el que s'ha proposat en aquest treball poden no només, detectar en poc temps que existeix una fallada i poder decidir que fer, sinó també aïllar la fallada, és a dir, localitzar quina és la causa de la fallada. La detecció a temps d'una fallada en un sistema pot evitar que aquesta es propagui a altres sistemes connectats, evitant danys en cadena. A més, saber quina causa ha produït la fallada pot permetre arreglar-lo mitjançant, per exemple, la substitució d'un element. Aquestes possibles accions suposarien un allargament de la vida útil dels components, aconseguint un estalvi energètic i econòmic, fent més sostenible el sistema (Escobet, 2019).

Amb aquesta idea, dins el camp del control i supervisió de fallades, des de la darrera dècada s'ha estat combinant la detecció i diagnosi de fallades amb la prognosi, la qual té com a principi la previsió d'una fallada abans que es produeixi.

Per altra banda, el fet que el treball hagi estat realitzat únicament en simulació per *software* fa que la petjada ambiental per part de l'autoria hagi estat molt baixa, a més d'adherir-se el fet d'haver estat sota confinament a causa de la pandèmia de la COVID-19, que impossibilita la mobilització. Possiblement la major part de la petjada hagi estat en consum d'electricitat per part del computador utilitzat.

Conclusions

Un cop finalitzat el treball, és indispensable l'extracció de conclusions de no només els resultats finals obtinguts, sinó també altres aspectes relacionats amb el present treball:

- i. **S'ha desenvolupat un simulador que permet recrear escenaris realistes de fallades en motors DC equivalents a motors tipus *Brushless*.** Aquest simulador no només s'ha utilitzat al treball per, posteriorment, fer la detecció i l'aïllament (diagnosi de fallades), si no que també per generar dades per fer un estudi de prognosi del que s'ha derivat una publicació científica en un congrés internacional (Blesa, 2020).
- ii. **S'ha dissenyat un algorisme (FDI) que permet la diagnosi de la fallada d'un motor DC equivalent a un motor tipus *Brushless*.** El sistema de detecció i aïllament de fallades basat en la redundància analítica i concretament, basat en models matemàtics, ha estat implementat en MATLAB® i s'ha provat la seva eficiència amb el simulador realista obtenint resultat satisfactoris en els diferents escenaris creats amb un ampli ventall de fallades.
- iii. **Es considera una opció viable per aplicar en la supervisió de fallades en motors.** Els resultats obtinguts amb el simulador real i el fet de que el sistema de supervisió dissenyat no suposa cap cost addicional, ja que utilitza els propis sensors del sistema de control del motor, fa que sigui una alternativa per la supervisió a incorporar en els sistemes de control de motors tipus Brushlles. A més, s'afegeix la gran flexibilitat que tenen aquest tipus de sistemes de supervisió per poder diagnosticar un ampli ventall de paràmetres, mantenint sempre la no necessitat d'implementar més sensors del que el propi sistema de control contempla.
- iv. **Com a experiència personal, s'han aplicat molts conceptes adquirits durant la carrera al mateix temps que n'he assolit d'altres.** En concret, l'apartat de la metodologia ha suposat un gran repte pel que fa a la revisió i ampliació de conceptes teòrics amb l'objectiu de realitzar un treball amb una base teòrica ben fonamentada. Molts d'aquests conceptes, sobretots els nous o ampliat,estic seguir que n'aprofundiré més en les següents etapes de la meva formació, però a la qual partiré amb una sòlida base. A més, considero que la redundància analítica per la supervisió de fallades és una alternativa molt eficient que es pot aplicar a la indústria i que, en un futur, aquests coneixements els podria aprofitar en la meva carrera professional.

És pertinent en aquest apartat també mencionar directrius de cara a futurs passos en aquest treball:

- i. **Aplicació de l'algorisme en la maqueta del motor.** En un primer instant, s'havia plantejat el treball per dissenyar l'algorisme i implementar-ho en la maqueta del motor tipus *brushless* que es troba a la universitat. Després de la situació esdevinguda per la COVID-19, es va haver

de descartar i , va sorgir la possibilitat de fer un simulador. La proposta és comprovar el funcionament de l'algorisme FDI proposat al motor real quan la situació ho permete.

- ii. **Disseny d'un simulador d'un motor tipus *brushless* en tant que sigui un model no lineal.** A partir de documentació existent, es proposa crear un simulador amb el mateix *software* que s'ha utilitzat en aquest treball per: comprovar si s'obtenen resultats similars als obtinguts en aquest treball, realitzar fallades que afectin en els paràmetres del model d'aquest motor i per comprovar si s'aconsegueix una aproximació encara més real que l'aconseguida en aquest treball.
- iii. **Millora en la robustesa de l'algorisme, principalment en la definició dels llindars de l'aïllament per sensibilitat de fallada.** La idea que es proposa és ampliar l'algorisme fent que la definició dels llindars de l'aïllament per sensibilitat de fallada puguin ser flexibles i adaptatius segons la fallada que es tracta però mantenint la fiabilitat que s'ha aconseguit en aquest treball.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

En el supòsit que aquest treball estigues destinat a ser un estudi encarregat per alguna empresa, és indispensable la generació d'un pressupost per tal de dignificar el treball i el temps invertit. El cost de la realització queda reflectit de la manera següent on es contempla l'adquisició d'una llicència *Standard* de MATLAB® així com un sou per hora de 15,74 €/h com estipula el "Conveni Col·lectiu per la Indústria Siderometalúrgica per Barcelona l'any 2019". Si s'hagués de proposar a una empresa de *drivers* de motors tipus *brushless* s'hauria de contemplar un pressupost de cara al temps que es requeriria en passar els programes de MATLAB® a un llenguatge d'execució com pot ser "Python" o "C" així com la posada en marxa del sistema.

