

**Jesús López Asensio**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE DESEQUILIBRIOS EN MOTORES DE  
INDUCCIÓN TRIFÁSICOS DE MEDIA TENSIÓN**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**dirigido por Luis Guasch Pesquer**

**Grado de Ingeniería Eléctrica**



**UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI**

**Tarragona**

**(2024)**

**Índice**

1	Memoria .....	6
1.1	Objeto.....	6
1.2	Alcance .....	6
1.3	Antecedentes .....	6
1.4	Normas y referencias .....	7
1.4.1	Disposiciones legales y normas aplicadas .....	7
1.4.2	Programas de cálculo.....	7
1.4.3	Plan de gestión de la calidad durante la redacción del proyecto .....	7
1.4.4	Bibliografía.....	7
1.4.5	Otras referencias .....	7
1.5	Definiciones y abreviaturas.....	8
1.6	Requisitos de diseño .....	11
1.6.1	Motor de inducción ensayado.....	11
1.6.2	Analizador de redes .....	11
1.6.3	Simulación de los desequilibrios .....	11
1.7	Análisis de soluciones.....	12
1.7.1	Técnicas de estimación de parámetros del MIT .....	12
1.7.1.1	Mediante catálogo.....	12
1.7.1.2	Mediante ensayos experimentales .....	15
1.7.1.3	Comparación de las técnicas .....	17
1.7.2	Efecto del desequilibrio en el MIT .....	18
1.7.2.1	Cuantificación de los desequilibrios (VUF) .....	19
1.7.2.2	Efecto en la corriente (CUF) .....	21
1.7.2.3	Efecto en el par (TRF).....	24
1.8	Resultados finales .....	26
1.8.1	Estimación de parámetros del MIT .....	26
1.8.1.1	Mediante catálogo.....	26
1.8.1.2	Mediante ensayos experimentales .....	28
1.8.1.3	Comparación de las técnicas .....	29
1.8.2	Tipificación de los desequilibrios observados.....	33
1.8.3	Puntos de desequilibrios aplicados al MIT.....	34
1.8.3.1	Esquema del circuito simulado.....	34

1.8.3.1.1	Fuente de tensión .....	35
1.8.3.1.2	MIT .....	36
1.8.3.1.3	Carga mecánica .....	37
1.8.3.1.4	Aparatos de medida.....	37
1.8.3.1.5	Control de la simulación .....	38
1.8.3.1.6	Visualización de los resultados .....	40
1.8.3.2	Comportamiento del MIT .....	41
1.8.3.3	Cuantificación de los desequilibrios (VUF) .....	43
1.8.3.4	Efecto en la corriente (CUF) .....	44
1.8.3.5	Efecto en el par (TRF) .....	45
1.8.4	Conclusiones.....	46
1.9	Planificación .....	46
1.10	Orden de prioridad entre los documentos .....	46
2	Anexos.....	47
2.1	Cálculos realizados .....	47
2.1.1	Parametrización del MIT .....	47
2.1.1.1	Mediante catálogo.....	47
2.1.1.2	Mediante ensayos experimentales .....	50
2.1.1.3	Comparación de las técnicas .....	51
2.1.1.4	Cuantificación de los errores parciales y totales .....	51
2.1.2	Cálculos para los desequilibrios en el MIT .....	53
2.1.2.1	Efecto en la tensión (VUF).....	53
2.1.2.2	Efecto en la corriente (CUF) .....	55
2.1.2.3	Efecto en el par (TRF).....	57
2.1.2.4	Efecto en la velocidad.....	58
2.2	Resultados de los datos tratados en Excel .....	60
2.2.1	Ensayos experimentales.....	60
2.2.2	Parametrización mediante catálogo .....	61
2.2.3	Parametrización mediante ensayos experimentales.....	63
2.2.4	Curva mecánica de arranque.....	64
3	Planos .....	65
3.1	Esquema unifilar del MIT .....	65
3.2	Circuito equivalente del MIT en PSIM.....	65
3.3	Comportamiento del MIT en PSIM .....	65

## Índice de Figuras

Figura 1: Circuito equivalente .....	12
Figura 2: Características mecánicas del conjunto de parámetros A, B, C y D.....	13
Figura 3: Característica mecánica del conjunto de parámetros C .....	15
Figura 4: Característica mecánica de los ensayos experimentales .....	16
Figura 5: Características mecánicas del conjunto C y ensayos experimentales.....	18
Figura 6: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 0,3 % .....	22
Figura 7: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 0,6 % .....	22
Figura 8: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 1,0 % .....	23
Figura 9: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 2,0 % .....	23
Figura 10: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 3,0 % .....	24
Figura 11: Rizado de par para los valores de desequilibrio VUF.....	25
Figura 12: Rizado de par, a mayor escala, para los valores de desequilibrio VUF.....	25
Figura 13: Circuito equivalente del MIT con los nodos A y B [4].....	26
Figura 14: Configuración de la fuente de tensión Piecewise Linear en PSIM .....	31
Figura 15: Comparación de la curva característica C con la carga mecánica .....	32
Figura 16: Ondas de tensión de línea del máximo desequilibrio permitido (2,0 %).....	33
Figura 17: Tipificación del desequilibrio detectado [5] .....	33
Figura 18: Circuito del MIT simulado en PSIM .....	34
Figura 19: Fuente de tensión del MIT en PSIM .....	35
Figura 20: Conjunto de motor, carga y sensores de velocidad y par del MIT en PSIM .....	36
Figura 21: Parámetros del MIT en PSIM .....	36
Figura 22: Conjunto de voltímetros y amperímetros.....	37
Figura 23: Parámetros de la configuración de la simulación.....	38
Figura 24: Elementos para el control de datos en Simview (PSIM) .....	40
Figura 25: Elementos de la barra de herramientas de Simview (PSIM) .....	40
Figura 26: Curva de velocidad del MIT .....	41
Figura 27: Velocidad del MIT en régimen permanente .....	42

## Índice de Tablas

Tabla 1: Placa de características del catálogo del MIT .....	11
Tabla 2: Parámetros del MIT de los conjuntos A, B, C y D.....	12
Tabla 3: Resultados de los errores parciales de las cuatro curvas características .....	14
Tabla 4: Parámetros del MIT de los ensayos experimentales .....	15
Tabla 5: Resultados de los errores parciales de los ensayos experimentales .....	16
Tabla 6: Comparativa de los resultados de los errores parciales de las técnicas.....	17
Tabla 7: Comparativa de los resultados de los errores parciales de las técnicas.....	17
Tabla 8: Tensiones de línea del valor máximo VUF detectado.....	19
Tabla 9: Valor promedio de las tensiones de línea del analizador de redes .....	20
Tabla 10: Resumen del criterio escogido para el cálculo del VUF .....	20
Tabla 11: Resultados del VUF para caso de desequilibrio estudiado .....	20
Tabla 12: Resultados del CUF para caso de desequilibrio estudiado.....	21
Tabla 13: Valores TRF obtenidos a partir de cada valor de desequilibrio VUF .....	24
Tabla 14: Coeficientes de la técnica [1] para modificar los parámetros del catálogo .....	27
Tabla 15: Valores de las magnitudes fijas de la técnica mediante catálogo.....	27
Tabla 16: Valores de las magnitudes variables de la técnica mediante catálogo .....	27
Tabla 17: Resultados de los ensayos experimentales reducidos .....	28
Tabla 18: Resultados de los ensayos experimentales sin reducir junto con la velocidad....	28
Tabla 19: Resultados del Teorema de Thévenin mediante ensayos experimentales.....	28
Tabla 20: Puntos de funcionamiento de los ensayos experimentales.....	29
Tabla 21: Resultados de los puntos de funcionamiento de las técnicas .....	29
Tabla 22: Factores de los errores parciales.....	29
Tabla 23: Resultados parciales del error del par de arranque.....	30
Tabla 24: Resultados parciales del error del par máximo .....	30
Tabla 25: Resultados parciales del error del par nominal .....	30
Tabla 26: Resultados de los errores totales .....	30
Tabla 27: Valores de la fuente de tensión desequilibrada .....	35
Tabla 28: Valores de cada nivel de tensión de desequilibrio .....	35
Tabla 29: Parámetros de la carga mecánica controlada externamente .....	37
Tabla 30: Parámetros del control de la carga mecánica externa.....	37
Tabla 31: Resultados del análisis de la velocidad en régimen permanente.....	42
Tabla 32: Configuración de cada nivel de tensión desequilibrada .....	43
Tabla 33: Resultados de los niveles de tensión .....	43
Tabla 34: Resultados complejos de los niveles de tensión.....	43
Tabla 35: Resultados de los CUF en función de cada nivel de desequilibrio VUF .....	44
Tabla 36: Resultados de las corrientes en función de los niveles de tensión .....	44
Tabla 37: Resultados complejos de las corrientes.....	44
Tabla 38: Resultados de los TRF en función de cada nivel de desequilibrio VUF.....	45

# 1 Memoria

## 1.1 Objeto

Analizar el efecto de los desequilibrios registrados en una línea de alta tensión que alimenta una planta en la que se encuentra un motor de inducción trifásico de media tensión de 8,3 kW.

## 1.2 Alcance

Los diferentes aspectos trabajados para analizar el efecto de los desequilibrios en el motor de inducción trifásico de media tensión de 8,3 kW han sido:

- Estimación de los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción trifásico.
- Tratamiento de los datos registrados por un analizador de redes, conectado a la línea de 110 kV que alimenta a la planta donde se ubica el motor.
- Tipificación de los desequilibrios observados en la línea de media tensión.
- Determinación de los desequilibrios escogidos para simular el comportamiento del motor de inducción trifásico.
- Simulación mediante PSIM del motor de inducción trifásico bajo la influencia de los desequilibrios seleccionados.
- Análisis y cuantificación del efecto de los desequilibrios en el motor de inducción trifásico.

## 1.3 Antecedentes

La calidad de la energía eléctrica en la industria es un tema de gran importancia debido al impacto que suponen en el proceso productivo. Las principales razones son [6]:

- Posibles paradas de la producción, por disparos intempestivos de las protecciones eléctricas, frente a perturbaciones en la red.
- Posibles anomalías en el comportamiento de algunas cargas eléctricas.
- Posibles errores de medida en la instrumentación.
- Posibles errores en las acciones de los sistemas de control.

Según [7], “la calidad de la energía eléctrica se puede definir como una combinación entre calidad de la tensión y calidad de la corriente”. La tensión, y corriente, ideal debe tener una onda sinusoidal de amplitud y frecuencias constantes en todas las fases (iguales a su valor nominal) [6].

Si se producen cambios en estas ondas, éstas producen perturbaciones: en el caso de las tensiones, se originan en la red y afectan a los consumidores. En caso de las corrientes, se originan en las cargas de los consumidores y afectan a la red de distribución [6]. Este trabajo se centrará en los huecos de tensión producidos en la red de alimentación en una planta industrial y los desequilibrios que generan.

La detección de estos huecos de tensión se realizará mediante un analizador de redes conectado en la red eléctrica de 110 kV que alimenta la planta. Tras utilizar un transformador 110/6 kV, se estudiará los efectos de los huecos de tensión en el motor de inducción trifásico a 6 kV, objeto de este trabajo.

Para analizar los efectos de los desequilibrios de tensión en el motor, éste ha sido parametrizado mediante diferentes técnicas. Los parámetros del modelo matemático se pueden estimar a partir de las características definidas por el fabricante en el catálogo.

Existen diferentes modelos matemáticos para estudiar el comportamiento del motor de inducción trifásico bajo las condiciones de desequilibrio. En este caso, se utilizará el estudiado en las asignaturas Fundamentos de Máquinas Eléctricas, Máquinas Eléctricas y Control de Máquinas Eléctricas.

Por otra parte, para la estimación de los parámetros del modelo matemático, se aplicará la metodología definida en [1] y los resultados de los ensayos en vacío y en cortocircuito, realizados por el fabricante.

Una vez parametrizado, se utilizará el programa PSIM para simular el motor de inducción trifásico y, posteriormente, calcular los desequilibrios de tensión (*Voltage Unbalance Factor*, VUF) y sus efectos en el desequilibrio de la corriente (*Current Unbalance Factor*, CUF) y en el rizado del par (*Torque Ripple Factor*, TRF).

## 1.4 Normas y referencias

### 1.4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas

- UNE-EN 50160:2011/A2:2020: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- UNE 157001:2014: Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

### 1.4.2 Programas de cálculo

- PSIM 9.3 Demo.
- Microsoft Excel 365 (2021).

### 1.4.3 Plan de gestión de la calidad durante la redacción del proyecto

No es de aplicación en este proyecto.

### 1.4.4 Bibliografía

- Fraile Mora, J. (2000). Máquinas eléctricas. 6a. ed. Madrid: McGraw-Hill España.

### 1.4.5 Otras referencias

- [1] J. Pedra, F. Córcoles, “*Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters From Manufacturer Data*”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, núm. 2, pp. 310-317, 2004.
- [2] L. Guasch, “*P12 CÀLCUL DE PARÀMETRES I CARACTERÍSTICA MECÀNICA D’UN MOTOR D’INDUCCIÓ TRIFÀSIC*”, 17214115 Fundamentos de Máquinas Eléctricas. Universitat Rovira i Virgili, unpublished, 2020.
- [3] L. Guasch, “*Màquines Elèctriques*”, 17214120 Máquinas Eléctricas. Universitat Rovira i Virgili, unpublished, 2022.
- [4] J. A. Barrado, “*T4 - CONTROL DEL MOTOR D’INDUCCIÓ*”, 17214124 Control de Máquinas Eléctricas. Universitat Rovira i Virgili, unpublished, 2023.
- [5] L. Guasch\*, L. Youb\*\*, F. González\*, E. Zeppa\*, “*Effects of Voltage Unbalance on Torque and Current of the Induction Motors*”, \**Departament d’Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili, Spain.* \*\**Département LMD ST, Université de Batna, Algeria.*, 2012.
- [6] S. García, 2019. *Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos* [en línea]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10803/668353>.
- [7] M. H. J. Bollen y I. Y. H. Gu, “*Signal processing on power quality disturbances*”, *IEEE Press Series on Power Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [8] Y. J. Wang, “*Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor*”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, núm. 3, pp. 270-275, 2001.

## 1.5 Definiciones y abreviaturas

- $MIT$ : motor de inducción trifásico.
- $N$ : subíndice indicador del punto de funcionamiento nominal del MIT.
- $RMS$ : valor eficaz de una magnitud.
- $f$ : frecuencia del MIT.
- $p$ : pares de polos del MIT.
- $T_p$ : período de una onda sinusoidal.
- $T_p/2$ : semiperíodo de una onda sinusoidal
- $V_L$ : tensión de línea de la red de alimentación del MIT.
- $V_F$ : tensión de fase de la red de alimentación del MIT.
- $I_L$ : corriente de línea de la red de alimentación del MIT.
- $I_N$ : corriente nominal del MIT.
- $V_N$ : tensión nominal del MIT.
- $V_m$ : tensión promedio entre un conjunto de valores de tensión.
- $V_M$ : tensión máxima del MIT.
- $Z_N$ : impedancia nominal del MIT.
- $\cos \varphi_N$ : factor de potencia nominal del MIT.
- $P_N$ : potencia activa nominal del MIT.
- $a$ : factor de la Transformación de Fortescue.
- $VUF$ : factor de desequilibrio de tensión, en inglés *Voltage Unbalance Factor*.
- $\overline{VUF}$ : factor de desequilibrio complejo de tensión, en inglés *Voltage Unbalance Factor*.
- $V_{AB}$ : tensión de línea (sin neutro) del MIT conectado en estrella.
- $\overline{V_{AB}}$ : tensión de línea compleja (sin neutro) del MIT conectado en estrella.
- $CUF$ : factor de desequilibrio de corriente, en inglés *Current Unbalance Factor*.
- $\overline{CUF}$ : factor de desequilibrio complejo de corriente, en inglés *Current Unbalance Factor*.
- $TRF$ : rizado del par del eje del MIT, en inglés *Torque Ripple Factor*.
- $n$ : velocidad del MIT.
- $n_N$ : velocidad nominal del MIT.
- $n_s$ : velocidad de sincronismo del MIT.
- $n_{avg}$ : velocidad media del MIT, *average* en inglés.
- $n_{m\acute{a}x}$ : velocidad máxima absoluta en el régimen permanente del MIT.
- $n_{m\acute{i}n}$ : velocidad mínima absoluta en el régimen permanente del MIT.
- $n_{pp}$ : velocidad pico a pico en el régimen permanente del MIT.
- $n_r$ : rizado de la velocidad en el régimen permanente del MIT.
- $\omega$ : velocidad angular del MIT.
- $\omega_N$ : velocidad angular nominal del MIT.
- $\omega_s$ : velocidad angular de sincronismo del MIT.
- $s$ : deslizamiento del MIT
- $T$ : par del MIT.
- $T_o$ : par de arranque del MIT.
- $M_A$ : par de arranque del MIT, *Locked-rotor torque*, en inglés.
- $T_M$ : par máximo del MIT.
- $M_K$ : par máximo del MIT, en inglés *Break-down torque*.
- $T_N$ : par nominal del MIT.
- $M_N$ : par nominal del MIT, en inglés *Rated torque*.

- $T_o'$ : par de arranque del MIT, el cual depende de una constante definida previamente.
- $T_M'$ : par máximo del MIT, el cual depende de una constante definida previamente.
- $T_N'$ : par nominal del MIT, el cual depende de una constante definida previamente.
- $T_S$ : par de sincronismo del MIT.
- $T_{eje}$ : par en el eje del MIT.
- $T_c$ : par del MIT, el cual depende de valores del catálogo del MIT.
- $T_E$ : par del MIT, el cual depende de valores de los ensayos experimentales del MIT.
- $T_{avg}$ : par medio del eje del MIT, *average* en inglés.
- $T_{pp}$ : par pico a pico del MIT.
- $T_{máx}$ : par máximo del MIT.
- $T_{mín}$ : par mínimo del MIT.
- $k_o$ : constante que define el error en el par de arranque del MIT.
- $k_M$ : constante que define el error en el par máximo del MIT.
- $k_N$ : constante que define el error en el par nominal del MIT.
- $e_o$ : error parcial en el par de arranque del MIT.
- $e_M$ : error parcial en el par máximo del MIT.
- $e_N$ : error parcial en el par nominal del MIT.
- $e_T$ : error total de los puntos de funcionamiento del MIT.
- $J$ : momento de inercia del MIT y de la carga mecánica del MIT.
- $R_r$ : resistencia del rotor del MIT.
- $R_{r,E}$ : resistencia del rotor del MIT, definida en los ensayos experimentales.
- $k_R$ : constante que modifica el valor de la resistencia del rotor del MIT.
- $R_s$ : resistencia del estátor del MIT.
- $R_{s,c}$ : resistencia del estátor del MIT, producto de la constante  $k_R$ .
- $R_{s,E}$ : resistencia del estátor del MIT, definida en los ensayos experimentales.
- $X_{ls}$ : reactancia del flujo de dispersión del estátor del MIT.
- $X_{ls,c}$ : reactancia del flujo de dispersión del estátor del MIT, producto de la constante  $k_X$ .
- $X_{ls,E}$ : reactancia del flujo de dispersión del estátor del MIT, definida en los ensayos experimentales.
- $X_{lr}$ : reactancia del flujo de dispersión del rotor del MIT.
- $k_X$ : constante que modifica el valor de la reactancia del flujo de dispersión del rotor del MIT.
- $X_{lr,E}$ : reactancia del flujo de dispersión del rotor del MIT, definida en los ensayos experimentales.
- $X_m$ : reactancia magnetizante del MIT.
- $X_{m,E}$ : reactancia magnetizante del MIT, definida en los ensayos experimentales.
- $R_{Fe}$ : resistencia del circuito magnético del MIT.
- $V_{Th}$ : tensión de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $\bar{V}_{Th}$ : tensión compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $\bar{V}_{Th,c}$ : tensión compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de una constante definida previamente.

- $\bar{V}_{Th,E}$ : tensión compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de los ensayos experimentales.
- $Z_{Th}$ : impedancia de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $\bar{Z}_{Th}$ : impedancia compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $\bar{Z}_{Th,c}$ : impedancia compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de una constante definida previamente.
- $\bar{Z}_{Th,E}$ : impedancia compleja de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de los ensayos experimentales.
- $R_{Th}$ : parte resistiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $R_{Th,c}$ : parte resistiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de una constante definida previamente.
- $R_{Th,E}$ : parte resistiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de valores de los ensayos experimentales.
- $X_{Th}$ : parte reactiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT.
- $X_{Th,c}$ : parte reactiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de una constante definida previamente.
- $X_{Th,E}$ : parte reactiva de la impedancia equivalente de Thévenin del circuito equivalente del MIT, la cual depende de valores de los ensayos experimentales.

## 1.6 Requisitos de diseño

### 1.6.1 Motor de inducción ensayado

Para el desarrollo de este TFG se ha utilizado un motor de inducción trifásico, de ahora en adelante MIT, cuya placa de características se puede observar a continuación. Es un motor de jaula de ardilla de SIEMENS, “SIMOTICS HV M”.

Tabla 1: Placa de características del catálogo del MIT

Catálogo del MIT	
Conexión	Y
$V_N$ [V]	6000
$I_N$ [A]	898
$P_N$ [kW]	8300
$n_N$ [ $min^{-1}$ ]	1493
$f$ [Hz]	50
$\cos \varphi_N$	0,91
Pares de polos	2
Rendimiento [%]	97,8

### 1.6.2 Analizador de redes

El analizador de redes, *PowerStudio SCADA (Circutor)*, se encuentra en la red eléctrica de 110 kV. Registra el consumo de toda la planta, no solamente del MIT.

