

6. Mínimos Cuadrados

En este capítulo se describe el uso del método de los mínimos cuadrados para la determinación de los parámetros del modelo de circuito del motor de inducción. Posteriormente, se aplicará el algoritmo a los distintos grupos de motores expuestos en el Capítulo 4: *Adquisición de datos*, para comprobar su comportamiento y poder verificar su capacidad de encontrar el conjunto de parámetros óptimo para motores de diferentes características.

Como se explicó en el Capítulo 3: *Algoritmos*, aquellos que se emplean para resolver un sistema de ecuaciones no lineal mediante mínimos cuadrados presentan ciertos problemas en la localización del óptimo global y de convergencia cuando la solución inicial proporcionada se encuentra lejos de la solución óptima. Sin embargo es el método que tradicionalmente se ha utilizado para este propósito. En este capítulo se presentarán resultados partiendo de una solución cercana al óptimo, dada por un modelo más simplificado, así como los resultados obtenidos cuando se parte de una solución cualquiera. También se compararán estos resultados con los obtenidos por un modelo más simple empleado en trabajos anteriores a éste [1].

En este trabajo los sistemas de ecuaciones no lineales $F(x) = 0$ se han resuelto en primer lugar utilizando la herramienta “*fsolve*” proporcionada en el “Optimization Toolbox” de Matlab [34]. Esta herramienta utiliza un algoritmo basado en los mínimos cuadrados que emplea los métodos de Newton-Gauss, de Levenberg-Marquardt o basados en la región de confianza (*Trust Region Algorithm*). Como puede observarse en la literatura [4], los métodos basados en el método de Newton proporcionan resultados satisfactorios siempre que la solución de partida sea cercana al óptimo. En caso de que la solución de partida no sea lo suficientemente cercana al óptimo, el algoritmo puede converger a una solución incorrecta o incluso puede no converger. La ventaja de los métodos basados en los mínimos cuadrados es que si el sistema de ecuaciones no tiene un “cero”, el método converge a un punto donde el residuo es pequeño. El residuo, ε , en el punto de convergencia puede considerarse como:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_i f_i^2} \quad (6.1)$$

La configuración usada fue la siguiente:

- Algoritmo de Levenberg-Marquardt
- Criterios de parada:
 - Máximo número de iteraciones: 10^4
 - Máximo número de evaluaciones de la función: 10^4
 - Tolerancia: 10^{-20}

En la mayoría de los casos, en los que hay convergencia, el algoritmo se detiene debido a que no es capaz de mejorar durante un número determinado de iteraciones debido, a su vez, a que ya se ha alcanzado un error muy pequeño y es difícil seguir mejorando. En los casos en que el algoritmo no converge, la parada se suele producir por haberse alcanzado el número máximo de iteraciones permitido, el tamaño del paso el vector de cambio de solución es menor que el valor mínimo o se ha superado el número máximo permitido de evaluaciones de la función. Normalmente son necesarias unas 30 iteraciones y si se llega a las 10000, (el límite fijado), es un indicador de que el algoritmo no ha sido capaz de converger, o de que lo ha hecho a una solución que está lejos de ser la óptima. El criterio de la tolerancia se ha incluido con un valor muy elevado para que el algoritmo alcance la solución con la máxima precisión posible. A partir de un valor de 10^{-17} , Matlab identifica el número como un cero por lo que, de forma práctica, el límite estaría en ese valor.

6.1. Resultados

El método de los mínimos ha sido probado en motores de diferentes características utilizando los dos modelos de circuito propuestos. A continuación se analizará su funcionamiento y resultados.

6.1.1. Modelo de circuito de jaula simple con parámetros ajustados con el deslizamiento

Este algoritmo ha sido probado en más de 1000 motores, de distintas potencias, tensiones y tipos (NEMA e IEC).

Se han llevado a cabo un total de 18 simulaciones. Para cada catálogo se han obtenido los parámetros de todos sus motores empleando como criterio el par de arranque por un lado y la intensidad de arranque por otro, excepto para un catálogo que no proporciona datos sobre intensidad de arranque. Además, para cada uno de esos casos, se han realizado dos simulaciones distintas: en una partiendo de una solución genérica y en otra de una solución previa obtenida por un modelo más simple.

El algoritmo de Mínimos Cuadrados requiere partir de una solución inicial dada. Tal y como se ha comentado, dicha solución inicial debe ser lo más cercana posible al punto óptimo. En este trabajo se han probado dos tipos de soluciones iniciales para el caso de los Mínimos Cuadrados:

- Solución genérica, explicada en el Capítulo 5: *Ecuaciones*.
- Solución obtenida por un modelo más simple [1].