Concepte		Cost [€]
Llicència del <i>software</i> MATLAB®		800,00
PRESSUPOST D'EXECUCIÓ		800,00
Despeses generals (5%)		40,00
Honoraris	Desenvolupament (500 h)	7870,00
	Traspàs a cas concret (100 h)	157,40
	Posada en marxa (50 h)	787,00
SUBTOTAL		9654,40
IVA (21%)		2027,42
TOTAL		11681,82

Per futures aplicacions el cost es veu reduït, ja que la inversió inicial ja estaria amortitzada en el primer pressupost. Els següents casos on s'apliqués l'objecte d'aquest treball respondria al següent pressupost:

Concepte		Cost [€]
Honoraris	Traspàs a cas concret (100 h)	157,40
	Posada en marxa (50 h)	787,00
PRESSUPOST D'EXECUCIÓ		944,40
Despeses generals (5%)		47,22
SUBTOTAL		991,62
IVA (21%)		208,24
TOTAL		1199,86

Bibliografia


- Blanke, Mogens, and Michel Kinnaert. 2016. "Diagnosis and Fault-Tolerant Control". Springer.
- Blesa, Joaquin. 2011. "Robust Identification and Fault Diagnosis Using Set-Membership Approaches." Universitat Politècnica de Catalunya. Tesi Doctoral.
- Blesa, Joaquin, Vicenç Puig, and Jordi Saludes. 2012. "Robust Identification and Fault Diagnosis Based on Uncertain Multiple Input-Multiple Output Linear Parameter Varying Parity Equations and Zonotopes." *Journal of Process Control* 22 (10): 1890–1912.
- Blesa, Joaquin, Joseba Quevedo, Vicenç Puig, Fatiha Nejjari, Raúl Zaragoza, and Alejandro Rolán. 2020. "Fault Diagnosis and Prognosis of a Brushless DC Motor Using a Model-Based Approach", Fifth European Conference of the Prognostics and Health Management Society. Turin, Italy: July 27-31 2020
- Costa Castelló, Ramon, Vicenç Puig, and Joaquin Blesa. 2016. "Introducción a La Diagnosi de Fallos Basada En Modelos Mediante Aprendizaje Basado En Proyectos." *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* 13 (2): 186–95.
- Ding, Steven X. 2013. "Model-Based Fault Diagnosis Techniques". London: Springer.
- Escobet, Teresa; Anibal Bregon, Berlamino Pulido, Vicenç Puig, 2019. "Fault Diagnosis of Dynamic Systems". *Fault Diagnosis of Dynamic Systems*. Springer.
- Gandhi, Arun, Timothy Corrigan, Leila Parsa. 2011. "Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58, pp. 1564-157.
- Gertler, Janos. 1998. "Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems." Marcel Dekker.
- Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi, Seungdeog Choi, Homayoun Meshgin-Kelk (2012). "Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis: Fault Diagnosis and Condition Monitoring". CRC Press.
- Interreg. POCTEFA [en línia]. Unió Europea: "Interreg POCTEFA", 2014-2020. [Consulta: 10 abril 2020]. Disponible a: < <https://www.interreg-alert.eu/es/poctefa/>>.
- Isermann, Rolf. 2006. "Fault-Diagnosis Systems". *Fault-Diagnosis Systems*. Springer
- Ruiz, Jordi-Roger, Javier A. Rosero, Antonio G. Espinosa, and Luis Romeral. 2009. "Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 7, pp. 2961–2969.
- Kohavi, Ron, and Foster Provost. 1963. "Glossary of Terms Glossary of Terms." *Inspiring Conversations with Women Professors* 274 (1998): 349–54.
- Ljung, Lennart. 1999. "System Identification: Theory for the User". 2nd Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Ogata, Katsuhiko. 2013. *Ingeniería de Control Moderna*. 5th Edition. PEARSON.

- Puig, Vicenç, and Joaquim Blesa. 2013. "Limnimeter and Rain Gauge FDI in Sewer Networks Using an Interval Parity Equations Based Detection Approach and an Enhanced Isolation Scheme." *Control Engineering Practice* 21 (2): 146–70.
- Singleton II, Rodney K. 2016. "Fault prognosis of bearings in electrical drives and motors", PhD Michigan State University.
- SMART PHM. Project [en línia]. Interreg POCTEFA: SMART PHM, 2020. [Consulta: 10 abril 2020]. Disponible a: < <http://smartphm.eu/smart-project-es.html>>.
- Venkatasubramanian, Venkat, Raghunathan Rengaswamy, and Surya N. Kavuri. 2003. "A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part II: Qualitative Models and Search Strategies." *Computers and Chemical Engineering* 27 (3): 313–26.
- Xia, C. L. 2002. "Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls". Wiley.



Annex A: Datasheet del Crouzet 801405

El present annex conté el *datasheet* o full de dades del motor de tipus *brushless* model 801405 de Crouzet, objecte d'aquest treball.