La tensión registrada se aplica a un transformador de 110/6 kV que se conecta a una línea de media tensión que alimenta al MIT.

En este trabajo se ha dispuesto de los valores registrados por dicho analizador, con un muestreo cada 15 minutos entre las siguientes fechas: desde el 1 de agosto del 2023 al 30 de septiembre del 2023.

Las magnitudes registradas por dicho analizador que se han utilizado en este trabajo han sido los valores eficaces de tensión de línea.

### 1.6.3 Simulación de los desequilibrios

La simulación del MIT para analizar los efectos de los desequilibrios se ha realizado mediante el programa PSIM.

## 1.7 Análisis de soluciones

### 1.7.1 Técnicas de estimación de parámetros del MIT

En este apartado se van a analizar diferentes técnicas para la estimación de los parámetros del MIT. La metodología utilizada para su análisis ha sido obtener la característica mecánica para cada una de ellas, donde se observa la evolución del par en función de la velocidad angular  $T(n)$ , y compararlas con los valores de estas variables, facilitados por el fabricante en algunos puntos de funcionamiento singulares, mediante el cálculo de un error para cada una de las técnicas.

Las técnicas de estimación de parámetros del MIT analizadas en este trabajo han sido:

- Catálogo.
- Ensayos experimentales.

#### 1.7.1.1 Mediante catálogo

Para la estimación de los 5 parámetros (mostrados en la Figura 1 de [4]) a partir de la placa de características, se ha utilizado la técnica definida en [1]. Dicha técnica mantiene fijos 3 de los 5 parámetros ( $R_r$ ,  $X_m$  y  $X_{lr}$ ), y los otros 2 ( $R_s$  y  $X_{ls}$ ) son modificados mediante unos coeficientes que serán definidos posteriormente. Dichos coeficientes pueden adquirir 4 valores diferentes, con el fin de adaptarse a 4 topologías constructivas de este tipo de motores.

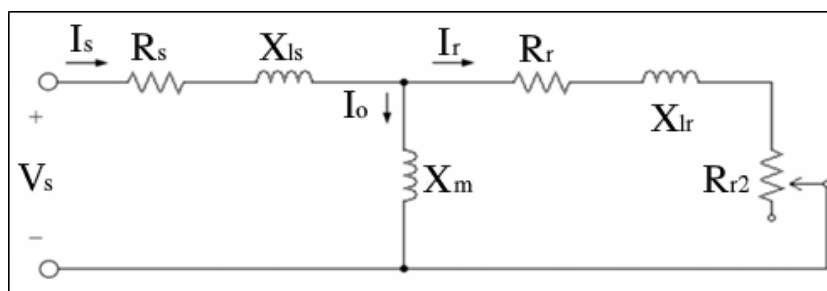


Figura 1: Circuito equivalente

En definitiva, aplicando esta técnica se han estimado 4 conjuntos de parámetros (A, B, C y D), que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del MIT de los conjuntos A, B, C y D

Técnica	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$X_{ls}$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$X_{lr}$ [ $\Omega$ ]
Catálogo: Curva A	0,030	0,000	9,520	0,020	0,476
Catálogo: Curva B	0,030	0,238			
Catálogo: Curva C	0,030	0,476			
Catálogo: Curva D	0,010	0,238			

Para cada conjunto de parámetros se ha calculado la característica mecánica:  $T_A(n)$ ,  $T_B(n)$ ,  $T_C(n)$  y  $T_D(n)$ , mediante las expresiones matemáticas definidas en el apartado 2 Anexos. En la Figura 2 se muestran gráficamente las 4 características mecánicas mencionadas, junto con los puntos de funcionamiento definidos por el fabricante: arranque, nominal y sincronismo. También se indica en la misma gráfica, y con una línea discontinua, el valor del par máximo indicado por el fabricante.

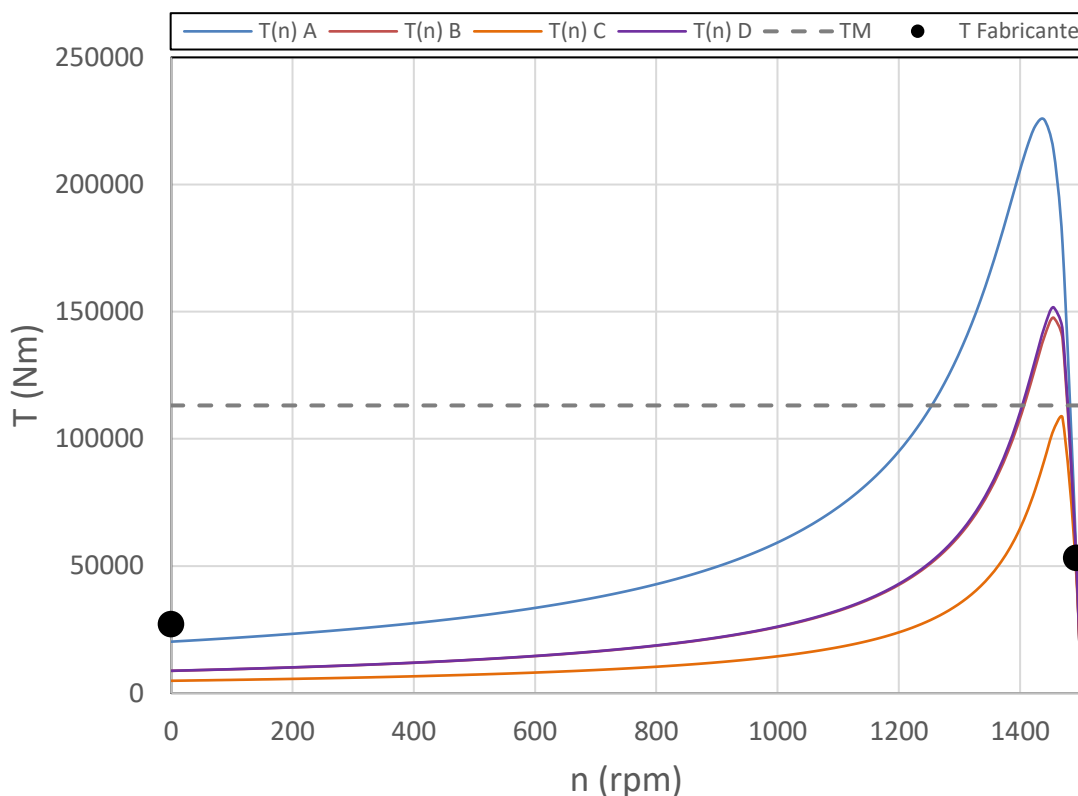


Figura 2: Características mecánicas del conjunto de parámetros A, B, C y D

Se ha realizado un análisis cualitativo de los errores de las curvas calculadas para los 4 conjuntos de parámetros obtenidos a partir de la placa de características, a partir de su comparación con los 3 puntos de funcionamiento y el par máximo facilitados por el fabricante:

- Ninguna de las curvas consigue superar el par de arranque facilitado por el fabricante,  $T_o$ , si bien el conjunto de parámetros A (línea azul) es el que más se aproxima.
- Respecto al par máximo, el conjunto de parámetros C (línea naranja) es el que más se aproxima.
- Respecto al punto de funcionamiento nominal, las 4 curvas tienen un comportamiento muy similar, y aparentemente cercano al valor facilitado por el fabricante.
- En el punto de sincronismo observamos que todas las curvas pasan exactamente por él.

Teniendo en cuenta que las perturbaciones se producen cuando el motor está trabajando en el punto de funcionamiento nominal, o en una zona muy próxima, se considera que cualitativamente la curva C es la que mejor se ajusta a los valores facilitados por el fabricante.

También se ha realizado un análisis cuantitativo, calculando el error de cada conjunto de parámetros a partir de los errores parciales en el par de arranque ( $e_o$ ), en el par máximo ( $e_M$ ) y el par nominal ( $e_N$ ). Como se ha comentado anteriormente, las perturbaciones se producen cuando el motor trabaja cerca de su punto de funcionamiento nominal, y por este motivo se han ponderado los errores de la forma siguiente: 0,2 para el par de arranque; 0,3 para el par máximo y 0,5 para el par nominal.

$$e_T = (0,2 \cdot e_o + 0,3 \cdot e_M + 0,5 \cdot e_N) \cdot 100 \quad (1)$$

$$e_o = \left| \frac{T_o' - T_o}{T_o} \right| \quad (2)$$

$$e_M = \left| \frac{T_M' - T_M}{T_M} \right| \quad (3)$$

$$e_N = \left| \frac{T_N' - T_N}{T_N} \right| \quad (4)$$

Los errores de par calculados para cada conjunto de parámetros se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3: Resultados de los errores parciales de las cuatro curvas características*

<b>Técnica</b>	<b><math>e_o</math> [%]</b>	<b><math>e_M</math> [%]</b>	<b><math>e_N</math> [%]</b>	<b><math>e_T</math> [%]</b>
Catálogo: Curva A	5,06	29,79	1,52	36
Catálogo: Curva B	13,53	9,16	4,48	27
<b>Catálogo: Curva C</b>	<b>16,41</b>	<b>1,31</b>	<b>7,38</b>	<b>25</b>
Catálogo: Curva D	13,51	10,24	4,08	28

El conjunto de parámetros que se ha escogido como resultado de los análisis cualitativo y cuantitativo es la C. En la Figura 3 se muestra la característica mecánica con el conjunto de parámetros C.

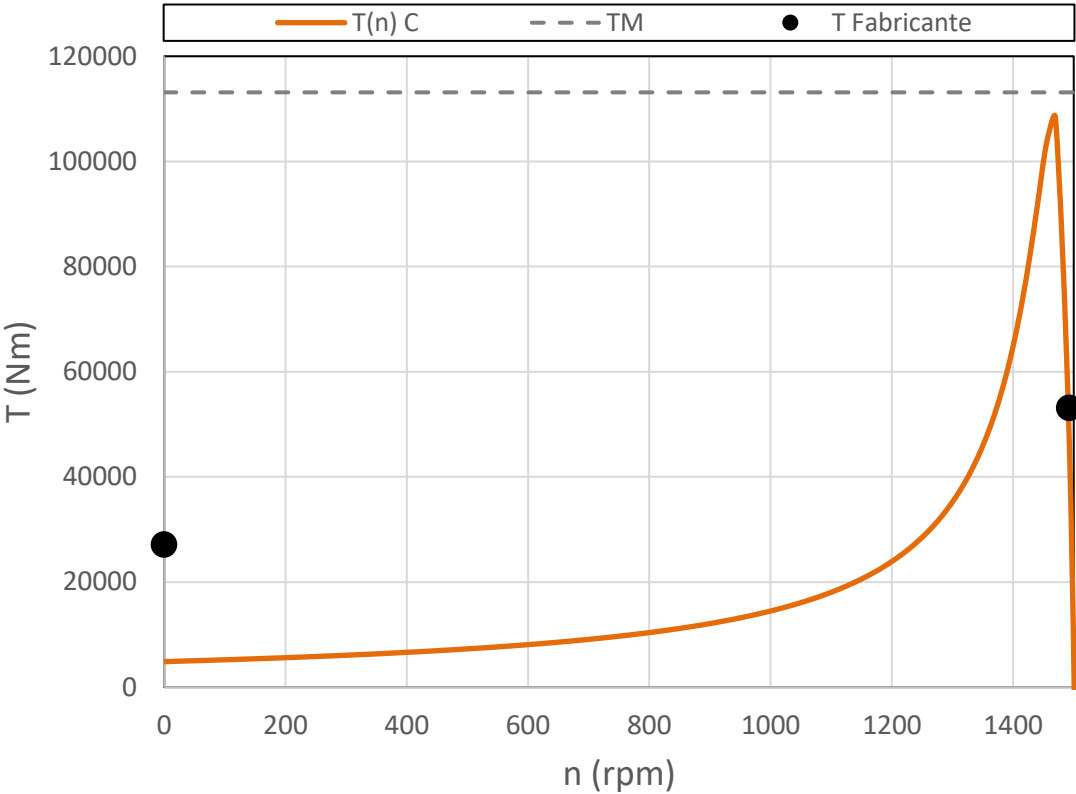


Figura 3: Característica mecánica del conjunto de parámetros C

**1.7.1.2 Mediante ensayos experimentales**

Además del catálogo, puesto que el motor de este trabajo es de elevada potencia y coste, el fabricante adjuntó los datos de los ensayos de vacío y cortocircuito, a partir de los cuales se ha calculado un nuevo conjunto de parámetros, mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del MIT de los ensayos experimentales

Técnica	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$X_{lr}$ [ $\Omega$ ]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$X_{ls}$ [ $\Omega$ ]
Ensayos experimentales	0,067	33,171	0,165	0,019	0,589

A partir de estos parámetros constantes se ha obtenido la característica mecánica  $T_E$  mediante las expresiones matemáticas definidas en el apartado 2 Anexos. En la Figura 4 se muestra gráficamente la característica mecánica mencionada junto con los puntos de funcionamiento definidos por el fabricante: arranque, nominal y sincronismo. También se indica en la misma gráfica, y con una línea discontinua, el valor del par máximo indicado por el fabricante.

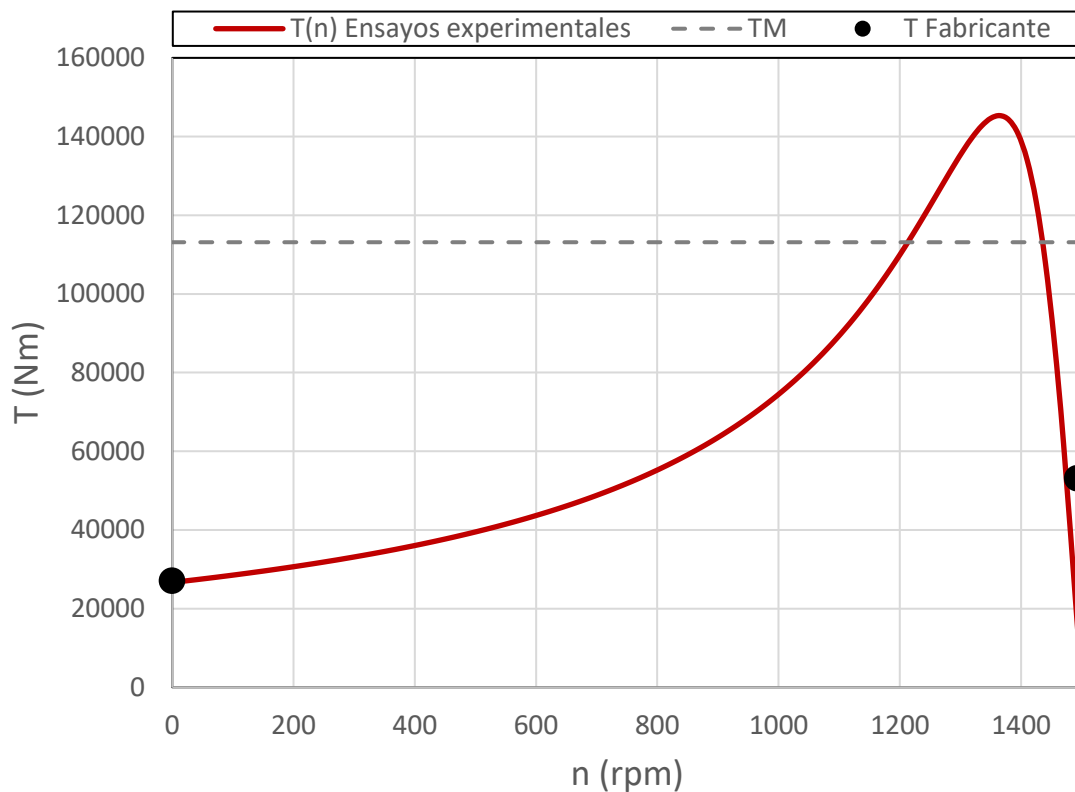


Figura 4: Característica mecánica de los ensayos experimentales

Se ha realizado un análisis cualitativo del error de la curva calculada para el conjunto de parámetros de los ensayos experimentales, a partir de su comparación con los 3 puntos de funcionamiento y el par máximo facilitados por el fabricante:

- La curva alcanza el par de arranque facilitado por el fabricante.
- Respecto el par máximo, la curva supera su valor.
- Respecto al punto de funcionamiento nominal, la curva se aleja del mismo.
- La curva pasa exactamente por el punto de sincronismo.

Paralelamente al cálculo del apartado anterior, se ha realizado un análisis cuantitativo, a partir de los errores parciales en el par de arranque ( $e_o$ ), en el par máximo ( $e_M$ ) y el par nominal ( $e_N$ ). Mediante las ecuaciones (1)-(4), se han ponderado los errores de la forma siguiente: 0,2 para el par de arranque; 0,3 para el par máximo y 0,5 para el par nominal.

Los errores de par calculados para el conjunto actual de parámetros se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados de los errores parciales de los ensayos experimentales

Técnica	$e_o$ [%]	$e_M$ [%]	$e_N$ [%]	$e_T$ [%]
Ensayos experimentales	0,32	8,53	35,65	45

### 1.7.1.3 Comparación de las técnicas

Tras analizar los resultados obtenidos con los dos métodos en este trabajo, se ha concluido que hay claras diferencias cualitativas entre ambas técnicas:

- La curva de los ensayos experimentales presenta un error muy pequeño en el punto de arranque, mientras que la obtenida mediante el catálogo, la curva C, determina un par de arranque claramente inferior al indicado por el fabricante.
- La curva característica C no supera el par máximo indicado por el fabricante, mientras que la obtenida mediante ensayos experimentales sí lo supera.
- La curva C pasa muy cercana al punto de funcionamiento nominal. En cambio, la curva obtenida mediante ensayos experimentales no es capaz de pasar por este punto.

Cuantitativamente, la curva C tiene un error total de 25 %, frente al 45 % de la curva de los ensayos experimentales. Tal y como se puede observar en la Tabla 6, el error parcial del punto nominal en la curva C resulta muy bajo en comparación al obtenido con los ensayos experimentales.

Tabla 6: Comparativa de los resultados de los errores parciales de las técnicas

Técnica	$e_o$ [%]	$e_M$ [%]	$e_N$ [%]	$e_T$ [%]
Catálogo: Curva C	16,41	1,31	7,38	25
Ensayos experimentales	0,32	8,53	35,65	45

Por otra parte, en la Tabla 7 se muestra el valor de los parámetros del circuito equivalente para la estimación mediante datos de catálogo (curva C) y mediante ensayos experimentales.

Tabla 7: Comparativa de los resultados de los errores parciales de las técnicas

Técnica	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$X_{lr}$ [ $\Omega$ ]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$X_{ls}$ [ $\Omega$ ]
Catálogo: Curva C	0,020	9,520	0,476	0,030	0,476
Ensayos experimentales	0,067	33,171	0,165	0,019	0,589

Teniendo en cuenta que los desequilibrios en el MIT se han producido entre el punto nominal y el de sincronismo, la decisión final ha sido utilizar la curva C definida con la técnica de [1]. Por tanto, se simularán sus parámetros con PSIM para calcular y valorar los desequilibrios presentados en los apartados posteriores.

En la Figura 5 se muestran las características mecánicas del conjunto de parámetros C junto con la curva de los ensayos experimentales.

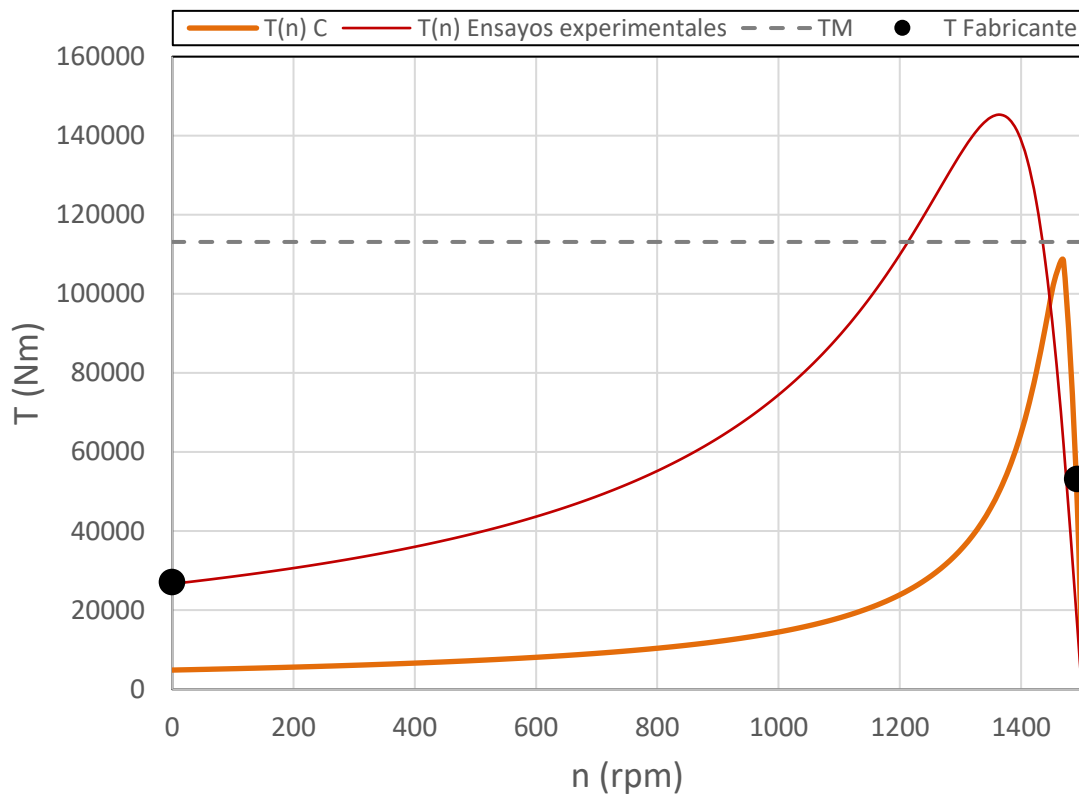


Figura 5: Características mecánicas del conjunto C y ensayos experimentales

### 1.7.2 Efecto del desequilibrio en el MIT

En este apartado se muestra la influencia de la severidad del desequilibrio, cuantificada mediante el factor de tensión *Voltage Unbalance Factor* (VUF). A partir de los valores de las ondas de tensión de línea, registradas por el analizador de redes de la planta donde se encuentra el MIT, se ha cuantificado el factor de desequilibrio VUF.