Comparando cada pareja de simulaciones (partiendo de una u otra solución inicial) se deduce que, como era de esperar, cuando se parte de una solución dada por un modelo simple se obtienen mejores resultados. El algoritmo de Mínimos Cuadrados es unidireccional. Así pues, si la solución dada está bien encaminada, los resultados obtenidos serán satisfactorios, como es el caso. Sin embargo en una de las comparaciones los resultados obtenidos partiendo de una solución genérica fueron sutilmente mejores que aquellos obtenidos desde la solución del modelo simple. Esto podría explicarse pensando que la dirección dada por la solución del modelo simple no es tan buena como la de la otra solución.

En los casos en los que se comparaban soluciones obtenidas tomando como criterio la intensidad de arranque, la mejoría al emplear la solución de un modelo más simple frente a la genérica, ha sido más notable. Por lo tanto, resulta recomendable partir de una solución dada por un modelo más simple, siempre y cuando dicha solución sea válida y no vaya en una dirección errónea.

En todos los casos analizados, el tiempo de cálculo fue mayor cuando se partía de la solución genérica. Este resultado también era esperable. Al partir de una solución más alejada del óptimo, ya sea local o global, al que tiende el algoritmo, se requieren más iteraciones para llegar a dicho óptimo, lo que se traduce en un mayor tiempo de cálculo.

Basándose en los resultados de errores, analizando los motivos de paro del proceso de cálculo o la proporción de motores que superan el número máximo de iteraciones o de evaluaciones de la función, el algoritmo proporciona muy buenos resultados, errores rms por debajo del 5%, y además es muy rápido, unos 0.2 segundos por motor. Sí es cierto, por otro lado, que el error cometido en el par de arranque cuando se simula bajo criterio de intensidad de arranque es inadmisibile. Sin embargo, esto era de esperar, pues no se tiene en cuenta esta magnitud en la función objetivo. Cuando se lleva a cabo la simulación bajo criterio de par de arranque, los errores cometidos en la intensidad de arranque son significativamente menores, siendo en algunos casos cercanos al umbral del 5%. Una explicación, más bien pragmática, a este hecho es que exista una mayor tolerancia en los datos acerca del par de arranque, de forma que cuando no se tiene en cuenta este dato en la función objetivo se comete un error mayor (criterio de intensidad de arranque).

Criterio	Error T_{st}	Error T_{max}	Error P_n	Error $\eta_{n,FL}$	Error $\cos\varphi_{n,FL}$	Error I_{st}
T_{st}	$-6.47 \cdot 10^{-7}$	-0.00129	0.01499	0.03201	-0.00183	0.24454
I_{st}	-0.28624	-0.00137	0.01516	0.03231	-0.00181	$3.82 \cdot 10^{-7}$

Tabla 6.1. Comparación de resultados según el criterio empleado

En algunos casos de los analizados no se produjo la convergencia. Varias pueden ser las razones de la falta de convergencia en esos casos. Como se comentó en el Capítulo 4: *Adquisición de datos*, los datos del fabricante están sujetos a tolerancias y además no se corresponden con una máquina en concreto, sino que son valores medios que provienen de ensayos que a su vez están sometidos a tolerancias. Debido a esta razón, es posible que el algoritmo no sea capaz de ajustar todos los datos con las ecuaciones. En los datos de los motores de baja tensión se permiten mayores tolerancias que en los de alta tensión, como muestra la Tabla 4.1, por lo que es más probable que puedan producirse una mayor tasa de falta de convergencia o niveles más elevados de error en motores de baja tensión, hecho que se estudia más adelante. Otra razón para los errores de convergencia es el método utilizado. Como se comentó anteriormente, los métodos basados en los mínimos cuadrados son sensibles a la solución inicial proporcionada.

Analizando esta característica se descubre que el porcentaje de motores para los que el algoritmo no ha convergido es el siguiente: entre el 12% y el 37% para el catálogo IEC de 9 datos, entre el 14% y el 20% para el catálogo de NEMA baja tensión con carcasa especial de protección de 11 datos, entre el 5% y el 12% para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos y entre el 5%, el 9% para el catálogo IEC de alto rendimiento y entre el 10% y el 20% para el catálogo NEMA de alta tensión. En general se aprecia distinta tendencia entre si se parte de una solución inicial u otra o si se emplea un criterio de análisis u otro. Los criterios tenidos en cuenta para la no convergencia han sido:

- Se ha superado el número máximo de iteraciones.
- Se ha superado el número máximo de evaluaciones de la función.
- Algún/ algunos de los parámetros son negativos.
- Algún/ algunos de los parámetros es 0 o prácticamente 0.

En cuanto a los parámetros obtenidos hay que resaltar que el algoritmo trabaja con valores absolutos. Es decir, las magnitudes físicas se determinan con los valores absolutos de los parámetros estimados por el algoritmo. Esto se ha hecho así porque este algoritmo no permite la introducción de restricciones de desigualdad. La forma de introducirlas sería implementando un sistema de ecuaciones diferentes con constantes, lo cuál complicaría el modelo demasiado, estando esto fuera del alcance de este trabajo. Así pues, este aspecto no se tendrá en cuenta en los análisis siguientes.