57 square - 225 mNm continuous with Hall effect sensors 45 W nominal at 24 V and 2000 rpm Part number 80140510



- High power motors (up to 95 W continuous at 24 VDC)
- Suitable for voltages between 6 and 75 VDC
- Ideal for applications where the control electronics have to be off centre due to the high ambient temperature
- Temperature probe built into the motor

Part numbers			
	Type	Type	References
80140510	45 W nominal at 24 V and 2000 rpm	801405	Without option

General characteristics	
Max. speed (rpm)	10000
Torque peak in (mNm)	500*
Maximum continuous torque (mNm)	225**
Motor constant (mNm/W ^{1/2})	57
Electrical time constant (ms)	2,2
Mechanical time constant (ms)	1,5
Energy losses at peak torque (W)	77
Torque/speed factor - zero impedance (mNm/ (rad/s))	3,2
Rotor inertia (gcm ²)	50
Thermal resistance (°C/W)	5,7
Max. coil temperature (°C)	120
Integrated temperature sensor	Yes***
Number of phases	3 (delta config)
Number of poles	4
Ambient operating temperature (°C)	-40 —70
Dielectric strength at 500 V DC (MΩ)	1000
Service life (h)	20000
Output ball bearing	Yes
Weight (g)	900
Length (mm)	73
Protection index	IP54

Comments	
Standard winding	
Phase-to-phase resistance (Ω)	1,72 ±12,5 %
Voltage at peak torque (V)	11,5
Current at peak torque (A)	6,7
Torque constant (mNm/A)	74,5 ±10 %
Back EMF constant (V/ (rad/s))	0,0745
Back EMF constant (V/Krpm)	7,8 ±10 %
Inductance (mH)	3,8 ±30 %

Figura A.1. Senyals mesurats en escenari amb fallada incipient ($t_{\text{fault}} = 10$ s) al sensor de corrent i_i .

Annex B: Procediment matemàtic per obtenir A_m i B_m

El present annex il·lustra el procediment matemàtic seguit per obtenir les matrius A_m i B_m (Eq. 4.12) a partir de l'equació en espai d'estats (Eq. 4.10).

Partint de l'anterior equació en espais d'estat en domini freqüencial (Eq. 4.10), es procedeix a realitzar les relacions matricials necessàries per obtenir les matrius A_m i B_m :

$$(sI - A)X(s) = BU(s) \quad (\text{Eq. B.1})$$

$$X(s) = C^{-1}Y(s)$$

Substituint a $X(s)$:

$$(sI - A)C^{-1}Y(s) = BU(s) \quad (\text{Eq. B.2})$$

Multiplicant per B^{-1} a ambdós costats:

$$B^{-1}(sI - A)C^{-1}Y(s) = B^{-1}BU(s) \quad (\text{Eq. B.3})$$

En aquest moment i mitjançant la semblança entre equacions s'arriba a les següents afirmacions:

$$A_m = B^{-1}(sI - A)C^{-1} \quad (\text{Eq. B.4})$$

$$B_m = B^{-1}B$$

I per tant, és necessari previ a realitzar els productes matricials, trobar les matrius inverses:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \rightarrow B^{-1} = \frac{1}{\det(B)} \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{eq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{eq} & 0 \\ 0 & -J \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. B.5})$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tot seguit, s'opera el terme $(sI - A)$:

$$(sI - A) = s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & -\frac{k_e}{L_{eq}} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & -\frac{k_e}{L_{eq}} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \frac{k_e}{L_{eq}} \\ -\frac{k_t}{J} & s + \frac{B}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. B.6})$$

Es realitzen els productes matricials, tenint en compte que: C^{-1} és la matriu identitat I així com el producte matricial de la matriu inversa de B (B^{-1}) per la pròpia B , que dona com a resultat la matriu identitat I . S'obté:

$$A_m = B^{-1}(sI - A)C^{-1} = B^{-1}(sI - A) = \begin{bmatrix} -L_{eq} & 0 \\ 0 & -J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \frac{k_e}{L_{eq}} \\ -\frac{k_t}{J} & s + \frac{B}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. B.7})$$

$$A_m = \begin{bmatrix} -L_{eq}s - R_{eq} & -k_e \\ k_t & -Js - B \end{bmatrix}$$

$$B_m = B^{-1}B = \begin{bmatrix} -L_{eq} & 0 \\ 0 & -J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. B.8})$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Annex C: Procediment matemàtic per obtenir residus en temps discret

El present annex il·lustra el procediment matemàtic seguit per obtenir els residus en temps discret, concretament en equació de diferències. A partir de la relació (Eq. 4.21) es realitza el canvi de variable, fent canviar el domini:

$$r_2(z) = J\Omega(z) \frac{z-1}{T_S} + B\Omega(z) - k_T I(z) + T_L(z) \quad (\text{Eq. C.1})$$

$$r_3(z) = \left(JL_{eq} \left(\frac{z-1}{T_S} \right)^2 + (R_{eq}J + BL_{eq}) \left(\frac{z-1}{T_S} \right) + BR_{eq} + k_e k_T \right) I(z) - \left(J \left(\frac{z-1}{T_S} \right) + B \right) V_{dc}(z) - k_e T_L(z) \quad (\text{Eq. C.1})$$

$$r_4(z) = \left(JL_{eq} \left(\frac{z-1}{T_S} \right)^2 + (R_{eq}J + BL_{eq}) \left(\frac{z-1}{T_S} \right) + BR_{eq} + k_e k_T \right) \Omega(z) - k_T V_{dc}(z) + \left(L_{eq} \left(\frac{z-1}{T_S} \right) + R_{eq} \right) T_L(z) \quad (\text{Eq. C.3})$$

Considerant el residu ideal ($r_i(z) = 0 \forall i = 2,3,4$) s'obté la següent relació en transformada Z:

Residu 2 ($r_2(z)$):

$$\Omega(z) \left(\frac{J}{T_S} z + B - \frac{J}{T_S} \right) = k_T I(z) - T_L(z) \quad (\text{Eq. C.4})$$

$$z\Omega(z) = \left(1 - \frac{B}{J} T_S \right) \Omega(z) + \frac{k_T}{J} T_S I(z) - \frac{1}{J} T_S T_L(z)$$