El factor de desequilibrio de tensión, VUF, se cuantifica sobre una base de cien y se utiliza en la normativa UNE-EN 50160:2011/A2:2020 para definir la severidad del desequilibrio.

En este apartado se han analizado los efectos de diferentes valores de desequilibrio, en la corriente y el par del MIT. Para ello se han utilizado dos factores: el desequilibrio de corriente *Current Unbalance Factor* (CUF) y el rizado de par *Torque Ripple Factor* (TRF), ambos sobre una base de cien.

Para realizar este análisis se ha simulado el comportamiento del MIT a cada nivel de desequilibrio, y a partir de las formas de onda de las corrientes y el par, se han calculado los mencionados factores CUF y TRF. Esta simulación se ha llevado a cabo mediante PSIM, utilizando el conjunto de parámetros seleccionado en el apartado anterior.

### 1.7.2.1 Cuantificación de los desequilibrios (VUF)

El cálculo del desequilibrio VUF se ha realizado a partir de las medidas obtenidas por el analizador de redes conectado en la red eléctrica de 110 kV que alimenta la planta. Para alimentar a 6 kV el motor de inducción objeto de este trabajo, se utiliza un transformador 110/6 kV. Por tanto, se ha supuesto que el MIT está sometido a los mismos desequilibrios que se han registrado en la red de alta tensión, sin tener en cuenta la posible atenuación y afectación del transformador, ni la influencia del resto de cargas conectadas a la línea de media tensión, que podría acentuar el nivel de desequilibrio.

El cálculo del VUF, según [3] y [5], debe realizarse sobre medidas instantáneas con las fórmulas (5)-(8). Las tensiones aplicadas en éstas son de línea.

$$VUF = |\overline{VUF}| = \left| \frac{\overline{V}_2}{\overline{V}_1} \right| \cdot 100 \quad (5)$$

$$\overline{V}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\overline{V}_{AB} + a \cdot \overline{V}_{BC} + a^2 \cdot \overline{V}_{CA}) \quad (6)$$

$$\overline{V}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\overline{V}_{AB} + a^2 \cdot \overline{V}_{BC} + a \cdot \overline{V}_{CA}) \quad (7)$$

$$a = e^{j \frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

El máximo desequilibrio detectado es del 0,3 %. Esta medición cumple la normativa que limita este desequilibrio en un 2 %. Se muestra en la Tabla 8 las tensiones de línea sobre las cuales se ha detectado el máximo desequilibrio VUF.

Tabla 8: Tensiones de línea del valor máximo VUF detectado

$V_{AB} (L_1 L_2) [kV]$	$V_{BC} (L_2 L_3) [kV]$	$V_{CA} (L_3 L_1) [kV]$	$VUF [\%]$
109,30	108,38	109,20	0,3

El VUF que se ha obtenido pertenece al tipo T3 de *under-voltage* [5], un tipo de desequilibrio afecta a las tres líneas y define sus valores inferiores a la tensión nominal de línea (110 kV).

Debido a que el máximo desequilibrio obtenido ha sido del 0,3 %, se ha propuesto estudiar los efectos que producirían desequilibrios superiores siguiendo el siguiente criterio:

- Se ha calculado el valor promedio de las tensiones de línea de todas las mediciones, donde dos las tensiones eran aproximadamente iguales.
- Se ha considerado que las dos tensiones que tendrán el mismo valor han sido  $V_2$  y  $V_3$ .
- Para facilitar las condiciones de estudio,  $V_L$  ha sido la nominal ( $V_N$ ).
- La tensión que difería del resto,  $V_1$ , ha sido la escogida para ser modificada y obtener valores superiores de VUF.
- La tensión  $V_1$  se ha calculado teniendo en cuenta que  $V_1 < V_N$ .
- Se ha supuesto una separación entre fase y fase de 120°.

Los valores que describen el criterio se muestran en la Tabla 9 y 10.

Tabla 9: Valor promedio de las tensiones de línea del analizador de redes

Valor del promedio de tensiones	
$V_{1m}$ [kV]	108,1
$V_{2m}$ [kV]	107,6
$V_{3m}$ [kV]	108,1

Tabla 10: Resumen del criterio escogido para el cálculo del VUF

Criterio escogido	
$V_2 = V_3$ [kV]	109,3
$V_N = V_L$ [kV]	110,0

Los valores de VUF analizados han sido 0,3 %, 0,6 %, 1,0 %, 2,0 % y 3,0 %. Como la normativa marca un valor del 2,0 % como el límite de un sistema equilibrado, este conjunto de valores permite analizar el comportamiento del MIT frente a tensiones trifásicas que sufren un desequilibrio por debajo del límite y por encima del mismo.

Los resultados de VUF obtenidos a partir de las tensiones descritas se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Resultados del VUF para caso de desequilibrio estudiado

Caso	$V_{AB} (L_1L_2)$ [kV]	$V_{BC} (L_2L_3)$ [kV]	$V_{CA} (L_3L_1)$ [kV]	VUF [%]
1	108,38	109,30	109,30	0,3
2	107,30	109,30	109,30	0,6
3	106,00	109,30	109,30	1,0
4	102,80	109,30	109,30	2,0
5	99,90	109,30	109,30	3,0

### 1.7.2.2 Efecto en la corriente (CUF)

La consecuencia principal del desequilibrio de tensiones, en el punto de conexión del MIT, es el desequilibrio en las corrientes que consume el motor.

Como se ha comentado anteriormente, se ha utilizado el programa PSIM para simular el comportamiento del MIT frente a desequilibrios de tensión, obteniendo como resultado las ondas de corriente. A partir de ellas se ha procedido al cálculo del CUF, para analizar el efecto que produce el desequilibrio de tensión, en el desequilibrio de corriente.

Para el cálculo del CUF se han utilizado las fórmulas (9)-(11) de [3] y [5]. El factor “ $a$ ” es el mismo que se ha utilizado para el cálculo del VUF. Se ha supuesto que el desfase entre corrientes es de  $120^\circ$ .

$$CUF = |\overline{CUF}| = \left| \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} \right| \cdot 100 \quad (9)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + a \cdot \bar{I}_B + a^2 \cdot \bar{I}_C) \quad (10)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + a^2 \cdot \bar{I}_B + a \cdot \bar{I}_C) \quad (11)$$

En la Tabla 12 se muestran los resultados del CUF, para cada caso de desequilibrio estudiado. En todos ellos se observa que la severidad del desequilibrio en la corriente es notablemente superior que el desequilibrio de tensión que lo origina.

Tabla 12: Resultados del CUF para caso de desequilibrio estudiado

Caso	VUF [%]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	CUF [%]
1	0,3	980	998	982	0,6
2	0,6	976	1014	980	1,2
3	1,0	972	1031	978	1,9
4	2,0	961	1076	975	3,6
5	3,0	952	1118	972	5,1

Si observamos la tabla anterior, las corrientes obtenidas superan el valor nominal del MIT (898 A). Este efecto es habitual, tal y como indica [5], en los tipos *under-voltage* (T1, T2 y T3) el valor RMS de algunas fases puede superar la corriente nominal del MIT.

Gráficamente, estos resultados también son visibles en las formas de onda de las corrientes. En las Figuras siguientes se puede observar cómo, a medida que aumentaba el desequilibrio de corriente, los valores máximos de las corrientes se ven afectados, siendo claramente diferentes.

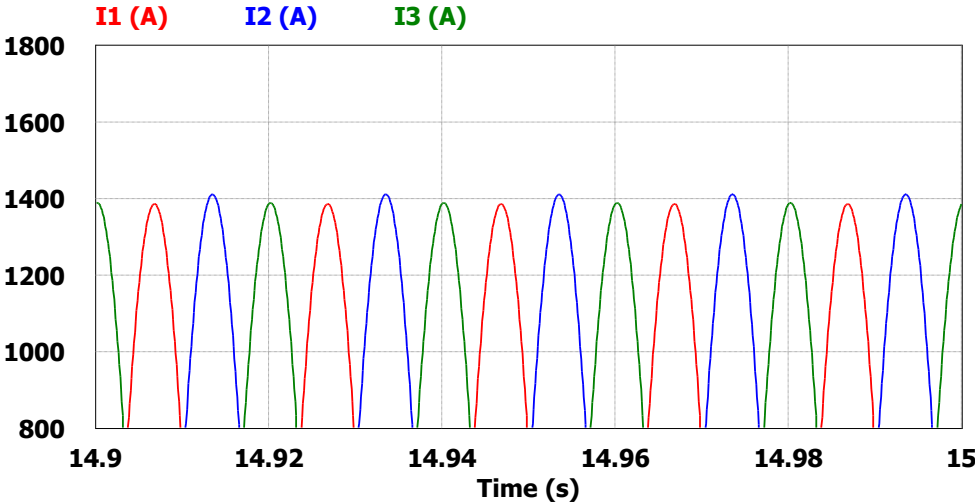


Figura 6: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 0,3 %

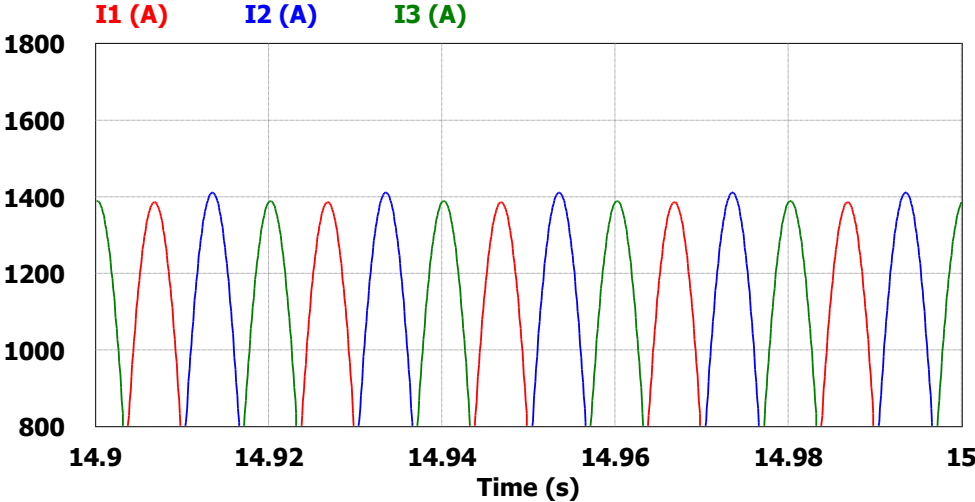


Figura 7: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 0,6 %

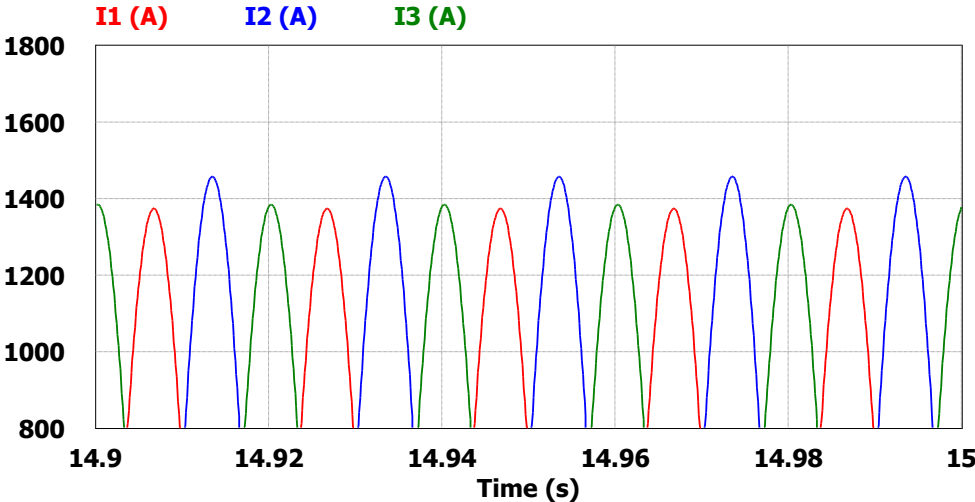


Figura 8: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 1,0 %

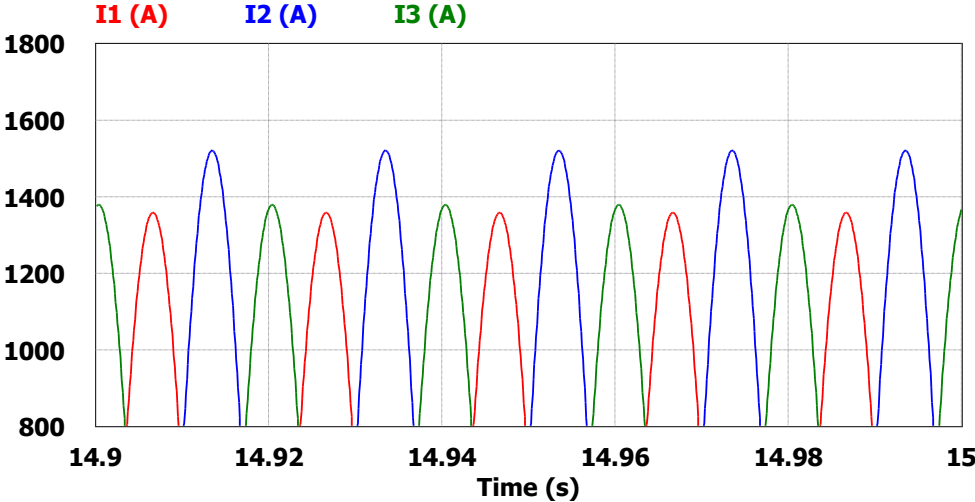


Figura 9: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 2,0 %

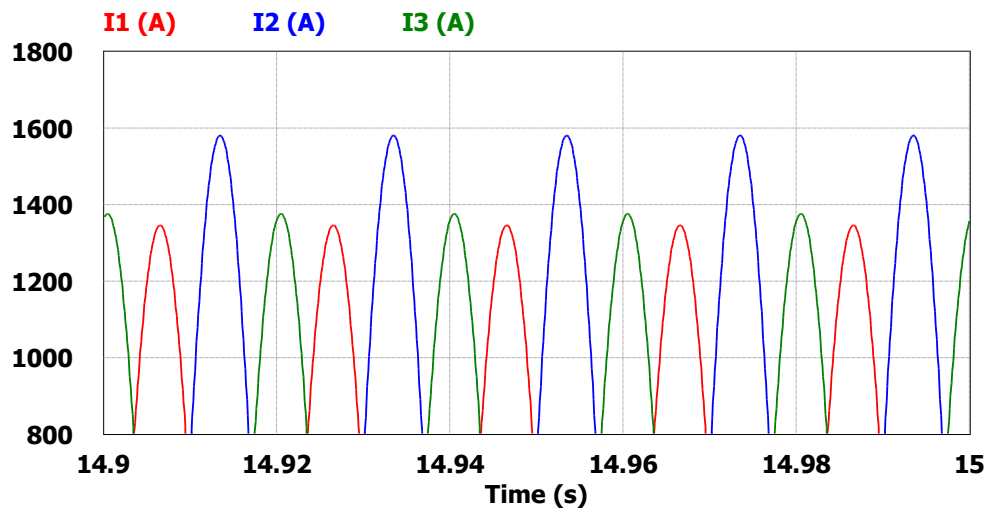


Figura 10: Formas de onda de las corrientes para el caso de VUF de 3,0 %

### 1.7.2.3 Efecto en el par (TRF)

Otro de los efectos que provoca un desequilibrio de tensión en el MIT, es la aparición de un rizado de par. Un sistema perfectamente equilibrado determina un par continuo y constante sin rizado. Sin embargo, cualquier desequilibrio de tensión genera rizado en el par.

Este rizado se cuantifica mediante las ecuaciones (12) y (13).

$$TRF = \frac{T_{pp}}{T_{avg}} \cdot 100 \quad (12)$$

$$T_{pp} = T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n} \quad (13)$$

De manera paralela con el CUF, el rizado en el par también muestra una clara afectación con el VUF. En la Tabla 13 se muestran los valores obtenidos a partir de cada valor de desequilibrio en la alimentación del MIT.

Tabla 13: Valores TRF obtenidos a partir de cada valor de desequilibrio VUF

Caso	VUF [%]	TRF [%]
1	0,3	1,20
2	0,6	2,52
3	1,0	3,97
4	2,0	7,71
5	3,0	11,11

La afectación del rizado de par se observa gráficamente, para diferentes valores de desequilibrio de tensión, en las Figuras 11 y 12.

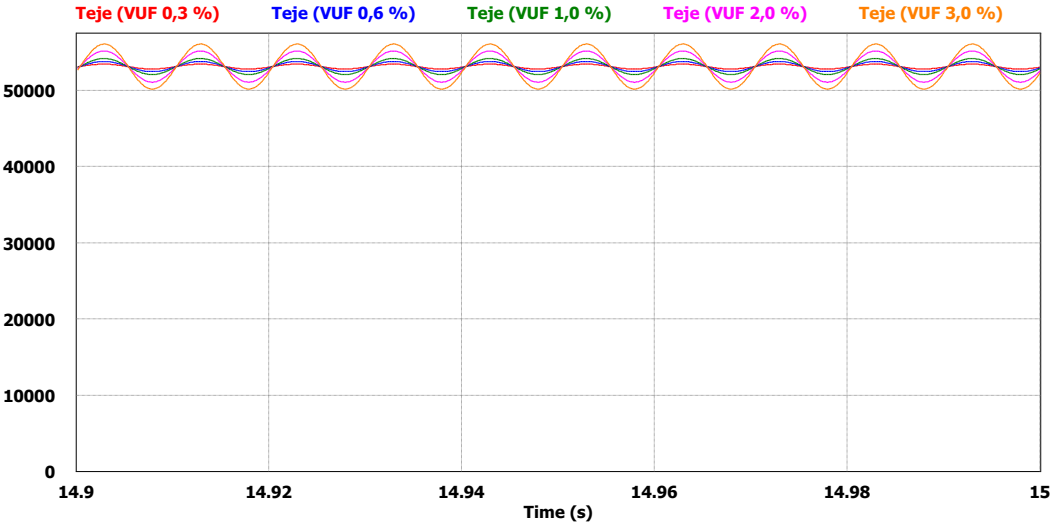


Figura 11: Rizado de par para los valores de desequilibrio VUF

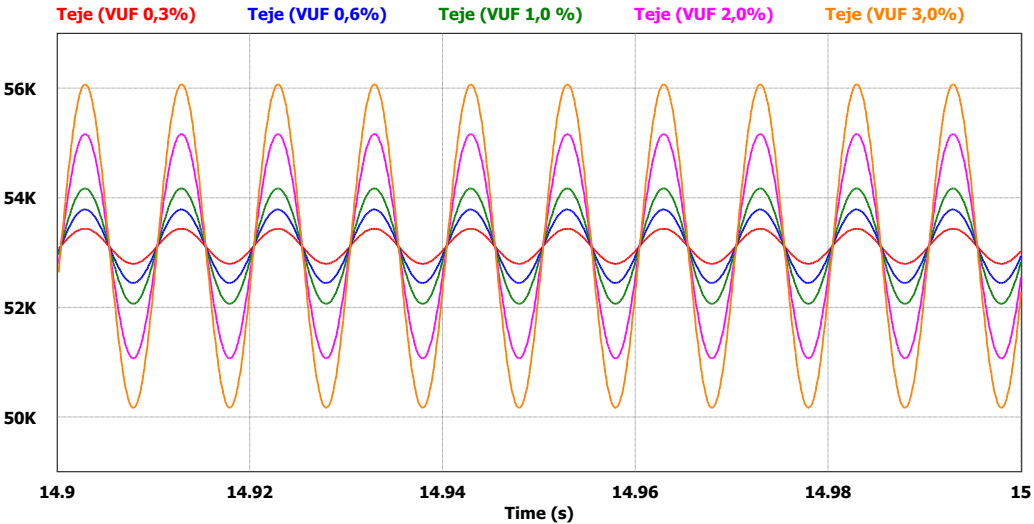


Figura 12: Rizado de par, a mayor escala, para los valores de desequilibrio VUF

Además del rizado producido, se ha observado un aumento en la frecuencia del par en el eje de valor 100 Hz. Este efecto es correcto porque, debido a que el par se obtiene a partir de la potencia, y éste es el producto de la tensión por la corriente, la frecuencia se multiplica por dos, hasta 100 Hz [6]. Además, “al multiplicar dos ondas sinusoidales que tienen la misma frecuencia (50 Hz), se obtiene una onda sinusoidal de frecuencia doble (100 Hz)” [6].

## 1.8 Resultados finales

### 1.8.1 Estimación de parámetros del MIT

#### 1.8.1.1 Mediante catálogo

En este apartado se han estimado los parámetros del circuito equivalente del MIT a partir de la placa de características. El circuito equivalente empleado parte de las siguientes hipótesis [6]:

- Estátor y rotor lisos (entrehierro constante).
- Máquina simétrica (bobinas del estátor iguales entre sí y bobinas del rotor iguales entre sí).
- Comportamiento magnético del entrehierro lineal (no se consideran los efectos de saturación e histéresis típico de los materiales ferromagnéticos).
- Permeabilidad magnética del entrehierro elevada (reluctancia magnética despreciable frente a la del aire).
- Distribución sinusoidal del campo magnético en el entrehierro.