Como se ve, los resultados son dramáticos en cuanto a convergencia. Sin embargo, para aquellos motores para los que sí converge el algoritmo, los errores son muy bajos.

En contraposición a la bondad arrojada por algunos datos comentados anteriormente, observando en profundidad los resultados obtenidos por el algoritmo, se descubren valores anómalos tomados por la resistencia estática. Para un gran número de los motores analizados, ésta toma valores muy pequeños. Tan pequeños que en la práctica se traducen en ausencia de resistencia. En concreto el número de motores que presenta esta anomalía, según los resultados, ha llegado hasta el 50% de los motores en el catálogo IEC de 9 datos, en torno al 45% para el catálogo NEMA baja tensión con carcasa especial de protección de 11 datos, en torno al 10% para el catálogo NEMA de baja tensión de 12 datos y de igual forma para el catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos, para el catálogo NEMA alta tensión de 12 datos el porcentaje está entre el 4 y el 23%. En este análisis no se ha descubierto una tendencia diferente a resaltar entre simulaciones partiendo de la solución del modelo simple y aquellas que partían de la solución genérica. Tampoco se ha apreciado diferencia entre los dos criterios por e intensidad de arranque.

Además algunos motores presentan un valor de pérdidas mecánicas que se puede considerar cero, lo cuál no es posible. Las fracciones de motores que presentan este problema son: entre el 4 y el 8% para el catálogo IEC de 9 datos, entre el 0 y el 1% para el catálogo NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos, entre el 3 y el 7% para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, entre el 0 y el 0.8% para el catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos y entre el 18 y el 30% para el catálogo NEMA de alta tensión de 12 datos.

Por otro lado, es interesante resaltar que ninguno de los motores estudiados presenta estas dos anomalías de forma simultánea.

El porcentaje de motores que no han convergido y presentan valores no válidos de resistencia estática es: entre el 10 y el 21% para el catálogo IEC de 9 datos, entre el 10 y el 12.5% para el catálogo NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos, entre el 2 y el 5% para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, entre el 3 y el 4% para el catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos y entre el 2 y el 10% para el catálogo NEMA alta tensión de 12 datos.

Analizando lo mismo pero para motores con valores anómalos de pérdidas mecánicas, las proporciones son: entre el 0 y el 2% para el catálogo IEC de 9 datos, entre el 0 y el 1% para el catálogo NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos, entre el 0.2 y el 1% para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, entre el 0 y el 1% para el catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos y entre el 2 y el 6% para el catálogo NEMA alta tensión de 12 datos.

El principal problema que se extrae de estos análisis es que no siempre que se obtiene un valor erróneo de resistencia estática o de pérdidas mecánicas el algoritmo presenta

no convergencia. Es decir, que es posible que en ciertos casos, el algoritmo haga que estos parámetros tomen valores muy pequeños a fin de minimizar la función objetivo. Es necesario resaltar que este algoritmo basado en Mínimos Cuadrados no tiene restricciones. Por lo tanto no comprueba que las soluciones estén dentro de la región factible.

Además, resulta significativo que los mayores porcentajes de anomalías y de no convergencia se dan en el catálogo que proporciona menos información. Resulta muy complejo determinar correctamente todos los parámetros con una menor información para un algoritmo que no explora todo el espacio de posibles soluciones.

El objetivo de este trabajo es determinar el mejor método para determinar los parámetros internos del motor de inducción. Por ello, a partir de este punto se trabajará con aquellas características que produzcan mejores resultados. Por ahora se ha visto que para todos los catálogos, excepto NEMA alta tensión de 12 datos, se obtienen mejores resultados partiendo de una solución dada por un modelo más simple. Además, para casi todos los casos, los resultados obtenidos bajo el criterio de par de arranque son mejores que los obtenidos con el criterio de intensidad de arranque. Así pues, en futuros análisis se emplearán los resultados obtenidos bajo criterio de par de arranque y partiendo de una solución dada por un modelo más sencillo, llamados “análisis principales” en adelante.

Un paso previo a los siguientes análisis es eliminar aquellos motores que presentan anomalías o no convergencias en sus respectivos análisis principales. El número de motores que ha sido necesario eliminar de cada catálogo es: 220 del catálogo IEC de 9 datos, 39 del catálogo NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos, 71 del catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, 26 del catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos y 25 del catálogo NEMA alta tensión de 12 datos. Se ha pasado de trabajar con 1047 motores a hacerlo con 666. El número de motores se ha reducido casi a la mitad. La mayor reducción se aprecia en el catálogo de menor información disponible.