Residu 3 ($r_3(z)$):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{JL_{eq}}{T_S^2} z^2 - \frac{2JL_{eq}}{T_S^2} z + \frac{JL_{eq}}{T_S^2} + \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{T_S} z + \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{T_S} + BR_{eq} + k_e k_T \right) I(z) \\ & = \left(\frac{J}{T_S} z - \frac{J}{T_S} + B \right) V_{dc}(z) - k_e T_L(z) \end{aligned} \quad (\text{Eq. C.5})$$

$$\begin{aligned} z^2 I(z) & = \left(2 - \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{JL_{eq}} T_S \right) z I(z) + \left(\frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{JL_{eq}} T_S - \frac{BR_{eq} + k_e k_T}{JL_{eq}} T_S^2 - 1 \right) I(z) \\ & + \left(-\frac{1}{L_{eq}} T_S \right) z V_{dc}(z) + \left(\frac{1}{L_{eq}} T_S + \frac{B}{JL_{eq}} T_S^2 \right) V_{dc}(z) + \left(\frac{k_e}{JL_{eq}} T_S \right) T_L(z) \end{aligned}$$

Residu 4 ($r_4(z)$):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{JL_{eq}}{T_S^2} z^2 - \frac{2JL_{eq}}{T_S^2} z + \frac{JL_{eq}}{T_S^2} + \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{T_S} z + \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{T_S} + BR_{eq} + k_e k_T \right) \Omega(z) \\ & = k_T k_T V_{dc}(z) - \left(\frac{L_{eq}}{T_S} z - \frac{L_{eq}}{T_S} + R_{eq} \right) T_L(z) \end{aligned} \quad (\text{Eq. C.6})$$

$$z^2 \Omega(z) = \left(2 - \frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{JL_{eq}} T_s \right) z \Omega(z) + \left(\frac{R_{eq}J + BL_{eq}}{JL_{eq}} T_s - \frac{BR_{eq} + k_e k_T}{JL_{eq}} T_s^2 - 1 \right) \Omega(z) \\ + \left(\frac{k_T}{JL_{eq}} T_s \right) V_{dc}(z) + \left(-\frac{1}{J} T_s \right) T_L(z) + \left(\frac{1}{L_{eq}} T_s - \frac{R_{eq}}{JL_{eq}} T_s^2 \right) T_L(z)$$

D'aquesta relació en transformada Z es troba una equació en diferències discretes:

Residu 2 ($r_2(k)$):

$$\Omega(k) = b_1^2 \Omega(k-1) + a_1^2 i(k-1) + d_1^2 t_L(k-1) \\ b_1^2 = 1 - \frac{B}{J} T_s ; \quad a_1^2 = \frac{k_T}{J} T_s ; \quad d_1^2 = -\frac{1}{J} T_s; \quad (\text{Eq. C.7})$$

Residu 3 ($r_3(k)$):

$$i(k) = a_1^3 i(k-1) + a_2^3 i(k-2) + c_1^3 v_{dc}(k-1) + c_2^3 v_{dc}(k-2) + d_1^3 t_L(k-2) \\ a_1^3 = 2 - \frac{(R_{eq}J + BL_{eq})}{JL_{eq}} T_s ; \quad a_2^3 = \frac{1}{JL_{eq}} T_s \left((R_{eq}J + BL_{eq}) - (BR_{eq} + k_e k_T) T_s \right) - 1; \\ c_1^3 = \frac{1}{L_{eq}} T_s ; \quad c_2^3 = \frac{T_s}{L_{eq}} \left(\frac{B}{J} T_s - 1 \right) ; \quad d_1^3 = \frac{k_e}{JL_{eq}} T_s^2; \quad (\text{Eq. C.8})$$

Residu 4 ($r_4(k)$):

$$\Omega(k) = b_1^4 \Omega(k-1) + b_2^4 \Omega(k-2) + c_1^4 v_{dc}(k-1) + d_1^4 t_L(k-1) + d_2^4 t_L(k-2) \\ b_1^4 = 2 - \frac{RJ + BL}{JL} T_s ; \quad b_2^4 = \frac{1}{JL_{eq}} T_s \left((R_{eq}J + BL_{eq}) - (BR_{eq} + k_e k_T) T_s \right) - 1; \\ c_1^4 = \frac{k_T}{JL_{eq}} T_s^2 ; \quad d_1^4 = \frac{1}{J} T_s ; \quad d_2^4 = \frac{T_s}{J} \left(1 - \frac{R}{L_{eq}} T_s \right); \quad (\text{Eq. C.9})$$

Finalment, l'equació dels residus en temps discret (diferències discretes) (Eq. 4.28) - (Eq. 4.30) mostrada es troba en forma ARMA.