Se ha aplicado el Teorema de Thévenin sobre el circuito equivalente de la Figura 1 en los nodos A y B; que se muestran en la Figura 13.

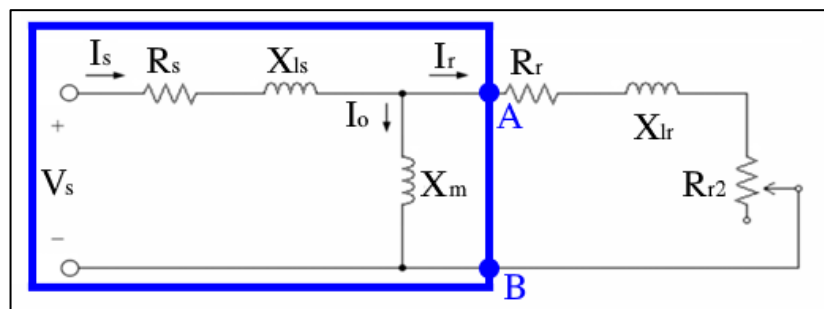


Figura 13: Circuito equivalente del MIT con los nodos A y B [4]

A partir del circuito equivalente de la Figura 13, se han obtenido las expresiones (14) y (15). Estas expresiones cuantifican los equivalentes en tensión ( $V_{Th}$ ) e impedancia ( $Z_{Th}$ ) del circuito.

$$\bar{V}_{Th} = \frac{V_s \cdot jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} \quad (14)$$

$$\bar{Z}_{Th} = \frac{(R_s + jX_{ls}) \cdot jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} \quad (15)$$

Estas expresiones se emplean sobre la técnica de [1]. Esta técnica ha sido la utilizada para estimar las diferentes curvas características del apartado 1.7.1 Técnicas de estimación de parámetros en el MIT. Cada curva característica tiene unos parámetros asociados, y estas constituyen diferentes configuraciones del MIT.

Tal y como se explica anteriormente, para obtener las diferentes configuraciones del MIT se han mantenido fijos 3 de los 5 parámetros ( $R_r$ ,  $X_m$  y  $X_{lr}$ ), y los otros 2 ( $R_s$  y  $X_{ls}$ ) son modificados mediante los coeficientes que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Coeficientes de la técnica [1] para modificar los parámetros del catálogo

Técnica	$k_R$	$k_X$
Catálogo: Curva A	1,5	0,0
Catálogo: Curva B	1,5	0,5
Catálogo: Curva C	1,5	1,0
Catálogo: Curva D	0,5	0,5

A partir de cada par de coeficientes, se han obtenido cuatro circuitos equivalentes diferentes con parámetros específicos. Además, se han utilizado los datos del Catálogo del MIT del apartado 1.6.1 Motor de inducción ensayado para calcular el resto de los parámetros.

Tabla 15: Valores de las magnitudes fijas de la técnica mediante catálogo

Técnica	$\omega_s$ [rad/s]	$s_N$ [pu]	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$X_{lr}$ [ $\Omega$ ]
Catálogo: Curvas A, B, C, D	157,08	0,00467	0,020	9,520	0,476

Tabla 16: Valores de las magnitudes variables de la técnica mediante catálogo

Técnica	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$X_{ls}$ [ $\Omega$ ]	$\bar{V}_{Th}$ [V]	$\bar{Z}_{Th}$ [ $\Omega$ ]
Catálogo: Curva A	0,030	0,000	3464+11j	0,030+0,00009j
Catálogo: Curva B	0,030	0,238	3379+10j	0,028+0,23228j
Catálogo: Curva C	0,030	0,476	3299+10j	0,027+0,45340j
Catálogo: Curva D	0,010	0,238	3379+3j	0,009+0,23220j

Finalmente, a partir de los valores de las Tablas anteriores, se han calculado gráficamente las cuatro curvas características diferentes mediante la fórmula (16). Esta fórmula, una vez se sustituidas las variables fijas y variables, define el par en función de la velocidad:  $T(n)$ .

$$T = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th}|}{\sqrt{\left(R_{Th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{Th} + X_{lr})^2}} \right)^2 \quad (16)$$

### 1.8.1.2 Mediante ensayos experimentales

Tras realizar ensayos en vacío y en cortocircuito, el fabricante ha facilitado los parámetros reducidos en  $[pu]$  en función de  $Z_N$ .

Los resultados en  $[pu]$  se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Resultados de los ensayos experimentales reducidos

Ensayos experimentales	
$Z_N$ [ $\Omega$ ]	3,900
$R_{s,d}/Z_N$ [ $pu$ ]	0,005
$X_{ls,d}/Z_N$ [ $pu$ ]	0,153
$X_{m,d}/Z_N$ [ $pu$ ]	8,599
$R_{r,d}/Z_N$ [ $pu$ ]	0,017
$X_{lr,d}/Z_N$ [ $pu$ ]	0,043

Los valores reales y la velocidad de sincronismo se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Resultados de los ensayos experimentales sin reducir junto con la velocidad

Ensayos experimentales	
$R_{s,d}$ [ $\Omega$ ]	0,019
$X_{ls,d}$ [ $\Omega$ ]	0,587
$X_{m,d}$ [ $\Omega$ ]	33,098
$R_{r,d}$ [ $\Omega$ ]	0,067
$X_{lr,d}$ [ $\Omega$ ]	0,165
$\omega_s$ [ $rad/s$ ]	157,08

De nuevo, se ha aplicado el Teorema de Thévenin sobre la Figura 1. A diferencia de la técnica anterior, esta vez no se han obtenido diferentes casuísticas, si no que los valores de la Tabla 18 se han mantenido constantes.

Se muestran los resultados en la Tabla 19.

Tabla 19: Resultados del Teorema de Thévenin mediante ensayos experimentales

Técnica	$\bar{V}_{Th}$ [V]	$\bar{Z}_{Th}$ [ $\Omega$ ]
Ensayos experimentales	3404+1,87j	0,018+0,58j

Estos resultados se pueden aplicar sobre la expresión (16) para obtener la curva característica de los ensayos experimentales.

### 1.8.1.3 Comparación de las técnicas

En el apartado 1.7 Análisis de soluciones se ha mostrado que la curva C, de la técnica que estima los parámetros mediante el catálogo, es la escogida por determinar menos error. En este apartado se justifica con más detalle los resultados mostrados en 1.7 Análisis de soluciones.

Los valores del par de arranque, del par máximo, del par nominal han sido facilitados por el fabricante. Se muestran en la Tabla 20. La velocidad en el punto de funcionamiento nominal ( $n_N$ ) es de  $1493 \text{ min}^{-1}$ .

Tabla 20: Puntos de funcionamiento de los ensayos experimentales

Ensayos experimentales	
Par nominal ( $T_N$ )	53 kNm
Par de arranque ( $T_o$ )	27 kNm
Par máximo ( $T_M$ )	113 kNm
Par de sincronismo ( $T_S$ )	0 kNm

Se han obtenido los valores que corresponden a la Tabla 20 de las curvas resultantes de la técnica [1] y de los ensayos experimentales. Se muestran los resultados en la Tabla 21.

Tabla 21: Resultados de los puntos de funcionamiento de las técnicas

Técnica	$T'_o$ [kNm]	$T'_M$ [kNm]	$T'_N$ [kNm]
Ensayos experimentales	26,6	145,3	15,2
Catálogo: Curva A	20,2	225,5	51,5
Catálogo: Curva B	8,8	147,7	48,4
Catálogo: Curva C	4,9	108,2	45,3
Catálogo: Curva D	8,8	151,8	48,8

Para seleccionar la curva característica que presentara mejores resultados, se han comparado los valores de la Tabla 21 con los valores proporcionados por el fabricante de la Tabla 20. Esta comparación se ha realizado a partir de los factores mostrados en la Tabla 22 y las expresiones (1)-(4).

Tabla 22: Factores de los errores parciales

$k_o$	$k_M$	$k_N$
0,2	0,3	0,5

Se han obtenido los resultados de las Tablas 23, 24 y 25.

Tabla 23: Resultados parciales del error del par de arranque

<b>Par de arranque</b>				
<b>Técnica</b>	$k_o$	$T'_o$ [kNm]	$T_o$ [kNm]	$e_o$ [%]
Ensayos experimentales	0,2	26,6	27	0,3
Catálogo: Curva A	0,2	20,2	27	5,1
Catálogo: Curva B	0,2	8,8	27	13,5
Catálogo: Curva C	0,2	4,9	27	16,4
Catálogo: Curva D	0,2	8,8	27	13,5

Tabla 24: Resultados parciales del error del par máximo

<b>Par máximo</b>				
<b>Técnica</b>	$k_M$	$T'_M$ [kNm]	$T_M$ [kNm]	$e_M$ [%]
Ensayos experimentales	0,3	145,3	113	8,5
Catálogo: Curva A	0,3	225,5	113	29,8
Catálogo: Curva B	0,3	147,7	113	9,2
Catálogo: Curva C	0,3	108,2	113	1,3
Catálogo: Curva D	0,3	151,8	113	10,2

Tabla 25: Resultados parciales del error del par nominal

<b>Par nominal</b>				
<b>Técnica</b>	$k_N$	$T'_N$ [kNm]	$T_N$ [kNm]	$e_N$ [%]
Ensayos experimentales	0,5	15,2	53	35,7
Catálogo: Curva A	0,5	51,5	53	1,5
Catálogo: Curva B	0,5	48,4	53	4,5
Catálogo: Curva C	0,5	45,3	53	7,4
Catálogo: Curva D	0,5	48,8	53	4,1

Finalmente, el resultado de la suma de los errores parciales se muestra de la Tabla 26.

Tabla 26: Resultados de los errores totales

<b>Técnica</b>	$e_T$ [%]
Ensayos experimentales	45
Catálogo: Curva A	36
Catálogo: Curva B	27
<b>Catálogo: Curva C</b>	<b>25</b>
Catálogo: Curva D	28

Este error, como ya se ha comentado, mide el error relativo de par para la velocidad nominal facilitada por el fabricante.

Las curvas mecánicas obtenidas mediante la técnica de [1] presentan un comportamiento muy adecuado en el punto nominal de funcionamiento. No obstante, en el arranque del MIT ninguna supera el par mecánico inicial facilitado por el fabricante.

Si se escogen los parámetros de la curva C, la característica mecánica correspondiente presenta un par mecánico muy bajo hasta velocidades elevadas. Este hecho determina que no se puedan aplicar pares resistentes de tipo constante, o parabólico, utilizando el elemento *Mechanical Load (general)* puesto que aparecen 3 puntos de corte entre las características mecánicas del motor y la carga.

Para solventar este problema, el elemento utilizado para simular el par resistente ha sido *Mechanical Load (externally controlled)*, donde se ha escogido una fuente de tensión *Piecewise Linear* para conseguir un único punto de corte entre ambas características mecánicas.

Evidentemente, esta decisión implica que la simulación del arranque presente muy poca semejanza con la real, pero en este trabajo se analiza el comportamiento del motor una vez trabaja en el punto de régimen permanente, que sí es prácticamente el mismo.

Se muestra en la Figura 14 la configuración de la fuente de tensión *Piecewise Linear* utilizada, donde se observan los cuatro puntos de funcionamiento.

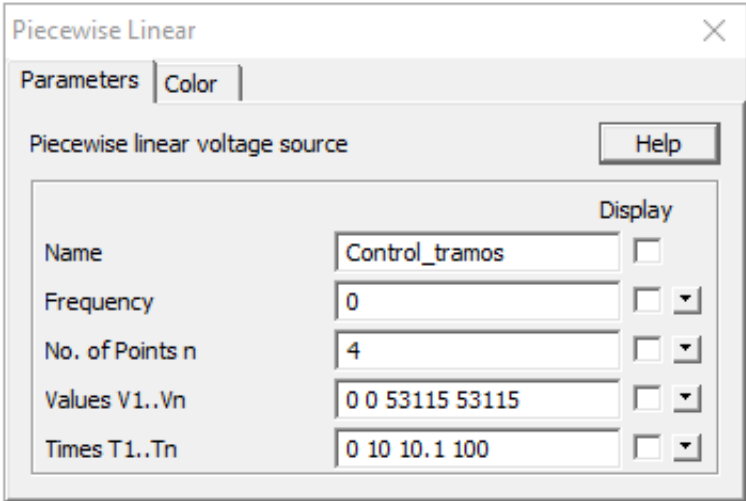


Figura 14: Configuración de la fuente de tensión *Piecewise Linear* en PSIM

Se muestra la curva de la carga mecánica en la Figura 15 junto la curva mecánica escogida finalmente (la curva C). Se observa el escalón que provoca la fuente mencionada anteriormente.

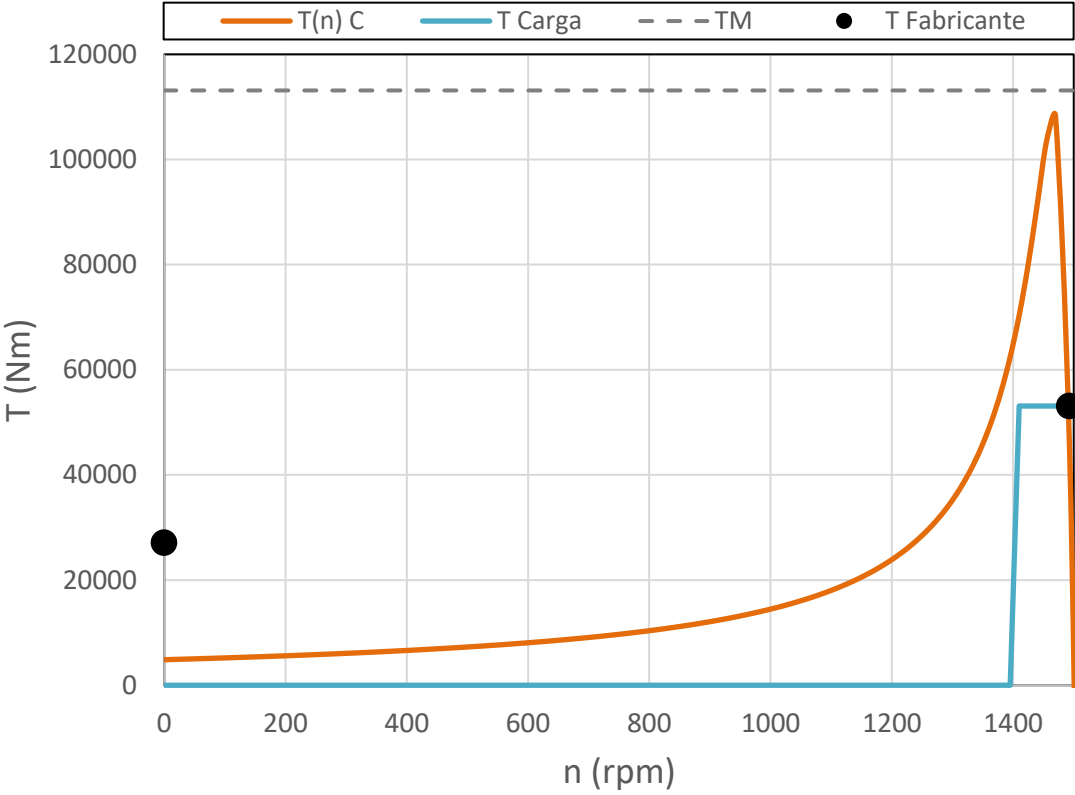


Figura 15: Comparación de la curva característica C con la carga mecánica

**1.8.2 Tipificación de los desequilibrios observados**

Un sistema trifásico equilibrado implica que las tres fases de tensión que forman el sistema son idénticas en magnitud y se encuentran desfasadas 120° entre las mismas. En situaciones con desequilibrio en estas tensiones, se producen efectos perjudiciales en los MIT como: sobrecalentamiento, vibración en el eje mecánico, ruido y reducción de potencia. Estos efectos, además, reducen la vida útil y rendimiento del MIT [8].

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de un motor de alta potencia (8300 kW) y, tras analizar los datos obtenidos con el analizador de redes, se ha detectado un desequilibrio de tensión tipo T3 [5].

Se muestra en la Figura 16 el desequilibrio máximo permitido (2,0 %). Se observa que es de tipo *under-voltage* y afecta a las tres líneas (3Φ – UV [5]). En otras palabras, el valor eficaz de las tres líneas está por debajo del valor eficaz de tensión de línea, 6 kV.

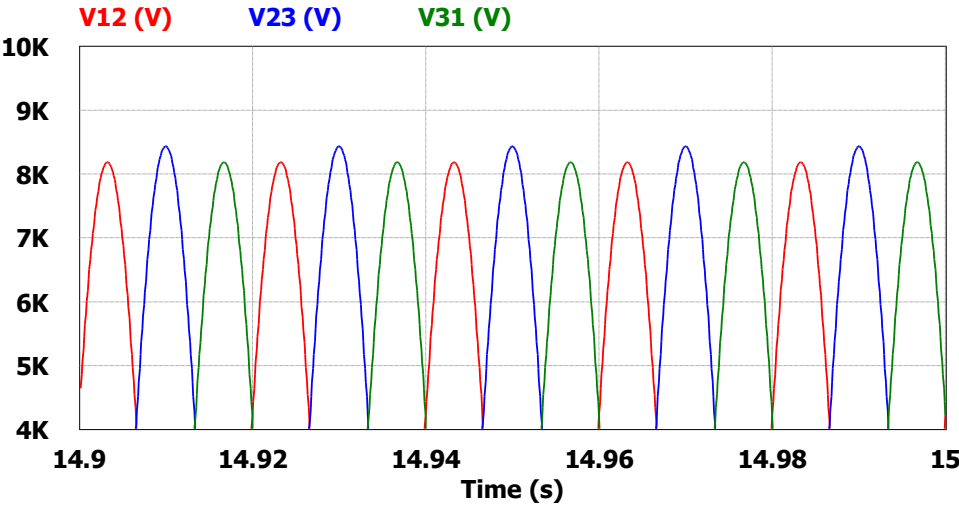


Figura 16: Ondas de tensión de línea del máximo desequilibrio permitido (2,0 %)

Comparándolo con la definición de la Figura 17 de [5], se comprueba en la expresión (17) que las líneas  $V_{12}$  y  $V_{31}$  son las que se encuentran más desplazadas respecto al valor máximo de 8,49 kV.

$$V_M = \sqrt{2} \cdot 6 \text{ kV} = 8,49 \text{ kV} \tag{17}$$

Este efecto se produce porque las dos líneas dependen de la Fase 1 del MIT, y ésta es la que se ha modificado en cada para estudiar el efecto de desequilibrios de tensión en cada nivel.

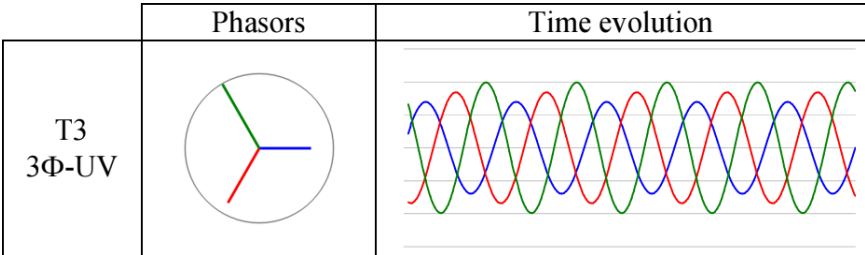


Figura 17: Tipificación del desequilibrio detectado [5]

### 1.8.3 Puntos de desequilibrios aplicados al MIT

#### 1.8.3.1 Esquema del circuito simulado

PSIM es la herramienta que ha permitido obtener los resultados correspondientes de los efectos que se producen con el desequilibrio de tensión sobre las corrientes, par y velocidad del MIT. Este programa es un simulador de circuitos eléctricos y electrónicos, especialmente eficaz en el diseño y análisis de motores.

El MIT estudiado, tras haber sido parametrizado en los apartados anteriores, se ha representado en el programa. En la Figura 18 se puede observar sus diversos módulos y elementos utilizados.

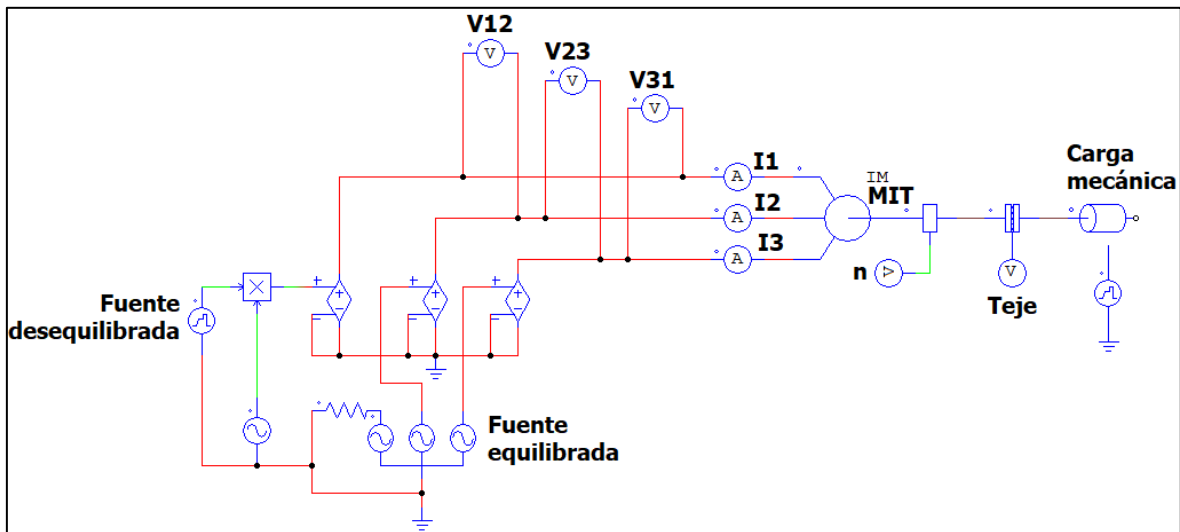


Figura 18: Circuito del MIT simulado en PSIM

Se ha dividido el contenido de este circuito para ser analizado en las siguientes partes:

- Fuentes de tensión: se muestran las diferentes fuentes de tensión, sus características y su uso en el MIT.
- MIT: se muestra el motor de inducción trifásico utilizado.
- Carga mecánica: se muestra la carga mecánica controlada de manera externa.
- Aparatos de medida: se muestran los elementos de medida que han permitido extraer las magnitudes necesarias para el estudio del MIT.
- Control de la simulación: se muestra la configuración del *Simulation Control*, que permite modificar el período de estudio de las ondas captadas por los aparatos de medida.
- Visualización de los resultados: se muestran las funciones internas de PSIM que permiten controlar las simulaciones de las ondas captadas por los aparatos de medida.