Annex D: Codi en MATLAB® (.m) del simulador del Motor DC equivalent al BLDC

El present annex mostra el codi utilitzat per la generació del simulador del motor DC equivalent al BLDC. Aquest codi, així com el simulador generat a Simulink, s'han posat a disposició de la comunitat a la plataforma GitHub de manera pública (enllaç: https://github.com/raulzaragoza/Fault_Diagnosis_BrushlessDCMotor). A continuació es mostra el codi:

En primera instància, s'inicialitzen els valors dels paràmetres de la planta, així com el nombre de polsos de l'encoder i el temps de mostreig.

```
clear all
close all
clc
%% GENERAL PARAMETERS
J = 50*10(-3)*10(-4); %kg.m2
b=3.2*10(-3);%Facteur couple/vitesse - impédance nulle (mNm/ (rad/s)
tau_m = J/b;
Ke = 0.0745; % V/rad/sec
Kt=74.5*10(-3);%0.01 N.m/Amp
R = 2*1.72; %Ohm
L = 2*3.8*10(-3); %H
tau_e=L/R;
num=Kt;
den=[J*L, J*R+b*L, Ke*Kt+b*R];
winf=24*Kt/(Ke*Kt+b*R);
rpm_inf=60*winf/(2*pi);
P_V_encoder=1024; %Pulsos per volta encoder
Tsd=0.0001;
Tsc=0.0001;
T_sim=100;
```

Seguidament es configura el temps en que s'ocasionarà la fallada, l'amplitud del soroll que afectarà al sensor de corrent, el temps de predicció i si es vol la fallada que sigui abrupta o incipient.

```
%% NO FAULT parameters initialization
t_fault=10;
noise_amp=0.07;
t_pred=inf;
abrup_incip=1; % 0 per abruptes, 1 per incipients
```

En aquest punt, s'inicialitzen les variables que configuren les fallades per a cada un dels vuit elements que s'han considerat com a potencials fallades. Tots s'inicien amb fallades nul·les, ja que primerament es crea l'escenari lliure de fallades.

```
% R fault
R_fault=0;
ramp_f_R=0;
vel_R=0.001;
R_nonlinear=1;
tol_R=0.05;
% J fault
J_fault=0;
ramp_f_J=0;
vel_J=0.5;
J_nonlinear=1;
tol_J=0.05;
% STUCK POSITION fault
pos_stuck=0;
stuck_duration=1;
% CURRENT SENSOR fault
f_i=0;
vel_i=0;
ramp_i=0;
% L fault
ramp_f_L=0;
L_fault=0;
vel_L=0.1;
L_nonlinear=1;
tol_L=0.05;
% B fault
ramp_f_B=0;
B_fault=0;
vel_B=0.001;
B_nonlinear=1;
tol_B=0.05;
% Vdc fault
ramp_f_Vdc=0;
Vdc_fault=0;
vel_Vdc=0.01;
% Load fault
ramp_f_Load=0;
vel_Load=0.01;
Load_fault=0;
delta_load=0.01;
```

Es calculen les equacions que modelen el motor en temps discret (suma de diferències, domini k) i s'executa el model en Simulink per obtenir la simulació.

```
%% MOTOR SYSTEMS
% ELECTRIC system
sys_el_idc=tf(1,[L R]);
sys_el_id=c2d(sys_el_idc,Tsd,'zoh');
% MECHANIC system
tfw=tf(1,[J b]);
sys_mec_wd=c2d(tfw,Tsd,'zoh');
% RUN SYSTEM
open_system('Simple_model_close_loop_vel_control_9');
aux=sim('Simple_model_close_loop_vel_control_9','SimulationMode','normal')
;
```

S'observa que el comportament sigui l'esperat observant el comportament del senyal de la velocitat (en rpm) i el del corrent (en A).

```
%% OUTPUT PLOTS (CLOSED LOOP)
% SPEED plot
figure
plot (aux.t,aux.w_est_rpm,'b')
hold on
plot (aux.t,aux.r_w,'r')
legend ('Real','Reference')
title ('vel loop')
% CURRENT plot
figure
plot (aux.t,aux.i_m,'b')
title ('current loop')

figure
subplot (2,1,1)
plot (aux.t,aux.w_est_rpm,'b')
hold on
plot (aux.t,aux.r_w,'r')
legend ('Real','Reference')
title ('Velocitat [rad/s]')
subplot (2,1,2)
plot (aux.t,aux.i_m)
title ('Corrent [A]')
```

En aquest punt, es genera un escenari lliure de fallades, el qual s'aprofitarà per crear els residus a partir de les equacions d'error exposades a la metodologia i calcular els respectius llindars.


```

%% FAULT FREE ESCENARIO
% RESIDUAL 1 (Electrical)
u1=aux.V-Ke*aux.w_est*2*pi;
i_aprox=predict(sys_el_id,[aux.i_m,u1],t_pred);

r1=aux.i_m-i_aprox;
offset_r1=mean(r1);
r1=r1-offset_r1;

figure
plot (aux.t,r1)
hold on
sigma_1d=1.2*max(abs(r1));
plot (aux.t,ones(size(r1))*sigma_1d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r1))*sigma_1d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('Ampers')
title ('Residual 1 Fault Free')

% RESIDUAL 2 (Mechanical)
u2=-aux.Tload+Kt*aux.i_m;
w_aprox_wd=predict(sys_mec_wd,[aux.w_est*2*pi,u2],t_pred);

r2_wd=aux.w_est*2*pi-w_aprox_wd;
offset_r2=mean(r2_wd);
r2_wd=r2_wd-offset_r2;

figure
plot (aux.t,r2_wd)
hold on
sigma_2d=1.2*max(abs(r2_wd));
plot (aux.t,ones(size(r2_wd))*sigma_2d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r2_wd))*sigma_2d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('rad/s')
title ('Residual 2 Discr Fault Free')

% RESIDUAL 3 (I(s)/V(s))
tf_r3=tf([J b],[J*L J*R+b*L b*R+Ke*Kt]);
discret_r3=c2d(tf_r3,Tsd,'zoh');

% u3=aux
aprox_r3=predict(discret_r3,[aux.i_m,aux.V],t_pred);
r3=aux.i_m-aprox_r3;
offset_r3=mean(r3);
r3=r3-offset_r3;

```

```

figure
plot (aux.t,r3)
hold on
sigma_3d=1.2*max(abs(r3));
plot (aux.t,ones(size(r3))*sigma_3d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r3))*sigma_3d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('Ampers')
title ('Residual 3 Discret Faul Free')

% RESIDUAL 4 (W(s)/V(s))
tf_r4=tf(Kt,[J*L J*R+b*L b*R+Ke*Kt]);
discret_r4=c2d(tf_r4,Tsd,'zoh');

aprox_r4=predict(discret_r4,[aux.w_est*2*pi,aux.V],t_pred);
r4=aux.w_est*2*pi-aprox_r4;
offset_r4=mean(r4);
r4=r4-offset_r4;

figure
plot (aux.t,r4)
hold on
sigma_4d=1.2*max(abs(r4));
plot (aux.t,ones(size(r4))*sigma_4d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r4))*sigma_4d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('rad/s')
title ('Residual 4 Discret Faul Free')

```

Un cop s'obté el valor del llindar per a cada residu, es pot generar un escenari amb fallada en qualsevol dels elements considerats. Com que el procediment a partir d'aquest punt és idèntic a l'hora de generar un escenari amb fallada, es mostra el procediment seguit per la generació de l'escenari en la resistència equivalent (Req). Primerament es configura la fallada en la resistència equivalent, mentre que es mantenen la resta de fallades nul·les. S'executa el model en Simulink per obtenir la simulació.

```

%% R_fault setting
ramp_f_R=abrup_inci;
R_fault=R;
vel_R=0.01;
tol_R=0.01;
% Disabled other fault parameters disabled
J_fault=0;
ramp_f_J=0;

```

```

vel_J=0.5;
pos_stuck=0;
stuck_duration=1;
f_i=0;
vel_i=0;
ramp_i=0;
ramp_f_L=0;
L_fault=0;
vel_L=0.1;
ramp_f_B=0;
B_fault=0;
vel_B=0.001
ramp_f_load=0;
vel_Load=0.1;
Load_fault=0;
delta_load=0.01;
ramp_f_Vdc=0;
Vdc_fault=0;
vel_Vdc=0.01;
% Run updated system
open_system('Simple_model_close_loop_vel_control_9');
aux=sim('Simple_model_close_loop_vel_control_9','SimulationMode','normal')
;

```

Un cop simulat, s'avaluen els residus, aplicant els llinars respectius per a cada residu. Es salven les dades en un fitxer per aplicar-li l'algorisme FDI.

```

%% Residual evaluation with R_fault
figure
subplot (4,1,1)
plot (aux.t,aux.V)
title ('Voltage [V]')
subplot (4,1,2)
plot (aux.t,aux.i_m)
title ('Current [A]')
subplot (4,1,3)
plot (aux.t,aux.theta)
title ('Position [rad]')
subplot (4,1,4)
plot (aux.t,aux.w_est*2*pi)
title ('Velocity [rad/s] estimated with position sensor')
%Residual 1
u1=aux.V-Ke*aux.w_est*2*pi;
i_aprox=predict(sys_el_id,[aux.i_m,u1],t_pred);
r1=aux.i_m-i_aprox;

```

```

%r1=r1-offset_r1;

figure
plot (aux.t,r1)
hold on
plot (aux.t,ones(size(r1))*sigma_1d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r1))*sigma_1d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('Ampers')
title ('Residual 1 R Fault')

%Residual 2
u2=-aux.Tload+Kt*aux.i_m;
w_aprox_wd=predict(sys_mec_wd,[aux.w_est*2*pi,u2],t_pred);

r2=aux.w_est*2*pi-w_aprox_wd;
r2=r2-offset_r2;

figure
plot (aux.t,r2)
hold on
plot (aux.t,ones(size(r2))*sigma_2d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r2))*sigma_2d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('rad/s')
title ('Residual 2 R Fault')

%Residual 3
aprox_r3=predict(discret_r3,[aux.i_m,aux.V],t_pred);
r3=aux.i_m-aprox_r3;
r3=r3-offset_r3;

figure
plot (aux.t,r3)
hold on
plot (aux.t,ones(size(r3))*sigma_3d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r3))*sigma_3d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('Ampers')
title ('Residual 3 R Fault')

%Residual 4
aprox_r4=predict(discret_r4,[aux.w_est*2*pi,aux.V],t_pred);
r4=aux.w_est*2*pi-aprox_r4;
r4=r4-offset_r4;

```

```

figure
plot (aux.t,r4)
hold on
plot (aux.t,ones(size(r4))*sigma_4d,'r')
plot (aux.t,-1*ones(size(r4))*sigma_4d,'r')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('rad/s')
title ('Residual 4 R Fault')

% R_fault evolution
figure
plot (aux.t,aux.V_R_fault)
title (' R fault f_R')
xlabel ('Time [s]')
ylabel ('Ohms \Omega')

% Save R_fault data
V_R_fault=aux.V_R_fault;
i_m = aux.i_m;
w_m = aux.w_est*2*pi;
if abrup_incip == 0
    save dades_R_Fault_abrup r1 r2 r3 r4 V_R_fault sigma_1d sigma_2d
sigma_3d sigma_4d i_m w_m
else
    save dades_R_Fault_incip r1 r2 r3 r4 V_R_fault sigma_1d sigma_2d
sigma_3d sigma_4d i_m w_m
end