### 1.8.3.1.1 Fuente de tensión

Se desea simular una fuente trifásica de tensión, que presente un desequilibrio en el módulo del valor eficaz de una de las fases. Para ello, se ha realizado el esquema de PSIM que se muestra en la Figura 19.

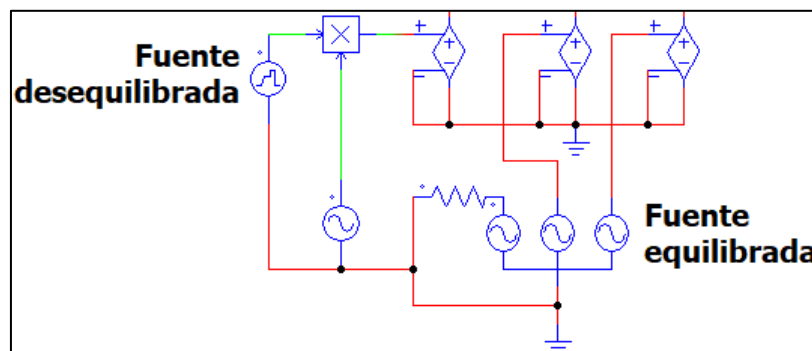


Figura 19: Fuente de tensión del MIT en PSIM

Como se observa en la Figura 19, una de las fases presenta cambios temporales en su valor eficaz, utilizando para ello una fuente de tensión lineal a tramos (*Piecewise Linear*). Esta fuente funciona a dos niveles de tensión (equilibrada y desequilibrada). Pasados los 12 s, cuando el MIT se ha estabilizado, la fuente desequilibrada permuta, sustituyendo a la equilibrada de 6 kV, a cada nivel de tensión desequilibrada descritos anteriormente.

Para evitar que ocurra alguna afectación entre la rama de las fuentes equilibradas y el conjunto de la rama de la izquierda, se ha conectado una resistencia de una gran impedancia para aislarlas.

En la Tabla 27 se muestran los valores de las tensiones de cada punto de estudio de la fuente desequilibrada (*Piecewise Linear*).

Tabla 27: Valores de la fuente de tensión desequilibrada

Fuente de tensión desequilibrada	
Número de puntos de funcionamiento	4
Tensiones de los puntos de funcionamiento [pu]	0,994 - 0,994 - $V_{1 pu}$ - $V_{1 pu}$
Intervalos del tiempo de funcionamiento [s]	0 - 12 - 12,01 - 100
Frecuencia [Hz]	0

En la Tabla 28 se muestra la configuración de los valores de línea para cada nivel de tensión. La tensión  $V_{1 pu}$  se ha introducido en la fuente *Piecewise Linear*.

Tabla 28: Valores de cada nivel de tensión de desequilibrio

Caso	VUF [%]	$V_{1 pu}$ [pu]	$V_{2 pu}$ [pu]	$V_{3 pu}$ [pu]
1	0,3	0,985	0,994	0,994
2	0,6	0,975	0,994	0,994
3	1,0	0,964	0,994	0,994
4	2,0	0,935	0,994	0,994
5	3,0	0,908	0,994	0,994

1.8.3.1.2 MIT

El motor utilizado en PSIM, de tipo jaula de ardilla simple, se muestra en la Figura 20.

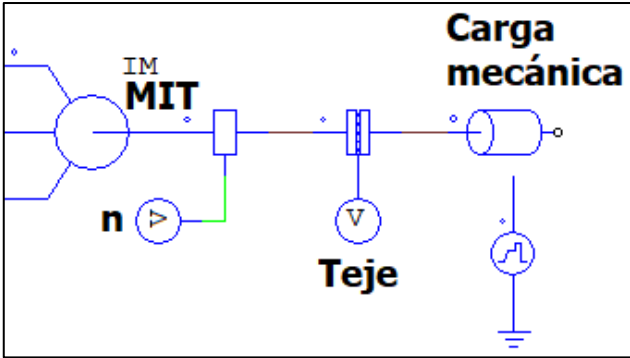


Figura 20: Conjunto de motor, carga y sensores de velocidad y par del MIT en PSIM

Los parámetros del MIT se muestran en la Figura 21. Estos valores corresponden al conjunto de parámetros de la curva C estimada con [1], mostrados en la Tabla 2.

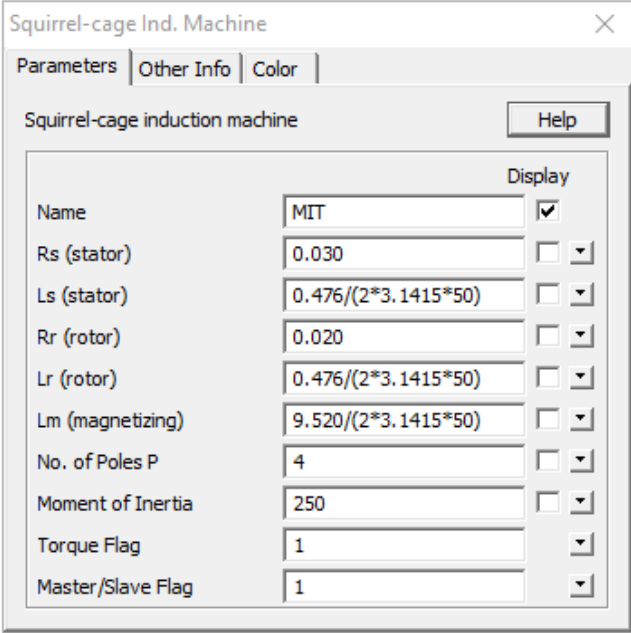


Figura 21: Parámetros del MIT en PSIM

### 1.8.3.1.3 Carga mecánica

La carga mecánica externa se muestra en la Figura 20. Está controlada de manera externa con una combinación de los elementos *Mechanical Load (ext. controlled)* y *Piecewise Linear*. Con estos dos elementos se ha introducido la carga mecánica mencionada en los apartados anteriores.

La fuente de tensión *Piecewise Linear* (lineal a trozos), permite acoplar la carga mecánica, proporcionada por el fabricante, una vez el motor estabiliza su arranque. La relación entre la tensión de la fuente y el par de la carga es 1 a 1. De esta manera, las características mecánicas del MIT y carga mecánica presentan un único punto de corte.

Se muestran los parámetros de los elementos mencionados en las Tablas 29 y 30.

Tabla 29: Parámetros de la carga mecánica controlada externamente

Carga mecánica controlada externamente	
Speed Flag (sentido de giro)	Contrario al del MIT
Inercia (J) [kg · m <sup>2</sup> ]	250

Tabla 30: Parámetros del control de la carga mecánica externa

Control de la carga mecánica externa (lineal a trozos)	
Número de puntos de funcionamiento	4
Tensiones de los puntos de funcionamiento [Nm]	0 – 0 – 53115 – 53115
Intervalos del tiempo de funcionamiento [s]	0 – 10 – 10,01 – 100
Frecuencia [Hz]	0

### 1.8.3.1.4 Aparatos de medida

Los sensores de velocidad ( $n$ ) y de par ( $T_{eje}$ ) de la Figura 20 han permitido cuantificar el rizado en el par del MIT con sus mediciones.

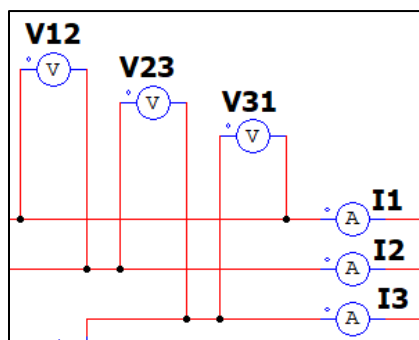


Figura 22: Conjunto de voltímetros y amperímetros

Se han dispuesto 3 voltímetros ( $V_{12}$ ,  $V_{23}$  y  $V_{31}$ ) que permiten medir tensiones de línea que alimentan al MIT. También se han conectado 3 amperímetros ( $I_1$ ,  $I_2$  y  $I_3$ ) que miden las corrientes de línea que circulan hacia el MIT, tal como se observa en la Figura 22.

Se ha fijado una ganancia de 1 en los sensores de velocidad y par de la Figura 20. El resto de aparatos de medida no contienen parámetros modificables.

### 1.8.3.1.5 Control de la simulación

En este trabajo se ha utilizado la versión 9.3 Demo, limitada a 6000 puntos de visualización en *Simview*. Por ese motivo se ha configurado la herramienta *Simulation Control* a las necesidades de cada ensayo.

La frecuencia de las señales que se han medido con *Simview* han sido de 50 Hz en el caso de la tensión y la corriente; y de 100 Hz en el rizado del par del eje y la velocidad del MIT. Se puede concluir, por tanto, que las señales medidas son lentas debido a su magnitud en Hz; y que es necesario configurar la simulación de PSIM con una cantidad de puntos mínima para presentar unos resultados precisos.

La configuración que se observa en la Figura 23 se ha calculado a partir del siguiente análisis:

- El sistema trabaja a una frecuencia ( $f$ ) de 50 Hz. Se ha aplicado la expresión (18) para obtener un período ( $T_p$ ) de 20 ms y un semiperiodo ( $T_p/2$ ) de 10 ms.
- El intervalo que se ha estudiado está situado entre los 14,9 y los 15 s (100 ms), lo que implica 5 períodos para la tensión y la corriente, y 10 períodos para el par y la velocidad.
- Se fija un *Time Step* de 0,1 ms, lo que significa que PSIM resolverá las ecuaciones diferenciales y proporcionará sus resultados cada 0,1 ms.
- Por tanto, se ha aplicado la expresión (19) en 1 semiperiodo, y se ha obtenido 100 puntos de estudio por semiperiodo de 10 ms.
- Finalmente, se ha aplicado la expresión (20) en el intervalo de estudio (100 ms), y se ha obtenido 1000 puntos de estudio.

Se muestra la configuración de la simulación (*Simulation Control*) en la Figura 23.

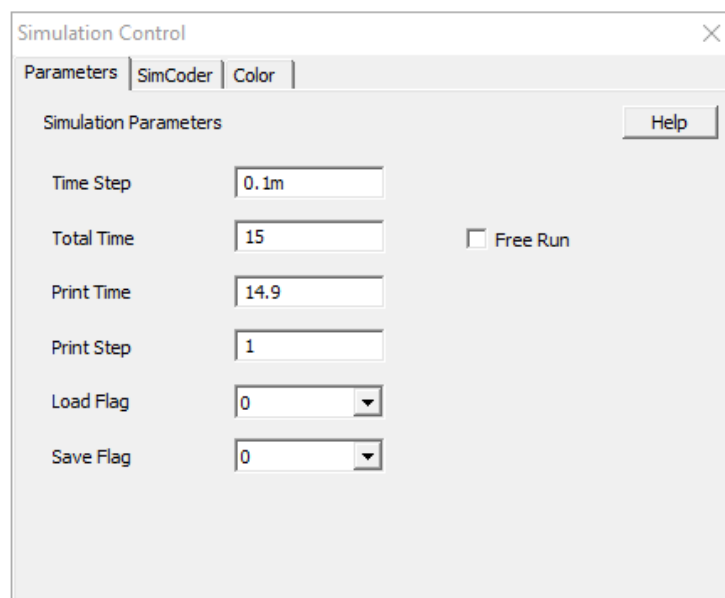


Figura 23: Parámetros de la configuración de la simulación

$$T_p = f^{-1} = 50^{-1} = 20 \text{ ms} \quad (18)$$

$$\text{semiperiodo} = \frac{(T_p/2)}{\text{Time Step}} = \frac{10}{0,1} = 100 \text{ puntos} \quad (19)$$

$$\text{intervalo} = \frac{\text{Intervalo}}{\text{Time Step}} = \frac{100}{0,1} = 1000 \text{ puntos} \quad (20)$$

Tras introducir los datos de la Figura 23 en PSIM, se ha adquirido en *Simview* un número completo de semiperiodos (5 en total) para las ondas de tensión y corriente; y 10 semiperiodos para las ondas de velocidad y par en el eje del MIT.

Debido a que la cantidad de puntos necesarios para una señal lenta como esta; suele ser menor en comparación con las que se pueden estudiar habitualmente en PSIM en kHz, se ha concluido que las gráficas que se muestran en las simulaciones (con 1000 puntos) son suficientemente precisas.

En el caso de los resultados gráficos de la velocidad y del par en el eje del MIT en el régimen permanente, con los 1000 puntos de visualización se observan 10 semiperiodos.

La configuración del *Simulation Control* de la Figura 23 es, por tanto, la que se fijará para obtener los resultados de los efectos de los desequilibrios estudiados en el MIT.

### 1.8.3.1.6 Visualización de los resultados

Los resultados numéricos del MIT se han obtenido mediante el programa llamado *Simview*, disponible dentro del propio PSIM. Éste ha permitido procesar gráficamente las ondas captadas por los diferentes aparatos de medida para, posteriormente, extraer sus datos.

El programa *Simview*, dentro de PSIM, permite controlar y extraer con precisión los datos necesarios para analizarlos posteriormente. En la Figura 24 se muestran los elementos utilizados (en orden, de izquierda a derecha):

- Apertura, impresión, copia y deshacer la última acción de las ondas simuladas. Este apartado, además, permite fusionar diferentes gráficas para compararlas de manera sencilla en una misma pantalla.
- Recarga de los datos simulados del mismo archivo, graficar de nuevo la onda y salir del modo edición en el que se analice la onda.
- Modificación de los ejes abscisas y ordenadas.
- Selección de las ondas mostradas, junto con la opción de proyectar más ondas en diferentes pantallas.
- Control para ampliar, alejar o desplazar la vista de la onda simulada.
- Muestra de los valores de la onda seleccionada en un instante determinado.

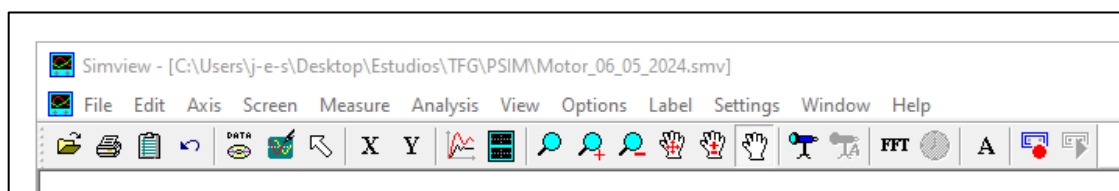


Figura 24: Elementos para el control de datos en Simview (PSIM)

Por otra parte, en la Figura 25 se muestran la barra de herramientas para el control de los resultados de *Simview*. Se han utilizado para estudiar los efectos de los desequilibrios en el régimen permanente del MIT, extrayendo sus datos numéricos:

- La “caja” permite seleccionar la magnitud que se está analizando en ese instante en la pantalla seleccionada.
- Muestra de los ejes abscisas y ordenadas o únicamente el eje de abscisas.
- Búsqueda del máximo absoluto de la onda seleccionada.
- Búsqueda del siguiente máximo relativo (desde una posición específica) de la onda seleccionada.
- Búsqueda del mínimo absoluto de la onda seleccionada.
- Búsqueda del siguiente mínimo relativo (desde una posición específica) de la onda seleccionada.
- Cálculo y muestra del valor medio (promediado) de la onda seleccionada.
- Cálculo y muestra del valor eficaz de la onda seleccionada.
- Desplazamiento, izquierda y derecha, de la muestra de los valores de la onda seleccionada de un instante determinado.

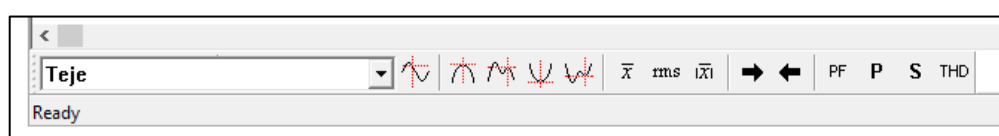


Figura 25: Elementos de la barra de herramientas de Simview (PSIM)

### 1.8.3.2 Comportamiento del MIT

Para estudiar el funcionamiento del MIT desde su arranque hasta alcanzar el punto de funcionamiento nominal, se ha analizado su velocidad ( $n$ ) dividiendo su comportamiento en las siguientes partes:

- Arranque del MIT (a los 0 s), que se realiza en vacío.
- Conexión de la carga mecánica externa (a los 10 s).
- Conexión de la fuente desequilibrada (a los 12 s).
- Régimen permanente del MIT (en el período  $t \in [14,9 ; 15]$  s).

En el apartado [3.3 Comportamiento del MIT en PSIM](#) se muestran esta división, en función del tiempo, del comportamiento del MIT.

A continuación, se muestra la curva de la velocidad del MIT en la Figura 26, donde se describe, visualmente, el comportamiento del MIT.

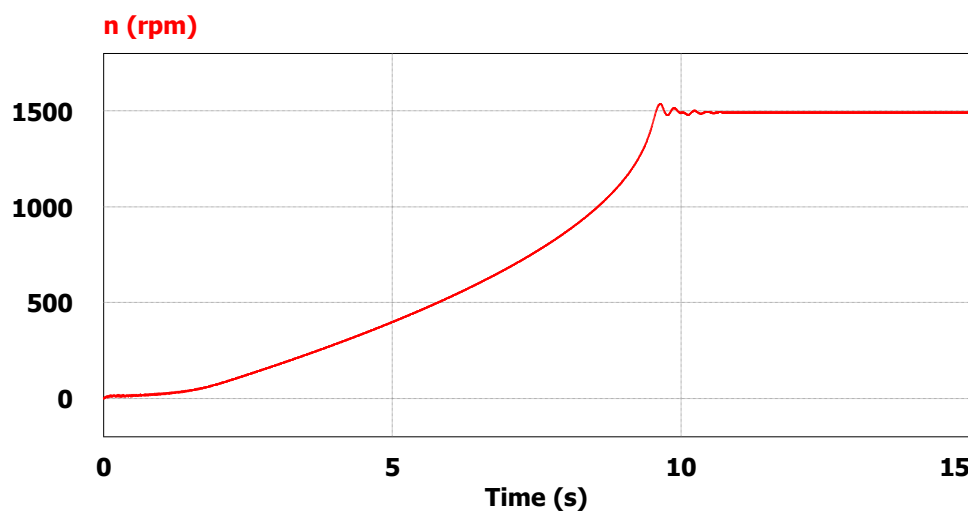


Figura 26: Curva de velocidad del MIT

Inicialmente, cuando el MIT está alimentado por una fuente equilibrada, el motor arranca en vacío y transcurridos 10 s, se conecta la carga mecánica externa y el MIT necesita un tiempo hasta estabilizar su velocidad al valor nominal.

Después, a los 12 s, se permuta la fuente de tensión equilibrada del MIT a la desequilibrada. En ese instante, el MIT sufre de nuevo un transitorio, variando su velocidad entre un pequeño rango.

La variación de velocidad mostrada en la Figura 26, al conectar la tensión desequilibrada, determina vibraciones en el eje mecánico, que pueden perjudicar el funcionamiento del MIT.

La escala para analizar los resultados es, básicamente, el periodo de régimen permanente mencionado en el apartado [1.8.3.1.5 Control de la simulación](#). Se han comparado los casos de la velocidad del máximo VUF detectado (0,3 %) y el del valor por encima del límite (3,0 %).

En la Figura 27 se observa que la variación pico a pico de la velocidad es muy inferior su valor medio.

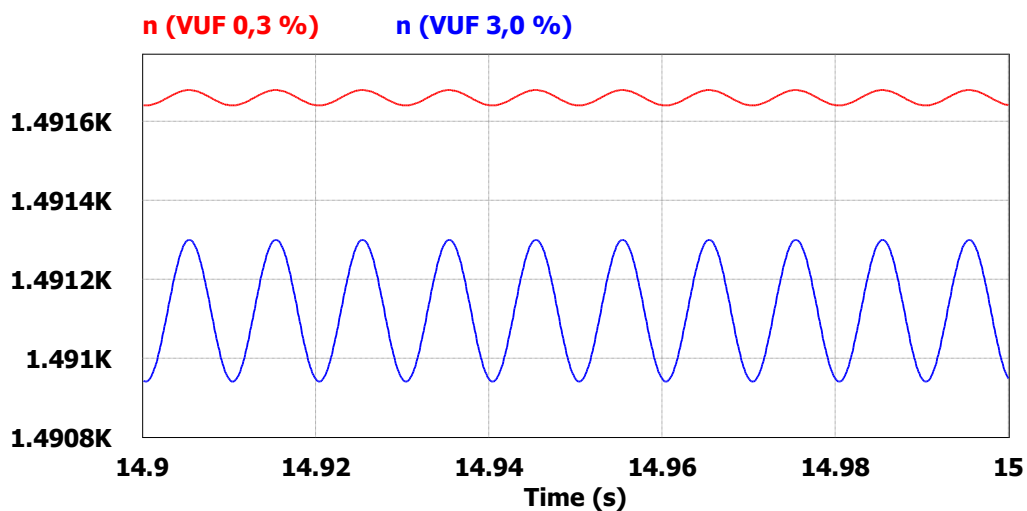


Figura 27: Velocidad del MIT en régimen permanente

Se ha calculado cuantitativamente el rizado que se puede observar en la Figura 27 para establecer unas conclusiones más exactas.

Se muestran los resultados en la Tabla 31.

Tabla 31: Resultados del análisis de la velocidad en régimen permanente

Caso	VUF [%]	$n_{avg}$ [ $min^{-1}$ ]	$n_{m\acute{a}x}$ [ $min^{-1}$ ]	$n_{m\acute{i}n}$ [ $min^{-1}$ ]	$n_{pp}$ [ $min^{-1}$ ]	$n_r$ [%]
1	0,3	1491,66	1491,68	1491,64	0,04	0,003
5	3,0	1491,12	1491,30	1490,94	0,36	0,024

Tal y como se puede observar, tanto el rizado en la velocidad del VUF máximo detectado (0,3 %), como el que supera el valor límite (3,0 %), son despreciables.

### 1.8.3.3 Cuantificación de los desequilibrios (VUF)

La cuantificación del desequilibrio en tensión, tal y como se ha explicado anteriormente, se realiza con el VUF aplicando la norma UNE-EN 50160:2011/A2:2020.

Primero, se ha procedido a detectar el máximo desequilibrio de tensión de línea de los datos obtenidos por el analizador de redes de la planta donde está situado el MIT. Para ello, se han aplicado las expresiones (5)-(8) y se ha cuantificado un VUF del 0,3 %.

En el apartado 1.7 Análisis de soluciones, se ha concluido que el máximo desequilibrio de tensión detectado está por debajo del límite (2,0 %). A continuación, en el mismo apartado, se ha aplicado un criterio descrito en éste, y se han obtenido niveles de VUF superiores, para mostrar qué efectos provocarían en el MIT.

Se muestra la configuración de los valores de las líneas del MIT en la Tabla 32.

Tabla 32: Configuración de cada nivel de tensión desequilibrada

Caso	VUF [%]	$V_{AB} (L_1L_2)$ [kV]	$V_{BC} (L_2L_3)$ [kV]	$V_{CA} (L_3L_1)$ [kV]
1	0,3	108,4	109,3	109,3
2	0,6	107,3	109,3	109,3
3	1,0	106,0	109,3	109,3
4	2,0	102,8	109,3	109,3
5	3,0	99,9	109,3	109,3

Los resultados de las expresiones (5)-(8) sobre las configuraciones de la Tabla 32 se muestran en las Tablas 33 y 34.

Tabla 33: Resultados de los niveles de tensión

Caso	$\bar{V}_{AB}$ [kV]	$\bar{V}_{BC}$ [kV]	$\bar{V}_{CA}$ [kV]
1	108,4	-54,2-93,9j	-54,6+94,5j
2	107,3	-54,6-94,7j	-54,7+94,7j
3	106,0	-54,6-94,7j	-54,7+94,7j
4	102,8	-54,6-94,7j	-54,7+94,7j
5	99,9	-54,6-94,7j	-54,7+94,7j

Tabla 34: Resultados complejos de los niveles de tensión

Caso	$\bar{V}_1$ [kV]	$\bar{V}_2$ [kV]
1	109,0-(3,1 · 10 <sup>-14</sup> )j	-0,3+(3,3 · 10 <sup>-14</sup> )j
2	108,6-(3,1 · 10 <sup>-14</sup> )j	-0,7+(3,3 · 10 <sup>-14</sup> )j
3	108,2-(3,1 · 10 <sup>-14</sup> )j	-1,1+(3,3 · 10 <sup>-14</sup> )j
4	107,1-(3,1 · 10 <sup>-14</sup> )j	-2,2+(3,3 · 10 <sup>-14</sup> )j
5	106,2-(3,1 · 10 <sup>-14</sup> )j	-3,1+(3,3 · 10 <sup>-14</sup> )j

### 1.8.3.4 Efecto en la corriente (CUF)

Para estudiar el efecto sobre las corrientes del MIT, primero es necesario aplicar cada nivel de tensiones desequilibradas sobre el conjunto de fuentes de tensión del MIT. A continuación, se ha configurado la herramienta *Simulation Control* para fijar el intervalo de régimen permanente en el punto de funcionamiento nominal del MIT descrito anteriormente.

A partir de los conjuntos de tensiones de la Tabla 32, se ha utilizado *Simview* para obtener los valores de las corrientes eficaces de cada línea. Tal y como se ha comentado en el apartado de 1.7 Análisis de soluciones, se ha considerado un desfase de  $120^\circ$  entre las corrientes. Los datos se han extraído en 5 semiperiodos completos.

Una vez obtenidos los resultados mostrados en la Tabla 35, se han aplicado las expresiones (9)-(11) y se han calculado los diferentes CUF.

Tabla 35: Resultados de los CUF en función de cada nivel de desequilibrio VUF

Caso	VUF [%]	$I_A$ [A]	$I_B$ [A]	$I_C$ [A]
1	0,3	980,4	998,2	981,9
2	0,6	976,3	1013,6	980,1
3	1,0	971,8	1030,5	978,3
4	2,0	961,1	1075,5	974,6
5	3,0	952,3	1117,7	972,4

Se muestran los resultados de las expresiones en la Tabla 36 y 37.

Tabla 36: Resultados de las corrientes en función de los niveles de tensión

Caso	VUF [%]	$\bar{I}_A$ [A]	$\bar{I}_B$ [A]	$\bar{I}_C$ [A]
1	0,3	980,4	-499,1-864,5j	-490,9+850,3j
2	0,6	976,3	-506,8-877,8j	-490,0+848,8j
3	1,0	971,8	-515,3-892,5j	-489,2+847,2j
4	2,0	961,1	-537,8-931,4j	-487,3+844,0j
5	3,0	952,3	-558,9-967,9j	-486,2+842,0j

Tabla 37: Resultados complejos de las corrientes

Caso	VUF [%]	$\bar{I}_1$ [A]	$\bar{I}_2$ [A]	CUF [%]
1	0,3	$986,8-(1,7 \cdot 10^{-13})j$	$-3,2+4,7j$	0,6
2	0,6	$989,9-(1,7 \cdot 10^{-13})j$	$-6,7+9,7j$	1,2
3	1,0	$993,6-(1,7 \cdot 10^{-13})j$	$-10,9+15,1j$	1,9
4	2,0	$1003,7-(5,7 \cdot 10^{-14})j$	$-21,3+29,1j$	3,6
5	3,0	$1014,1-(3,0 \cdot 10^{-13})j$	$-30,9+41,9j$	5,1

### 1.8.3.5 Efecto en el par (TRF)

De manera paralela al efecto anterior estudiado, el rizado en el par se calcula una vez se han aplicado los diferentes niveles de tensión en la alimentación del MIT y el mismo intervalo de régimen permanente en *Simulation Control*.

En este caso, el rizado en el par (TRF), se calcula midiendo directamente el par que realiza el eje del MIT. Una vez aplicadas las diferentes tensiones desequilibradas en la alimentación del MIT, el efecto inmediato que se detecta es un rizado permanente en el eje del motor.

El cálculo del TRF requiere de los pares de pico-pico y del valor medio de la onda completa en un número de semiperiodos completo (10 en este caso). Una vez extraídos los resultados de *Simview*, se han utilizado las expresiones (12) y (13).

Se muestran los resultados en la Tabla 38.

Tabla 38: Resultados de los TRF en función de cada nivel de desequilibrio VUF

Caso	VUF [%]	$T_{avg}$ [kNm]	$T_{m\acute{a}x}$ [kNm]	$T_{m\acute{i}n}$ [kNm]	$T_{pp}$ [kNm]	TRF [%]
1	0,3	53,1	53,4	52,8	0,6	1,20
2	0,6	53,1	53,8	52,4	1,3	2,52
3	1,0	53,1	54,2	52,1	2,1	3,97
4	2,0	53,1	55,2	51,1	4,1	7,71
5	3,0	53,1	56,1	50,2	5,9	11,11

### **1.8.4 Conclusiones**

Se han clasificado por temáticas:

#### Técnicas de estimación de parámetros del MIT:

1. En este trabajo se ha podido comprobar que existen diferentes técnicas para estimar los parámetros de un motor de inducción trifásico. Estas técnicas, aunque son bastante precisas, no representan la realidad de manera exacta.
2. Se ha comprobado que, a pesar de tener acceso a los resultados de los ensayos de vacío y cortocircuito del propio fabricante, no existe un método “perfecto” que proporcione resultados sin cometer errores.
3. La técnica de [1], al facilitar múltiples coeficientes para calcular diferentes conjuntos de parámetros del MIT, ha ayudado a seleccionar la curva característica del MIT que más se ajustara al punto de funcionamiento nominal, permitiendo simular el MIT de manera más rigurosa bajo los efectos de los desequilibrios de tensión.

#### Efectos del desequilibrio en el MIT:

4. Mediante las diferentes expresiones y simulaciones en PSIM, se ha comprobado que el desequilibrio en la tensión de línea que alimenta los bornes del MIT, provoca efectos permanentes en el comportamiento del motor. Para poder cuantificar este desequilibrio se ha utilizado el VUF.
5. Los principales efectos del desequilibrio en la tensión de línea son los desequilibrios en las corrientes y la aparición de rizado en el par del MIT.
6. Tras cuantificar el desequilibrio de la corriente con CUF y el rizado en el par con TRF, se ha observado que estos efectos están relacionados a la variación de tensión, donde un pequeño cambio en ésta puede ocasionar variaciones muy superiores en el desequilibrio de corriente y en el rizado del par del MIT.
7. El último efecto estudiado ha sido la velocidad del MIT en régimen permanente. Este efecto, aunque existe, se ha podido concluir que es prácticamente nulo y, por tanto, despreciable.

## **1.9 Planificación**

No es de aplicación en este proyecto.

## **1.10 Orden de prioridad entre los documentos**

El orden de prioridad entre los documentos de este proyecto será el siguiente:

1. Memoria
2. Anexos
3. Planos

## 2 Anexos

### 2.1 Cálculos realizados

#### 2.1.1 Parametrización del MIT

##### 2.1.1.1 Mediante catálogo

Se definen los cálculos realizados para las curvas del catálogo del fabricante [2].

El subíndice “c” indica que son valores del catálogo, la letra posterior indica a qué curva característica mecánica pertenece.

$$X_m = \frac{V_N^2}{P_N \cdot \tan[\cos^{-1}(\cos \varphi_N)]} = \frac{6000^2}{8300 \cdot 10^3 \cdot \tan[\cos^{-1}(0,91)]} = 9,520 \Omega \quad (21)$$

$$X_{lr} = X_m \cdot 0,05 = 9,520 \cdot 0,05 = 0,476 \Omega \quad (22)$$

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (23)$$

$$\omega_s = n_s \cdot \frac{2\pi}{60} = 157,08 \text{ rad/s} \quad (24)$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1493}{1500} = 0,00467 \text{ pu} \quad (25)$$

$$R_r = \frac{V_N^2 \cdot s_N}{P_N} = \frac{(6000)^2 \cdot 0,00467}{8300 \cdot 10^3} = 0,020 \Omega \quad (26)$$

$$R_{s,cA} = R_r \cdot k_{RA} = 0,020 \cdot 1,5 = 0,030 \Omega \quad (27)$$

$$R_{s,cB} = R_r \cdot k_{RD} = 0,020 \cdot 1,5 = 0,030 \Omega \quad (28)$$

$$R_{s,cC} = R_r \cdot k_{RC} = 0,020 \cdot 1,5 = 0,030 \Omega \quad (29)$$

$$R_{s,cD} = R_r \cdot k_{RD} = 0,020 \cdot 0,5 = 0,010 \Omega \quad (30)$$

$$X_{ls,cA} = X_{lr} \cdot k_{XA} = 0,476 \cdot 0 = 0 \Omega \quad (31)$$

$$X_{ls,cB} = X_{lr} \cdot k_{XB} = 0,476 \cdot 0,5 = 0,238 \Omega \quad (32)$$

$$X_{ls,cC} = X_{lr} \cdot k_{XC} = 0,476 \cdot 1,0 = 0,476 \Omega \quad (33)$$

$$X_{ls,cD} = X_{lr} \cdot k_{XD} = 0,476 \cdot 0,5 = 0,238 \Omega \quad (34)$$

$$V_S = \frac{V_N}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} [V] \quad (35)$$

$$\bar{V}_{Th,cA} = \frac{V_S \cdot jX_m}{R_{S,cA} + j(X_{ls,cA} + X_m)} = 3464 + 11j [V] \quad (36)$$

$$\bar{V}_{Th,cB} = \frac{V_S \cdot jX_m}{R_{S,cB} + j(X_{ls,cB} + X_m)} = 3379 + 10j [V] \quad (37)$$

$$\bar{V}_{Th,cC} = \frac{V_S \cdot jX_m}{R_{S,cC} + j(X_{ls,cC} + X_m)} = 3299 + 10j [V] \quad (38)$$

$$\bar{V}_{Th,cD} = \frac{V_S \cdot jX_m}{R_{S,cD} + j(X_{ls,cD} + X_m)} = 3379 + 3j [V] \quad (39)$$

$$\bar{Z}_{Th,cA} = \frac{(R_{S,cA} + jX_{ls,cA}) \cdot jX_m}{R_{S,cA} + j(X_{ls,cA} + X_m)} = 0,030 + 0,00009j [\Omega] \quad (40)$$

$$\bar{Z}_{Th,cB} = \frac{(R_{S,cB} + jX_{ls,cB}) \cdot jX_m}{R_{S,cB} + j(X_{ls,cB} + X_m)} = 0,028 + 0,23228j [\Omega] \quad (41)$$

$$\bar{Z}_{Th,cC} = \frac{(R_{S,cC} + jX_{ls,cC}) \cdot jX_m}{R_{S,cC} + j(X_{ls,cC} + X_m)} = 0,027 + 0,45340j [\Omega] \quad (42)$$

$$\bar{Z}_{Th,cD} = \frac{(R_{S,cD} + jX_{ls,cD}) \cdot jX_m}{R_{S,cD} + j(X_{ls,cD} + X_m)} = 0,009 + 0,23220j [\Omega] \quad (43)$$

$$R_{Th,cA} = 0,030 \Omega \quad (44)$$

$$R_{Th,cB} = 0,028 \Omega \quad (45)$$

$$R_{Th,cC} = 0,027 \Omega \quad (46)$$

$$R_{Th,cD} = 0,009 \Omega \quad (47)$$

$$X_{Th,cA} = 0,00009 \Omega \quad (48)$$

$$X_{Th,cB} = 0,23228 \Omega \quad (49)$$

$$X_{Th,cC} = 0,45340 \Omega \quad (50)$$

$$X_{Th,cD} = 0,23220 \Omega \quad (51)$$

$$s \in [0; 1] \quad (52)$$

$$T_A = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th,cA}|}{\sqrt{\left(R_{Th,cA} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{Th,cA} + X_{lr})^2}} \right)^2 [Nm] \quad (53)$$

$$T_B = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th,cB}|}{\sqrt{\left(R_{Th,cB} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{Th,cB} + X_{lr})^2}} \right)^2 [Nm] \quad (54)$$

$$T_C = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th,cC}|}{\sqrt{\left(R_{Th,cC} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{Th,cC} + X_{lr})^2}} \right)^2 [Nm] \quad (55)$$

$$T_D = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s \cdot s} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th,cD}|}{\sqrt{\left(R_{Th,cD} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{Th,cD} + X_{lr})^2}} \right)^2 [Nm] \quad (56)$$

### 2.1.1.2 Mediante ensayos experimentales

Se definen los cálculos realizados para la curva de los ensayos experimentales.

El subíndice “E” indica que son valores de los ensayos experimentales.

$$Z_N = \frac{V_S}{I_N} = \frac{\left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)}{898} = 3,9 \Omega \quad (57)$$

$$R_{s,E}/Z_N = 0,005 pu \quad (58)$$

$$X_{ls,E}/Z_N = 0,153 pu \quad (59)$$

$$R_{r,E}/Z_N = 0,017 pu \quad (60)$$

$$X_{lr,E}/Z_N = 0,043 pu \quad (61)$$

$$X_{m,E}/Z_N = 8,599 pu \quad (62)$$

$$R_{s,E} = Z_N \cdot 0,005 = 3,9 \cdot 0,005 = 0,019 \Omega \quad (63)$$

$$X_{ls,E} = Z_N \cdot 0,153 = 3,9 \cdot 0,153 = 0,589 \Omega \quad (64)$$

$$R_{r,E} = Z_N \cdot 0,017 = 3,9 \cdot 0,017 = 0,067 \Omega \quad (65)$$

$$X_{lr,E} = Z_N \cdot 0,043 = 3,9 \cdot 0,043 = 0,165 \Omega \quad (66)$$

$$X_{m,E} = Z_N \cdot 8,599 = 3,9 \cdot 8,599 = 33,171 \Omega \quad (67)$$

$$\bar{V}_{Th,E} = \frac{V_S \cdot jX_{m,E}}{R_{s,E} + j(X_{ls,E} + X_{m,E})} = 3403,71 + 1,8707j [V] \quad (68)$$

$$\bar{Z}_{Th,E} = \frac{(R_{s,E} + jX_{ls,E}) \cdot jX_{m,E}}{R_{s,E} + j(X_{ls,E} + X_{m,E})} = 0,0179 + 0,5783j [\Omega] \quad (69)$$

$$R_{Th,E} = 0,0179 \Omega \quad (70)$$

$$X_{Th,E} = 0,5783 \Omega \quad (71)$$

$$T_E = \frac{3 \cdot R_{r,E}}{\omega_s \cdot S} \cdot \left( \frac{|\bar{V}_{Th,E}|}{\sqrt{\left(R_{Th,E} + \frac{R_{r,E}}{S}\right)^2 + (X_{Th,E} + X_{lr,E})^2}} \right)^2 [Nm] \quad (72)$$

### 2.1.1.3 Comparación de las técnicas

Se definen los cálculos realizados para la comparación de las técnicas.

$$T_N = M_N = 53115 \text{ Nm} \quad (73)$$

$$M_A/M_N = 0,51 \quad (74)$$

$$T_o = M_A = 0,51 \cdot M_N = 0,51 \cdot 53115 = 27089 \text{ Nm} \quad (75)$$

$$M_K/M_N = 2,13 \quad (76)$$

$$T_M = M_K = 2,13 \cdot M_N = 2,13 \cdot 53115 = 113135 \text{ Nm} \quad (77)$$

### 2.1.1.4 Cuantificación de los errores parciales y totales

Se definen los cálculos realizados para la cuantificación de los errores parciales y totales.