```

Annex E: Codi en MATLAB® (.m) de l'algorisme FDI per la diagnosi de fallades

El present annex mostra el codi utilitzat per la generació de l'algorisme FDI per la diagnosi de fallades. Aquest codi, també s'ha posat a disposició de la comunitat a la plataforma GitHub de manera pública (enllaç: https://github.com/raulzaragoza/Fault_Diagnosis_BrushlessDCMotor). A continuació es mostra el codi:

Aquest algorisme requereix del carregat d'un fitxer de dades on s'inclouen: els quatre residus, els quatre llindars respectius, el senyal del corrent i de la velocitat.

```
clear
close all

% *****ABRUPTES*****
% load dades_Vdc_Fault_abrup
% load dades_R_Fault_abrup
% load dades_L_Fault_abrup
% load dades_isensor_Fault_abrup
% load dades_stuckpos_Fault_abrup
% load dades_B_Fault_abrup
% load dades_J_Fault_abrup
% load dades_Load_Fault_abrup

% *****INCIPIENTS*****
% load dades_Vdc_Fault_incip
% load dades_R_Fault_incip
% load dades_L_Fault_incip
% load dades_isensor_Fault_incip
% load dades_stuckpos_Fault_incip
% load dades_B_Fault_incip
% load dades_J_Fault_incip
% load dades_Load_Fault_incip
```

S'inicialitza la variable del temps, la variable de les mostres i es calcula la longitud del primer residu per tenir una referència fins on ha d'actuar l'algorisme així com es determina el temps de mostreig.

```
Tsd=0.0001;
t=0:Tsd:(length(r1)-1)*Tsd;
t=t';

k=1;
```

```
L=length(r1);
```

DETECCIÓ: El vector f_i recull el la posició (és a dir, quin residu) s'actualitza a 1 i, per tant, confirmant una inconsistència en un dels residus, condició mínima necessària per afirmar i concloure l'existència d'una fallada.

```
while and(k<=L,sum(fi)==0)
    fi=zeros(4,1);

    if abs(r1(k))>=sigma_1d
        fi(1)=1;
    end

    if abs(r2(k))>=sigma_2d
        fi(2)=1;
    end

    if abs(r3(k))>=sigma_3d
        fi(3)=1;
    end

    if abs(r4(k))>=sigma_4d
        fi(4)=1;
    end

    k=k+1;

end
```

Es guarden el nombre de mostres que s'han requerit per detectar. AÏLLAMENT: Seguidament s'aplica la FSM per tal d'aïllar la fallada de tipus 3 (sensor de posició o encoder) i la fallada de tipus 4 (sensor de corrent). Les fallades de tipus 1 (mecànica) i 2 (elèctrica), al tenir la signatura compartida, requereixen de la sensibilitat de fallada per tal de diferenciar entre cadascuna de les tres fallades que cada tipus té.

```
kfault=k-1;
fh=ones(4,1);
k=k-1;

while and(k<=L,sum(fh)>1)

    fi=zeros(4,1);
```

```

if abs(r1(k))>=sigma_1d
    fi(1)=1;
    fh(1)=0;
end

if abs(r2(k))>=sigma_2d
    fi(2)=1;
    fh(2)=0;
end

if abs(r3(k))>=sigma_3d
    fi(3)=1;
    fh(3)=0;
end

if abs(r4(k))>=sigma_4d
    fi(4)=1;
    fh(4)=0;
end

k=k+1;
end

faultype=[1,2,3,4]*fh
kisol=k-1;

```

Com s'ha mencionat anteriorment, les fallades de tipus 3 i 4 ja són aïllables. En quant a les fallades de tipus 1 i 2, primerament s'agafa el residu característic de cada fallada: per la fallada de tipus 1 (mecànica) el residu 2, mentre que per la de tipus 2 (elèctrica) el residu 1. Seguidament, es filtra tant el residu, com el senyal (en fallada de tipus 1, senyal de la velocitat; en fallada de tipus 2, senyal del corrent) així com la derivada (calculada prèviament) del senyal. Es calculen dues correlacions mitjançant la funció "correlation.m", una entre el residu i el senyal, i l'altra entre el residu i la derivada del senyal, per la qual és necessari dotar-la d'una finestra de temps (1 s, en aquest cas). Si d'entre les dues correlacions, la màxima, és superior al llindar superior (ambdós casos 0,9) o inferior al llindar inferior (0,75 pel tipus 1, 0,25 pel tipus 2), s'està en condicions d'aïllar la fallada. Si la correlació màxima es troba entre els dos llindars, s'augmenta en 1 s la finestra de correlació, de manera iterativa fins que la correlació màxima quedi polaritzada, és a dir, per sobre del llindar superior o per sota del llindar inferior.

```

switch faultype
case 1

```



```

    %% Particularitzem per fh(1)=> Fallada en B (proporcional a w_m),
    J (proporcional a dw/dt), en V;

    %%filtrem senyals d'inici

    r2_f=zeros(size(r2));
    w_m_f=zeros(size(r2));
    d_wm_f=zeros(size(r2));
    d_wm=zeros(size(r2));
    d_wm(2:end)=(w_m(2:end)-w_m(1:end-1))/Tsd;

    %%Filtre Butterworth
    fmax=1/Tsd;
    [b,a] = butter(2,10/fmax); %Frec tall =1Hz
    r2_f=filter(b,a,r2);
    w_m_f=filter(b,a,w_m);
    d_wm_f=filter(b,a,d_wm);

    figure
    subplot (3,1,1)
    plot (t,r2)
    hold on
    plot (t,r2_f)
    title ('Residu 2 filtrat vs no filtrat')
    ylabel ('\omega[rad/s]')
    subplot (3,1,2)
    plot (t,w_m)
    hold on
    plot (t,w_m_f)
    title ('Velocitat filtrada vs no filtrada')
    ylabel ('\omega[rad/s]')
    subplot (3,1,3)
    plot (t,d_wm)
    hold on
    plot (t,d_wm_f)
    title ('Derivada de la velocitat filtrada vs no filtrada')
    ylabel ('d\omega/dt[rad/s^2]')
    xlabel ('Time[s]')

    W_c=1/Tsd; %Finestra Correlacio

    mech_isol=0;
    while mech_isol==0

```

```

[corr_r2_B,corr_r2_J,r2_Wc,S_f_B,S_f_J]=correlation(r2_f,w_m_f,d_wm_f,W_c,k
isol);

t2=0:Tsd:(length(r2_Wc)-1)*Tsd;
t2=t2'+(kisol)*Tsd;
figure
subplot (3,1,1)
plot (t2,r2_Wc)
title ('Residu 2 en la finestra de correlació')
ylabel ('\omega[rad/s]')
subplot (3,1,2)
plot (t2,S_f_B)
title ('Velocitat filtrada en la finestra de correlació')
ylabel ('\omega[rad/s]')
subplot (3,1,3)
plot (t2,S_f_J)
title ('Derivada de la velocitat filtrada en la finestra de
correlació')
ylabel ('d\omega/dt[rad/s^2]')
xlabel ('Time[s]')

% Fault isolation Final part

if max ([corr_r2_B,corr_r2_J])>0.75 && max
([corr_r2_B,corr_r2_J])<0.9
    W_c=W_c+10000;
else
    if max ([corr_r2_B,corr_r2_J]) < 0.75
        disp ('Tload fault')
        mech_isol=1;
    else
        if corr_r2_B>corr_r2_J
            disp ('B fault')
            mech_isol=1;
        else
            disp ('J fault')
            mech_isol=1;
        end
    end
end
end
end
case 2
    %% Particularitzem per fh(2)=> Fallada en R (proporcional a i_m),
L (proporcional adi/dt), en V;

```

```

%filtrem senyals d'inici

r1_f=zeros(size(r1));
i_m_f=zeros(size(r1));
d_im=zeros(size(r1));
d_im(2:end)=(i_m(2:end)-i_m(1:end-1))/Tsd;
d_im_f=zeros(size(r1));

%Filtre Butterworth
fmax=1/Tsd;
[b,a] = butter(2,10/fmax); %Frec tall =1Hz
r1_f=filter(b,a,r1);
i_m_f=filter(b,a,i_m);
d_im_f=filter(b,a,d_im);

figure
subplot (3,1,1)
plot (t,r1)
hold on
plot (t,r1_f)
title ('Residu 1 filtrat vs no filtrat')
ylabel ('i[A]')
subplot (3,1,2)
plot (t,i_m)
hold on
plot (t,i_m_f)
title ('Corrent filtrat vs no filtrat')
ylabel ('i[A]')
subplot (3,1,3)
plot (t,d_im)
hold on
plot (t,d_im_f)
title ('Derivada del corrent filtrat vs no filtrat')
ylabel ('di/dt[A/s]')
xlabel ('Time[s]')

W_c=1/Tsd; %Finestra Correlacio
elect_isol=0;

while elect_isol==0

[corr_r1_R,corr_r1_L,r1_Wc,S_f_R,S_f_L]=correlation(r1_f,i_m_f,d_im_f,W_c,k
isol);

t2=0:Tsd:(length(r1_Wc)-1)*Tsd;
t2=t2'+kisol*Tsd;

```

```

figure
subplot (3,1,1)
plot (t2,r1_Wc)
title ('Residu 1 en la finestra de correlació')
ylabel ('i[A]')
subplot (3,1,2)
plot (t2,S_f_R)
title ('Corrent filtrat en la finestra de correlació')
ylabel ('i[A]')
subplot (3,1,3)
plot (t2,S_f_L)
title ('Derivada del corrent filtrat en la finestra de
correlació')
ylabel ('di/dt[A/s]')
xlabel ('Time[s]')

% Fault isolation Final part
if max ([corr_r1_R,corr_r1_L])>0.25 && max
([corr_r1_R,corr_r1_L])<0.9
    W_c=W_c+10000;
else
    if max ([corr_r1_R,corr_r1_L]) < 0.25
        disp ('Vdc fault')
        elect_isol=1;
    else
        if corr_r1_R>corr_r1_L
            disp ('R fault')
            elect_isol=1;
        else
            disp ('L fault')
            elect_isol=1;
        end
    end
end
end
end
case 3
    disp ('Stuck position fault')
case 4
    disp ('Current sensor fault')
otherwise
    warning ('Unexpected/Unknown fault')
end
end

```

Funció per calcular les correlacions en una finestra de temps: "corr_a" per la correlació entre el residu i el senyal; i "corr_b" per la correlació entre el residu i la derivada del senyal.

```
function [corr_a,corr_b,r_Wc,S_f_a,S_f_b] =  
correlation(r_f,m_f,d_m_f,W_c,samp)  
%CORRELATION  
% This function aims calculating two correlations taking residual and a  
measuring signal or its differencial.  
r_Wc =r_f(samp:samp+W_c);  
S_f_a=-1*m_f(samp:samp+W_c);  
S_f_b=-1*d_m_f(samp:samp+W_c);  
  
corr_a=sum(r_Wc.*S_f_a)/(norm(r_Wc,2)*norm(S_f_a,2));  
corr_b=sum(r_Wc.*S_f_b)/(norm(r_Wc,2)*norm(S_f_b,2));  
  
end
```