$$\sum_{j=1}^3 k_j = k_o + k_M + k_N = 0,2 + 0,3 + 0,5 = 1 \quad (78)$$

$$e_{T_{ensayo}} = k_o \cdot e_{o_{ensayo}} + k_M \cdot e_{M_{ensayo}} + k_N \cdot e_{N_{ensayo}} = 45 \% \quad (79)$$

$$k_o \cdot e_{o_{ensayo}} = 0,2 \cdot \left| \frac{T_{o_{Catálogo}} - T_o}{T_o} \right| \cdot 100 = 0,2 \cdot \left| \frac{26650 - 27089}{27089} \right| \cdot 100 = 0,32 \% \quad (80)$$

$$k_M \cdot e_{M_{ensayo}} = 0,3 \cdot \left| \frac{T_{M_{Catálogo}} - T_M}{T_M} \right| \cdot 100 = 0,3 \cdot \left| \frac{145322 - 113135}{113135} \right| \cdot 100 = 8,53 \% \quad (81)$$

$$k_N \cdot e_{N_{ensayo}} = 0,5 \cdot \left| \frac{T_{N_{Catálogo}} - T_N}{T_N} \right| \cdot 100 = 0,5 \cdot \left| \frac{15243 - 53115}{53115} \right| \cdot 100 = 35,65 \% \quad (82)$$

$$e_{T_{Curva A}} = k_o \cdot e_{o_{Curva A}} + k_M \cdot e_{M_{Curva A}} + k_N \cdot e_{N_{Curva A}} = 36 \% \quad (83)$$

$$k_o \cdot e_{o_{Curva A}} = 0,2 \cdot \left| \frac{T_{o_{Curva A}} - T_o}{T_o} \right| \cdot 100 = 0,2 \cdot \left| \frac{20238 - 27089}{27089} \right| \cdot 100 = 5,06 \% \quad (84)$$

$$k_M \cdot e_{M_{Curva A}} = 0,3 \cdot \left| \frac{T_{M_{Curva A}} - T_M}{T_M} \right| \cdot 100 = 0,3 \cdot \left| \frac{225463 - 113135}{113135} \right| \cdot 100 = 29,79 \% \quad (85)$$

$$k_N \cdot e_{N_{Curva A}} = 0,5 \cdot \left| \frac{T_{N_{Curva A}} - T_N}{T_N} \right| \cdot 100 = 0,5 \cdot \left| \frac{51495 - 53115}{53115} \right| \cdot 100 = 1,52 \% \quad (86)$$

$$e_{T_{Curva B}} = k_o \cdot e_{o_{Curva B}} + k_M \cdot e_{M_{Curva B}} + k_N \cdot e_{N_{Curva B}} = 27 \% \quad (87)$$

$$k_o \cdot e_{o_{Curva B}} = 0,2 \cdot \left| \frac{T_{o_{Curva B}} - T_o}{T_o} \right| \cdot 100 = 0,2 \cdot \left| \frac{8759 - 27089}{27089} \right| \cdot 100 = 13,53 \% \quad (88)$$

$$k_M \cdot e_{M_{Curva B}} = 0,3 \cdot \left| \frac{T_{M_{Curva B}} - T_M}{T_M} \right| \cdot 100 = 0,3 \cdot \left| \frac{147665 - 113135}{113135} \right| \cdot 100 = 9,16 \% \quad (89)$$

$$k_N \cdot e_{N_{Curva B}} = 0,5 \cdot \left| \frac{T_{N_{Curva B}} - T_N}{T_N} \right| \cdot 100 = 0,5 \cdot \left| \frac{48357 - 53115}{53115} \right| \cdot 100 = 4,48 \% \quad (90)$$

$$e_{T_{Curva C}} = k_O \cdot e_{O_{Curva C}} + k_M \cdot e_{M_{Curva C}} + k_N \cdot e_{N_{Curva C}} = 25 \% \quad (91)$$

$$k_O \cdot e_{O_{Curva C}} = 0,2 \cdot \left| \frac{T_{O_{Curva C}} - T_O}{T_O} \right| \cdot 100 = 0,2 \cdot \left| \frac{4858 - 27089}{27089} \right| \cdot 100 = 16,41 \% \quad (92)$$

$$k_M \cdot e_{M_{Curva C}} = 0,3 \cdot \left| \frac{T_{M_{Curva C}} - T_M}{T_M} \right| \cdot 100 = 0,3 \cdot \left| \frac{108190 - 113135}{113135} \right| \cdot 100 = 1,31 \% \quad (93)$$

$$k_N \cdot e_{N_{Curva C}} = 0,5 \cdot \left| \frac{T_{N_{Curva C}} - T_N}{T_N} \right| \cdot 100 = 0,5 \cdot \left| \frac{45271 - 53115}{53115} \right| \cdot 100 = 7,38 \% \quad (94)$$

$$e_{T_{Curva D}} = k_O \cdot e_{O_{Curva D}} + k_M \cdot e_{M_{Curva D}} + k_N \cdot e_{N_{Curva D}} = 28 \% \quad (95)$$

$$k_O \cdot e_{O_{Curva D}} = 0,2 \cdot \left| \frac{T_{O_{Curva D}} - T_O}{T_O} \right| \cdot 100 = 0,2 \cdot \left| \frac{8788 - 27089}{27089} \right| \cdot 100 = 13,51 \% \quad (96)$$

$$k_M \cdot e_{M_{Curva D}} = 0,3 \cdot \left| \frac{T_{M_{Curva D}} - T_M}{T_M} \right| \cdot 100 = 0,3 \cdot \left| \frac{151755 - 113135}{113135} \right| \cdot 100 = 10,24 \% \quad (97)$$

$$k_N \cdot e_{N_{Curva D}} = 0,5 \cdot \left| \frac{T_{N_{Curva D}} - T_N}{T_N} \right| \cdot 100 = 0,5 \cdot \left| \frac{48776 - 53115}{53115} \right| \cdot 100 = 4,08 \% \quad (98)$$

## 2.1.2 Cálculos para los desequilibrios en el MIT

### 2.1.2.1 Efecto en la tensión (VUF)

Se definen los cálculos realizados para el desequilibrio en tensión (VUF) y las tensiones que se han introducido, en [pu], en la configuración del MIT en PSIM.

Los valores de las tensiones de línea se han mostrado en la Tabla 32.

$$\overline{V_{ABVUF=X\%}} = V_{ABVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(0^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(0^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [kV] \quad (99)$$

$$\overline{V_{ABVUF=0,3\%}} = 108,38 \text{ kV} \quad (100)$$

$$\overline{V_{ABVUF=0,6\%}} = 107,30 \text{ kV} \quad (101)$$

$$\overline{V_{ABVUF=1,0\%}} = 106,00 \text{ kV} \quad (102)$$

$$\overline{V_{ABVUF=2,0\%}} = 102,80 \text{ kV} \quad (103)$$

$$\overline{V_{ABVUF=3,0\%}} = 99,90 \text{ kV} \quad (104)$$

$$\overline{V_{BC}} = V_{BCVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [kV] \quad (105)$$

$$\overline{V_{BCVUF=0,3\%}} = \overline{V_{BCVUF=0,6\%}} = \overline{V_{BCVUF=1,0\%}} = \overline{V_{BCVUF=2,0\%}} = \overline{V_{BCVUF=3,0\%}} = \overline{V_{BC}} [kV] \quad (106)$$

$$\overline{V_{BC}} = V_{BC} \cdot \left[ \cos\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [kV] \quad (107)$$

$$\overline{V_{BC}} = -54,655 - 94,665j [kV] \quad (108)$$

$$\overline{V_{CA}} = V_{CAVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [kV] \quad (109)$$

$$\overline{V_{CAVUF=0,3\%}} = \overline{V_{CAVUF=0,6\%}} = \overline{V_{CAVUF=1,0\%}} = \overline{V_{CAVUF=2,0\%}} = \overline{V_{CAVUF=3,0\%}} = \overline{V_{CA}} [kV] \quad (110)$$

$$\overline{V_{CA}} = V_{CA} \cdot \left[ \cos\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [kV] \quad (111)$$

$$\overline{V_{CA}} = -54,655 + 94,665j [kV] \quad (112)$$

$$\overline{V_{1VUF=X\%}} = \frac{1}{3} \cdot (\overline{V_{ABVUF=X\%}} + a \cdot \overline{V_{BC}} + a^2 \cdot \overline{V_{CA}}) [kV] \quad (113)$$

$$\overline{V_{1VUF=0,3\%}} = 109,00 - (3,08 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (114)$$

$$\overline{V_{1VUF=0,6\%}} = 108,64 - (3,08 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (115)$$

$$\overline{V_{1VUF=1,0\%}} = 108,21 - (3,08 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (116)$$

$$\bar{V}_{1VUF=2,0\%} = 107,14 - (3,08 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (117)$$

$$\bar{V}_{1VUF=3,0\%} = 106,17 - (3,08 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (118)$$

$$\bar{V}_{2VUF=X\%} = \frac{1}{3} \cdot (\overline{V_{ABVUF=X\%}} + a^2 \cdot \overline{V_{BC}} + a \cdot \overline{V_{CA}}) [kV] \quad (119)$$

$$\bar{V}_{2VUF=0,3\%} = -0,310 + (3,32 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (120)$$

$$\bar{V}_{2VUF=0,6\%} = -0,670 + (3,32 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (121)$$

$$\bar{V}_{2VUF=1,0\%} = -1,104 + (3,316 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (122)$$

$$\bar{V}_{2VUF=2,0\%} = -2,170 + (3,32 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (123)$$

$$\bar{V}_{2VUF=3,0\%} = -3,137 + (3,32 \cdot 10^{-14})j [kV] \quad (124)$$

$$VUF_X = |\overline{VUF_X}| = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=X\%}}{\bar{V}_{1VUF=X\%}} \right| \cdot 100 [\%] \quad (125)$$

$$VUF_1 = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=0,3\%}}{\bar{V}_{1VUF=0,3\%}} \right| \cdot 100 = 0,3 \% \quad (126)$$

$$VUF_2 = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=0,6\%}}{\bar{V}_{1VUF=0,6\%}} \right| \cdot 100 = 0,6 \% \quad (127)$$

$$VUF_3 = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=1,0\%}}{\bar{V}_{1VUF=1,0\%}} \right| \cdot 100 = 1,0 \% \quad (128)$$

$$VUF_4 = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=2,0\%}}{\bar{V}_{1VUF=2,0\%}} \right| \cdot 100 = 2,0 \% \quad (129)$$

$$VUF_5 = \left| \frac{\bar{V}_{2VUF=3,0\%}}{\bar{V}_{1VUF=3,0\%}} \right| \cdot 100 = 3,0 \% \quad (130)$$

$$V_{1 pu} = \frac{\overline{V_{ABVUF=X\%}}}{V_N} [pu] \quad (131)$$

$$V_{2 pu} = V_{3 pu} = \frac{\overline{V_{BCVUF=X\%}}}{V_N} = \frac{\overline{V_{CAVUF=X\%}}}{V_N} [pu] \quad (132)$$

$$V_N = V_L = 110 kV \quad (133)$$

$$V_1 pu_{VUF=0,3\%} = 0,985 pu \quad (134)$$

$$V_1 pu_{VUF=0,6\%} = 0,975 pu \quad (135)$$

$$V_1 pu_{VUF=1,0\%} = 0,964 pu \quad (136)$$

$$V_1 pu_{VUF=2,0\%} = 0,935 pu \quad (137)$$

$$V_1 pu_{VUF=3,0\%} = 0,908 pu \quad (138)$$

$$V_2 pu_{VUF=X\%} = V_3 pu_{VUF=X\%} = 0,994 pu \quad (139)$$

### 2.1.2.2 Efecto en la corriente (CUF)

Se definen los cálculos realizados para el desequilibrio de corriente (CUF).

Los valores de las corrientes de línea se han mostrado en la Tabla 35.

$$\bar{I}_{AVUF=X\%} = I_{AVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(0^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(0^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [A] \quad (140)$$

$$\bar{I}_{AVUF=0,3\%} = 980,45 A \quad (141)$$

$$\bar{I}_{AVUF=0,6\%} = 976,27 A \quad (142)$$

$$\bar{I}_{AVUF=1,0\%} = 971,85 A \quad (143)$$

$$\bar{I}_{AVUF=2,0\%} = 961,11 A \quad (144)$$

$$\bar{I}_{AVUF=3,0\%} = 952,33 A \quad (145)$$

$$\bar{I}_{BVUF=X\%} = I_{BVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(-120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [A] \quad (146)$$

$$\bar{I}_{BVUF=0,3\%} = -499,10 - 864,47j [A] \quad (147)$$

$$\bar{I}_{BVUF=0,6\%} = -506,79 - 877,79j [A] \quad (148)$$

$$\bar{I}_{BVUF=1,0\%} = -515,27 - 892,48j [A] \quad (149)$$

$$\bar{I}_{BVUF=2,0\%} = -537,76 - 931,42j [A] \quad (150)$$

$$\bar{I}_{BVUF=3,0\%} = -558,86 - 967,98j [A] \quad (151)$$

$$\bar{I}_{CVUF=X\%} = I_{CVUF=X\%} \cdot \left[ \cos\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) + j \cdot \sin\left(120^\circ \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right] [A] \quad (152)$$

$$\bar{I}_{C_{VUF=0,3\%}} = -490,94 + 850,34j [A] \quad (153)$$

$$\bar{I}_{C_{VUF=0,6\%}} = -490,05 + 848,79j [A] \quad (154)$$

$$\bar{I}_{C_{VUF=1,0\%}} = -489,16 + 847,25j [A] \quad (155)$$

$$\bar{I}_{C_{VUF=2,0\%}} = -487,29 + 844,01j [A] \quad (156)$$

$$\bar{I}_{C_{VUF=3,0\%}} = -486,18 + 842,01j [A] \quad (157)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=X\%}} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_{A_{VUF=X\%}} + a \cdot \bar{I}_{B_{VUF=X\%}} + a^2 \cdot \bar{I}_{C_{VUF=X\%}}) [A] \quad (158)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=0,3\%}} = 986,85 - (1,71 \cdot 10^{-13})j [A] \quad (159)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=0,6\%}} = 989,98 - (1,71 \cdot 10^{-13})j [A] \quad (160)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=1,0\%}} = 993,57 - (1,71 \cdot 10^{-13})j [A] \quad (161)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=2,0\%}} = 1003,74 - (5,68 \cdot 10^{-14})j [A] \quad (162)$$

$$\bar{I}_{1_{VUF=3,0\%}} = 1014,14 - (3,03 \cdot 10^{-13})j [A] \quad (163)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=X\%}} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_{A_{VUF=X\%}} + a^2 \cdot \bar{I}_{B_{VUF=X\%}} + a \cdot \bar{I}_{C_{VUF=X\%}}) [A] \quad (164)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=0,3\%}} = -3,20 + 4,71j [A] \quad (165)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=0,6\%}} = -6,86 + 9,66j [A] \quad (166)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=1,0\%}} = -10,86 + 15,08j [A] \quad (167)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=2,0\%}} = -21,31 + 29,14j [A] \quad (168)$$

$$\bar{I}_{2_{VUF=3,0\%}} = -30,91 + 41,96j [A] \quad (169)$$

$$CUF_X = |\overline{CUF}_X| = \left| \frac{\bar{I}_{2_{VUF=X\%}}}{\bar{I}_{1_{VUF=X\%}}} \right| \cdot 100 [\%] \quad (170)$$

$$CUF_1 = \left| \frac{\bar{I}_{2_{VUF=0,3\%}}}{\bar{I}_{1_{VUF=0,3\%}}} \right| \cdot 100 = 0,6 \% \quad (171)$$

$$CUF_2 = \left| \frac{\bar{I}_{2_{VUF=0,6\%}}}{\bar{I}_{1_{VUF=0,6\%}}} \right| \cdot 100 = 1,2 \% \quad (172)$$

$$CUF_3 = \left| \frac{\bar{I}_{2VUF=1,0\%}}{\bar{I}_{1VUF=1,0\%}} \right| \cdot 100 = 1,9 \% \quad (173)$$

$$CUF_4 = \left| \frac{\bar{I}_{2VUF=2,0\%}}{\bar{I}_{1VUF=2,0\%}} \right| \cdot 100 = 3,6 \% \quad (174)$$

$$CUF_5 = \left| \frac{\bar{I}_{2VUF=3,0\%}}{\bar{I}_{1VUF=3,0\%}} \right| \cdot 100 = 5,1 \% \quad (175)$$

### 2.1.2.3 Efecto en el par (TRF)

Se definen los cálculos realizados para el rizado en el par (TRF).

$$T_{avg_{VUF=0,3\%}} = 53115,07 \text{ Nm} \quad (176)$$

$$T_{avg_{VUF=0,6\%}} = 53115,14 \text{ Nm} \quad (177)$$

$$T_{avg_{VUF=1,0\%}} = 53115,22 \text{ Nm} \quad (178)$$

$$T_{avg_{VUF=2,0\%}} = 53115,44 \text{ Nm} \quad (179)$$

$$T_{avg_{VUF=3,0\%}} = 53115,65 \text{ Nm} \quad (180)$$

$$T_{máx_1} = T_{máx_{VUF=0,3\%}} = 53433,68 \text{ Nm} \quad (181)$$

$$T_{máx_2} = T_{máx_{VUF=0,6\%}} = 53785,07 \text{ Nm} \quad (182)$$

$$T_{máx_3} = T_{máx_{VUF=1,0\%}} = 54168,32 \text{ Nm} \quad (183)$$

$$T_{máx_4} = T_{máx_{VUF=2,0\%}} = 55162,09 \text{ Nm} \quad (184)$$

$$T_{máx_5} = T_{máx_{VUF=3,0\%}} = 56065,46 \text{ Nm} \quad (185)$$

$$T_{mín_1} = T_{mín_{VUF=0,3\%}} = 52796,32 \text{ Nm} \quad (186)$$

$$T_{mín_2} = T_{mín_{VUF=0,6\%}} = 52444,93 \text{ Nm} \quad (187)$$

$$T_{mín_3} = T_{mín_{VUF=1,0\%}} = 52061,68 \text{ Nm} \quad (188)$$

$$T_{mín_4} = T_{mín_{VUF=2,0\%}} = 51067,89 \text{ Nm} \quad (189)$$

$$T_{mín_5} = T_{mín_{VUF=3,0\%}} = 50164,52 \text{ Nm} \quad (190)$$

$$T_{pp_{VUF=X\%}} = T_{máx_X} - T_{mín_X} \text{ [Nm]} \quad (191)$$

$$T_{ppVUF=0,3\%} = T_{máx_1} - T_{mín_1} = 637,35 \text{ Nm} \quad (192)$$

$$T_{ppVUF=0,6\%} = T_{máx_2} - T_{mín_2} = 1340,14 \text{ Nm} \quad (193)$$

$$T_{ppVUF=1,0\%} = T_{máx_3} - T_{mín_3} = 2106,64 \text{ Nm} \quad (194)$$

$$T_{ppVUF=2,0\%} = T_{máx_4} - T_{mín_4} = 4094,20 \text{ Nm} \quad (195)$$

$$T_{ppVUF=3,0\%} = T_{máx_5} - T_{mín_5} = 5900,94 \text{ Nm} \quad (196)$$

$$TRF_X = \frac{T_{ppVUF=X\%}}{T_{avgVUF=X\%}} \cdot 100 [\%] \quad (197)$$

$$TRF_1 = \frac{T_{ppVUF=0,3\%}}{T_{avgVUF=0,3\%}} \cdot 100 = 1,20 \% \quad (198)$$

$$TRF_2 = \frac{T_{ppVUF=0,6\%}}{T_{avgVUF=0,6\%}} \cdot 100 = 2,52 \% \quad (199)$$

$$TRF_3 = \frac{T_{ppVUF=1,0\%}}{T_{avgVUF=1,0\%}} \cdot 100 = 3,97 \% \quad (200)$$

$$TRF_4 = \frac{T_{ppVUF=2,0\%}}{T_{avgVUF=2,0\%}} \cdot 100 = 7,71 \% \quad (201)$$

$$TRF_5 = \frac{T_{ppVUF=3,0\%}}{T_{avgVUF=3,0\%}} \cdot 100 = 11,11 \% \quad (202)$$

#### 2.1.2.4 Efecto en la velocidad

Se definen los cálculos realizados para el rizado en la velocidad.

$$n_{avgVUF=0,3\%} = 1491,66 \text{ min}^{-1} \quad (203)$$

$$n_{avgVUF=3,0\%} = 1491,12 \text{ min}^{-1} \quad (204)$$

$$n_{máx_1} = n_{máxVUF=0,3\%} = 1491,68 \text{ min}^{-1} \quad (205)$$

$$n_{máx_5} = n_{máxVUF=3,0\%} = 1491,30 \text{ min}^{-1} \quad (206)$$

$$n_{mín_1} = n_{mínVUF=0,3\%} = 1491,64 \text{ min}^{-1} \quad (207)$$

$$n_{mín_5} = n_{mínVUF=3,0\%} = 1490,94 \text{ min}^{-1} \quad (208)$$

$$n_{pp_X} = n_{máx_X} - n_{mín_X} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (209)$$

$$n_{pp_{VUF=0,3\%}} = n_{máx_1} - n_{mín_1} = 0,04 \text{ min}^{-1} \quad (210)$$

$$n_{pp_{VUF=3,0\%}} = n_{máx_5} - n_{mín_5} = 0,36 \text{ min}^{-1} \quad (211)$$

$$n_{r_{VUF=X\%}} = \frac{n_{pp_{VUF=X\%}}}{n_{avg_{VUF=X\%}}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (212)$$

$$n_{r_1} = \frac{n_{pp_{VUF=0,3\%}}}{n_{avg_{VUF=0,3\%}}} \cdot 100 = 0,003 \text{ \%} \quad (213)$$

$$n_{r_5} = \frac{n_{pp_{VUF=3,0\%}}}{n_{avg_{VUF=3,0\%}}} \cdot 100 = 0,024 \text{ \%} \quad (214)$$

## 2.2 Resultados de los datos tratados en Excel

### 2.2.1 Ensayos experimentales

Puntos de funcionamiento					
T Fabricante	TM	n (rpm)			
27089	113135	0		113135	765
	113135	15		113135	780
	113135	30		113135	795
	113135	45		113135	810
	113135	60		113135	825
	113135	75		113135	840
	113135	90		113135	855
	113135	105		113135	870
	113135	120		113135	885
	113135	135		113135	900
	113135	150		113135	915
	113135	165		113135	930
	113135	180		113135	945
	113135	195		113135	960
	113135	210		113135	975
	113135	225		113135	990
	113135	240		113135	1005
	113135	255		113135	1020
	113135	270		113135	1035
	113135	285		113135	1050
	113135	300		113135	1065
	113135	315		113135	1080
	113135	330		113135	1095
	113135	345		113135	1110
	113135	360		113135	1125
	113135	375		113135	1140
	113135	390		113135	1155
	113135	405		113135	1170
	113135	420		113135	1185
	113135	435		113135	1200
	113135	450		113135	1215
	113135	465		113135	1230
	113135	480		113135	1245
	113135	495		113135	1260
	113135	510		113135	1275
	113135	525		113135	1290
	113135	540		113135	1305
	113135	555		113135	1320
	113135	570		113135	1335
	113135	585		113135	1350
	113135	600		113135	1365
	113135	615		113135	1380
	113135	630		113135	1395
	113135	645		113135	1410
	113135	660		113135	1425
	113135	675		113135	1440
	113135	690		113135	1455
	113135	705		113135	1470
	113135	720		113135	1493
	113135	735	53115	113135	1493
	113135	750	0	113135	1508

2.2.2 Parametrización mediante catálogo

Caso A			Caso B			Caso C			Caso D		
Rr	0,02	Ohm	Rr	0,02	Ohm	Rr	0,02	Ohm	Rr	0,02	Ohm
ws	157,08	rad/s	ws	157,08	rad/s	ws	157,08	rad/s	ws	157,08	rad/s
Vth	3464	V	Vth	3380	V	Vth	3299	V	Vth	3380	V
Rth	0,030361137	Ohm	Rth	0,028898181	Ohm	Rth	0,027538472	Ohm	Rth	0,00963281	Ohm
Xth	9,68306E-05	Ohm	Xth	0,232280181	Ohm	Xth	0,453407495	Ohm	Xth	0,23220026	Ohm
Xlr	0,476	Ohm	Xlr	0,476	Ohm	Xlr	0,476	Ohm	Xlr	0,476	Ohm
s (pu)	T (Nm)	n (rpm)	s (pu)	T (Nm)	n (rpm)	s (pu)	T (Nm)	n (rpm)	s (pu)	T (Nm)	n (rpm)
1	20238	0	1	8759	0	1	4858	0	1	8788	0
0,99	20440	15	0,99	8848	15	0,99	4907	15	0,99	8877	15
0,98	20647	30	0,98	8938	30	0,98	4957	30	0,98	8967	30
0,97	20858	45	0,97	9029	45	0,97	5008	45	0,97	9059	45
0,96	21073	60	0,96	9123	60	0,96	5060	60	0,96	9153	60
0,95	21293	75	0,95	9219	75	0,95	5113	75	0,95	9249	75
0,94	21517	90	0,94	9316	90	0,94	5168	90	0,94	9348	90
0,93	21746	105	0,93	9416	105	0,93	5223	105	0,93	9448	105
0,92	21980	120	0,92	9518	120	0,92	5280	120	0,92	9550	120
0,91	22219	135	0,91	9622	135	0,91	5338	135	0,91	9655	135
0,9	22463	150	0,9	9728	150	0,9	5397	150	0,9	9762	150
0,89	22713	165	0,89	9837	165	0,89	5457	165	0,89	9871	165
0,88	22968	180	0,88	9948	180	0,88	5519	180	0,88	9983	180
0,87	23230	195	0,87	10062	195	0,87	5582	195	0,87	10097	195
0,86	23497	210	0,86	10179	210	0,86	5647	210	0,86	10214	210
0,85	23770	225	0,85	10298	225	0,85	5713	225	0,85	10334	225
0,84	24050	240	0,84	10420	240	0,84	5781	240	0,84	10457	240
0,83	24336	255	0,83	10545	255	0,83	5851	255	0,83	10582	255
0,82	24630	270	0,82	10673	270	0,82	5922	270	0,82	10711	270
0,81	24930	285	0,81	10804	285	0,81	5995	285	0,81	10843	285
0,8	25238	300	0,8	10938	300	0,8	6069	300	0,8	10978	300
0,79	25553	315	0,79	11076	315	0,79	6146	315	0,79	11116	315
0,78	25877	330	0,78	11217	330	0,78	6224	330	0,78	11258	330
0,77	26208	345	0,77	11362	345	0,77	6305	345	0,77	11404	345
0,76	26549	360	0,76	11510	360	0,76	6388	360	0,76	11554	360
0,75	26898	375	0,75	11663	375	0,75	6473	375	0,75	11707	375
0,74	27256	390	0,74	11820	390	0,74	6560	390	0,74	11865	390
0,73	27625	405	0,73	11980	405	0,73	6649	405	0,73	12026	405
0,72	28003	420	0,72	12146	420	0,72	6741	420	0,72	12193	420
0,71	28392	435	0,71	12316	435	0,71	6836	435	0,71	12364	435
0,7	28791	450	0,7	12491	450	0,7	6933	450	0,7	12540	450
0,69	29202	465	0,69	12670	465	0,69	7033	465	0,69	12720	465
0,68	29625	480	0,68	12855	480	0,68	7136	480	0,68	12907	480
0,67	30060	495	0,67	13046	495	0,67	7242	495	0,67	13098	495
0,66	30508	510	0,66	13242	510	0,66	7352	510	0,66	13296	510
0,65	30970	525	0,65	13444	525	0,65	7464	525	0,65	13499	525
0,64	31445	540	0,64	13653	540	0,64	7580	540	0,64	13709	540
0,63	31936	555	0,63	13868	555	0,63	7700	555	0,63	13926	555
0,62	32442	570	0,62	14090	570	0,62	7824	570	0,62	14149	570
0,61	32964	585	0,61	14319	585	0,61	7951	585	0,61	14380	585
0,6	33503	600	0,6	14556	600	0,6	8083	600	0,6	14618	600
0,59	34060	615	0,59	14800	615	0,59	8220	615	0,59	14864	615
0,58	34636	630	0,58	15053	630	0,58	8361	630	0,58	15119	630
0,57	35231	645	0,57	15315	645	0,57	8507	645	0,57	15383	645
0,56	35847	660	0,56	15586	660	0,56	8658	660	0,56	15655	660
0,55	36485	675	0,55	15866	675	0,55	8814	675	0,55	15938	675
0,54	37146	690	0,54	16157	690	0,54	8977	690	0,54	16231	690
0,53	37831	705	0,53	16459	705	0,53	9145	705	0,53	16535	705
0,52	38542	720	0,52	16772	720	0,52	9320	720	0,52	16851	720
0,51	39279	735	0,51	17098	735	0,51	9501	735	0,51	17179	735
0,5	40046	750	0,5	17436	750	0,5	9690	750	0,5	17520	750

0,49	40842	765	0,49	17788	765	0,49	9887	765	0,49	17874	765
0,48	41671	780	0,48	18154	780	0,48	10091	780	0,48	18243	780
0,47	42533	795	0,47	18536	795	0,47	10305	795	0,47	18628	795
0,46	43432	810	0,46	18933	810	0,46	10527	810	0,46	19029	810
0,45	44369	825	0,45	19349	825	0,45	10759	825	0,45	19448	825
0,44	45347	840	0,44	19783	840	0,44	11002	840	0,44	19886	840
0,43	46369	855	0,43	20236	855	0,43	11256	855	0,43	20343	855
0,42	47438	870	0,42	20711	870	0,42	11521	870	0,42	20822	870
0,41	48556	885	0,41	21208	885	0,41	11800	885	0,41	21324	885
0,4	49727	900	0,4	21730	900	0,4	12092	900	0,4	21851	900
0,39	50956	915	0,39	22278	915	0,39	12399	915	0,39	22404	915
0,38	52246	930	0,38	22855	930	0,38	12723	930	0,38	22986	930
0,37	53603	945	0,37	23461	945	0,37	13063	945	0,37	23599	945
0,36	55030	960	0,36	24101	960	0,36	13422	960	0,36	24245	960
0,35	56535	975	0,35	24776	975	0,35	13801	975	0,35	24927	975
0,34	58122	990	0,34	25490	990	0,34	14202	990	0,34	25649	990
0,33	59800	1005	0,33	26246	1005	0,33	14627	1005	0,33	26413	1005
0,32	61576	1020	0,32	27047	1020	0,32	15078	1020	0,32	27223	1020
0,31	63458	1035	0,31	27899	1035	0,31	15558	1035	0,31	28085	1035
0,3	65457	1050	0,3	28806	1050	0,3	16069	1050	0,3	29002	1050
0,29	67582	1065	0,29	29772	1065	0,29	16615	1065	0,29	29980	1065
0,28	69846	1080	0,28	30806	1080	0,28	17198	1080	0,28	31027	1080
0,27	72264	1095	0,27	31912	1095	0,27	17824	1095	0,27	32148	1095
0,26	74849	1110	0,26	33101	1110	0,26	18497	1110	0,26	33351	1110
0,25	77621	1125	0,25	34379	1125	0,25	19222	1125	0,25	34648	1125
0,24	80598	1140	0,24	35759	1140	0,24	20006	1140	0,24	36047	1140
0,23	83803	1155	0,23	37253	1155	0,23	20856	1155	0,23	37563	1155
0,22	87263	1170	0,22	38875	1170	0,22	21781	1170	0,22	39209	1170
0,21	91008	1185	0,21	40641	1185	0,21	22791	1185	0,21	41003	1185
0,2	95071	1200	0,2	42572	1200	0,2	23897	1200	0,2	42966	1200
0,19	99491	1215	0,19	44690	1215	0,19	25115	1215	0,19	45121	1215
0,18	104315	1230	0,18	47025	1230	0,18	26461	1230	0,18	47498	1230
0,17	109593	1245	0,17	49609	1245	0,17	27958	1245	0,17	50131	1245
0,16	115387	1260	0,16	52484	1260	0,16	29630	1260	0,16	53062	1260
0,15	121762	1275	0,15	55697	1275	0,15	31511	1275	0,15	56343	1275
0,14	128797	1290	0,14	59311	1290	0,14	33640	1290	0,14	60037	1290
0,13	136573	1305	0,13	63398	1305	0,13	36068	1305	0,13	64221	1305
0,12	145178	1320	0,12	68052	1320	0,12	38861	1320	0,12	68991	1320
0,11	154693	1335	0,11	73384	1335	0,11	42102	1335	0,11	74466	1335
0,1	165177	1350	0,1	79534	1350	0,1	45901	1350	0,1	80794	1350
0,09	176627	1365	0,09	86668	1365	0,09	50405	1365	0,09	88151	1365
0,08	188903	1380	0,08	94974	1380	0,08	55804	1380	0,08	96740	1380
0,07	201579	1395	0,07	104637	1395	0,07	62348	1395	0,07	106763	1395
0,06	213651	1410	0,06	115745	1410	0,06	70343	1410	0,06	118324	1410
0,05	222999	1425	0,05	128025	1425	0,05	80090	1425	0,05	131155	1425
0,04	225463	1440	0,04	140117	1440	0,04	91591	1440	0,04	143835	1440
0,03	213643	1455	0,03	147665	1455	0,03	103361	1455	0,03	151755	1455
0,02	176613	1470	0,02	139265	1470	0,02	108190	1470	0,02	142858	1470
0,00466667	51495	1493	0,00466667	48357	1493	0,00466667	45271	1493	0,00466667	48776	1493
-0,00533333	-60399	1508	-0,00533333	-56369	1508	-0,00533333	-52389	1508	-0,00533333	-55817	1508



## 2.2.4 Curva mecánica de arranque

Curva arranque					
s (pu)	T (Nm)	n (rpm)			
1	0	0	0,49	0	765
0,99	0	15	0,48	0	780
0,98	0	30	0,47	0	795
0,97	0	45	0,46	0	810
0,96	0	60	0,45	0	825
0,95	0	75	0,44	0	840
0,94	0	90	0,43	0	855
0,93	0	105	0,42	0	870
0,92	0	120	0,41	0	885
0,91	0	135	0,4	0	900
0,9	0	150	0,39	0	915
0,89	0	165	0,38	0	930
0,88	0	180	0,37	0	945
0,87	0	195	0,36	0	960
0,86	0	210	0,35	0	975
0,85	0	225	0,34	0	990
0,84	0	240	0,33	0	1005
0,83	0	255	0,32	0	1020
0,82	0	270	0,31	0	1035
0,81	0	285	0,3	0	1050
0,8	0	300	0,29	0	1065
0,79	0	315	0,28	0	1080
0,78	0	330	0,27	0	1095
0,77	0	345	0,26	0	1110
0,76	0	360	0,25	0	1125
0,75	0	375	0,24	0	1140
0,74	0	390	0,23	0	1155
0,73	0	405	0,22	0	1170
0,72	0	420	0,21	0	1185
0,71	0	435	0,2	0	1200
0,7	0	450	0,19	0	1215
0,69	0	465	0,18	0	1230
0,68	0	480	0,17	0	1245
0,67	0	495	0,16	0	1260
0,66	0	510	0,15	0	1275
0,65	0	525	0,14	0	1290
0,64	0	540	0,13	0	1305
0,63	0	555	0,12	0	1320
0,62	0	570	0,11	0	1335
0,61	0	585	0,1	0	1350
0,6	0	600	0,09	0	1365
0,59	0	615	0,08	0	1380
0,58	0	630	0,07	0	1395
0,57	0	645	0,06	53115	1410
0,56	0	660	0,05	53115	1425
0,55	0	675	0,04	53115	1440
0,54	0	690	0,03	53115	1455
0,53	0	705	0,02	53115	1470
0,52	0	720	0,00466667	53115	1493
0,51	0	735	-0,00533333	53115	1508
0,5	0	750			

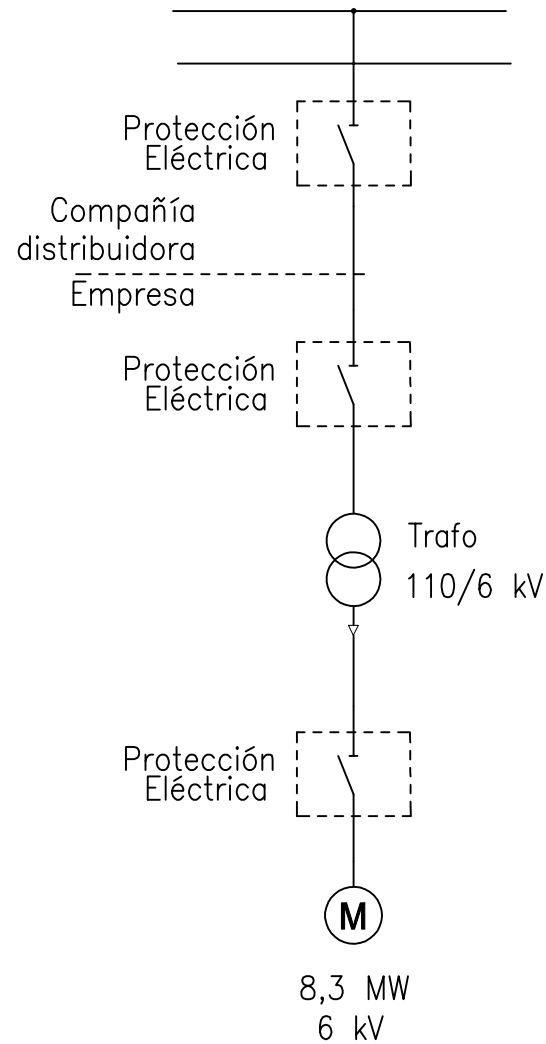
### **3 Planos**

#### **3.1 Esquema unifilar del MIT**

#### **3.2 Circuito equivalente del MIT en PSIM**

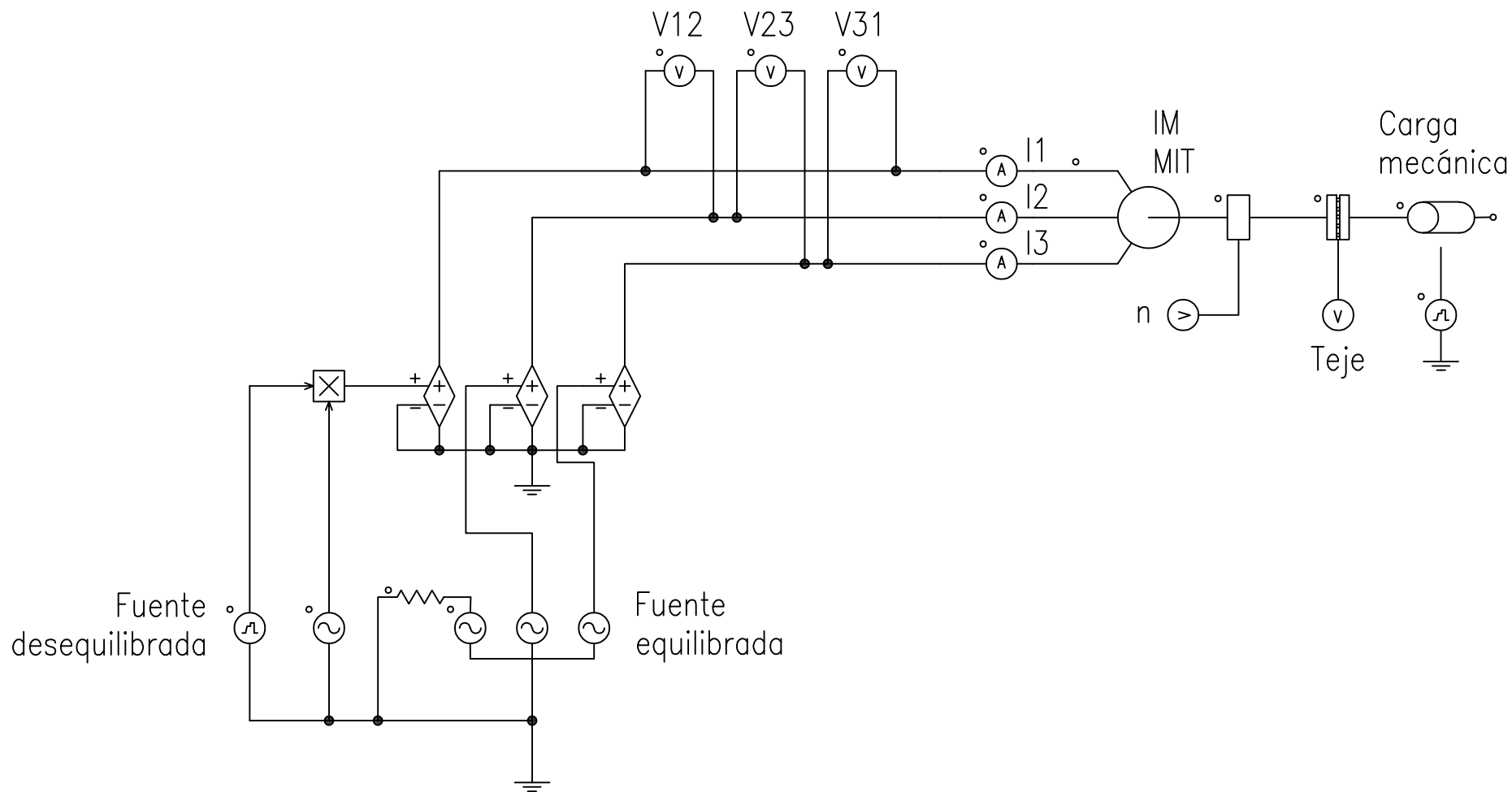
#### **3.3 Comportamiento del MIT en PSIM**

# Subestación 110 kV

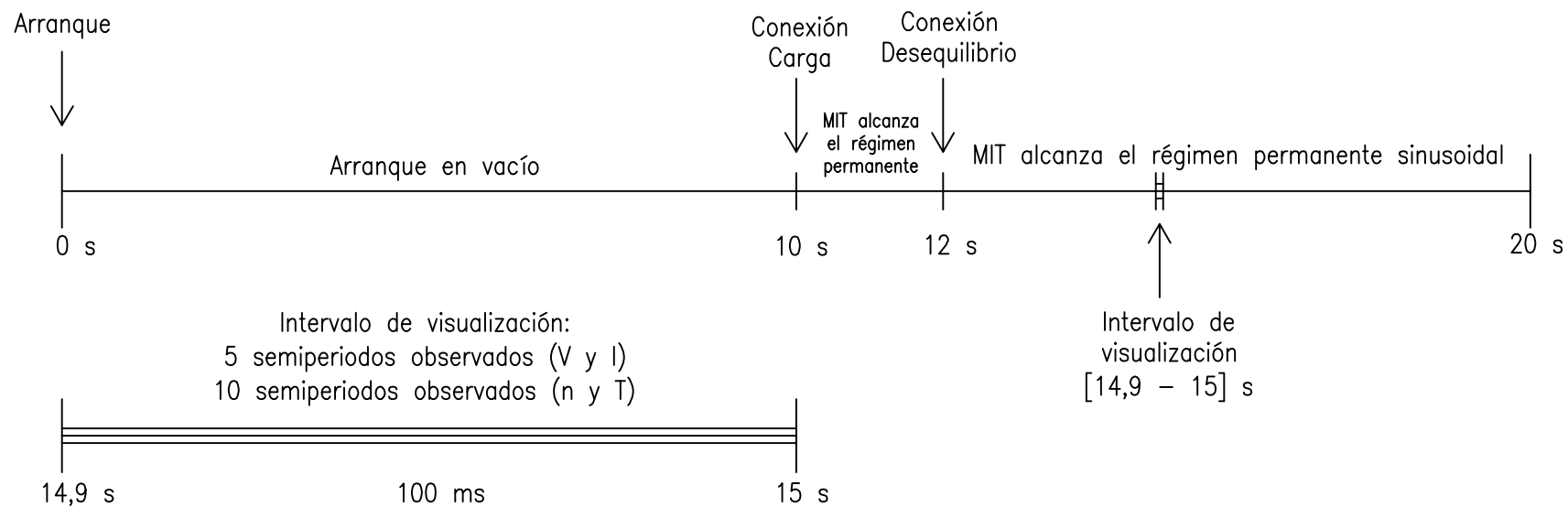


	Fecha	Nombre	<i>Estudio del efecto de desequilibrios de inducción trifásicos de media tensión</i>
<i>Dibujado</i>	23.03.24	JESÚS LÓPEZ ASENSIO	
<i>Comprobado</i>	01.04.24	LUIS GUASCH PESQUER	
<i>Firma</i>			
<i>Escala</i>	N/A		Nº 1

*Esquema unifilar del MIT*



	Fecha	Nombre	Estudio del efecto de desequilibrios de inducción trifásicos de media tensión
Dibujado	23.03.24	JESÚS LÓPEZ ASENSIO	
Comprobado	01.04.24	LUIS GUASCH PESQUER	
Firma			
Escala	Circuito equivalente del MIT en PSIM		Nº 2
	N/A		



	Fecha	Nombre	Estudio del efecto de desequilibrios de inducción trifásicos de media tensión
Dibujado	23.03.24	JESÚS LÓPEZ ASENSIO	
Comprobado	01.04.24	LUIS GUASCH PESQUER	
Firma			
Escala	Comportamiento del MIT en PSIM		Nº 3
	N/A		