Al eliminar estos resultados anómalos, se ha mejorado muchísimo el resto de resultados, que estaban sesgados por la mala actuación de los resultados erróneos.

La principal conclusión de este análisis es que los datos proporcionados por los catálogos no conforman un conjunto válido de magnitudes externas en la mayoría de los casos. Es decir, en general, no existe ninguna máquina que tenga todos los valores de las magnitudes externas que el catálogo dice que tiene. Si el algoritmo no fuese válido para la resolución del problema, fallaría en todos los motores analizados. Sin embargo, ése no es el caso. De hecho, cuando dispone de una mayor cantidad de datos, su actuación general mejora. Así pues, si se dispone de escasa información, y además esta información no es de buena calidad, las probabilidades de que el algoritmo falle en la determinación de los parámetros internos aumentan bastante. La mayor abundancia de información solventa en cierta medida la mala calidad de ésta.

Así mismo, los tiempos medios de cálculo, el número medio de iteraciones y el número medio de evaluaciones de la función objetivo, se reduce enormemente al eliminar los resultados anómalos.

Para ilustrar este hecho, se presenta una tabla con los errores rms acumulados por catálogo antes y después de eliminar los resultados erróneos.

	Error T_{st}	Error T_{max}	Error P_n	Error $\eta_{n,FL}$	Error $\cos\varphi_{n,FL}$	Error I_{st}	Tiempo cálculo	Nº Iter.	Nº Eval.
1	0.00626	0.01698	0.00215	0.00437	0.00419	0.08593	0.44611	451.06	4313.19
1*	0.00012	0.00016	0.00155	0.00330	0.00046	0.07960	0.41120	25.53	280.25
2	0.00047	0.00657	0.01409	0.03141	0.00448	-	0.24680	182.35	2312.88
2*	$6.33 \cdot 10^{-5}$	0.00146	0.01362	0.03090	0.00205	-	0.04154	24.43	342.51
3	0.00016	0.00253	0.00864	0.0192	0.00246	0.20582	0.11950	84.89	1097.54
3*	$7.13 \cdot 10^{-5}$	0.0011	0.00890	0.01980	0.00265	0.2000	0.05522	35.02	475.75
4	0.00017	0.00251	0.01476	0.03409	0.00347	0.18686	0.10756	75.35	979.14
4*	$8.19 \cdot 10^{-5}$	0.00172	0.01454	0.03359	0.00357	0.18261	0.05465	34.57	469.89
5	0.01904	0.04661	0.02843	0.05921	0.02181	0.09271	0.20038	160.08	2034.51
5*	0.00109	0.02546	0.01307	0.03484	0.02751	0.10344	0.04248	27.86	385.22

Tabla 6.2. Comparación de errores antes y después de eliminar ejemplos erróneos.

En la Tabla 6.2, la columna izquierda hace referencia al catálogo, siendo:

1. IEC de 9 datos.
2. NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos.
3. NEMA baja tensión de 12 datos.
4. IEC alto rendimiento de 12 datos.
5. NEMA alta tensión de 12 datos.

El “*” hace referencia a los resultados tras la eliminación de los erróneos.

A continuación, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de cada una de las magnitudes externas calculadas, para cada uno de los parámetros internos de la máquina

y las pérdidas mecánicas. Es muy importante para identificar los parámetros que tienen un mayor impacto en el funcionamiento del motor. El proceso de fabricación de los motores no es 100% constante en cuanto a los valores de los parámetros internos y por lo tanto habrá importantes variaciones entre los valores verdaderos y los dados por el fabricante en el catálogo [30]. La sensibilidad de una variable de funcionamiento Y (par de arranque, par máximo, etcétera) respecto a un parámetro β , es la derivada parcial de Y respecto a β . La expresión de la sensibilidad normalizada o factor de sensibilidad es:

$$\delta_{Y,\beta} = \frac{\beta}{Y} \cdot \frac{\delta Y}{\delta \beta} \quad (6.2)$$

Los resultados muestran los factores de sensibilidad para un motor de cada catálogo elegido como ejemplo.

En todos los análisis de sensibilidad se ha introducido la potencia mecánica como parámetro.

Del catálogo IEC de alta tensión de 9 datos se ha tomado un motor de 180 kW, 6000 V y 8 polos; para el catálogo NEMA baja tensión con carcasa de protección especial un motor de 30 Hp, 575 V y 4 polos; para el catálogo NEMA de baja tensión de 12 datos se ha elegido un motor de 20 Hp, 575 V y 2 polos; para el catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos se ha tomado un motor de 18.5 kW, 400 V y 12 polos; para el catálogo NEMA de alta/baja tensión de 12 datos se ha elegido un motor 400 Hp, 4000 V y 4 polos.

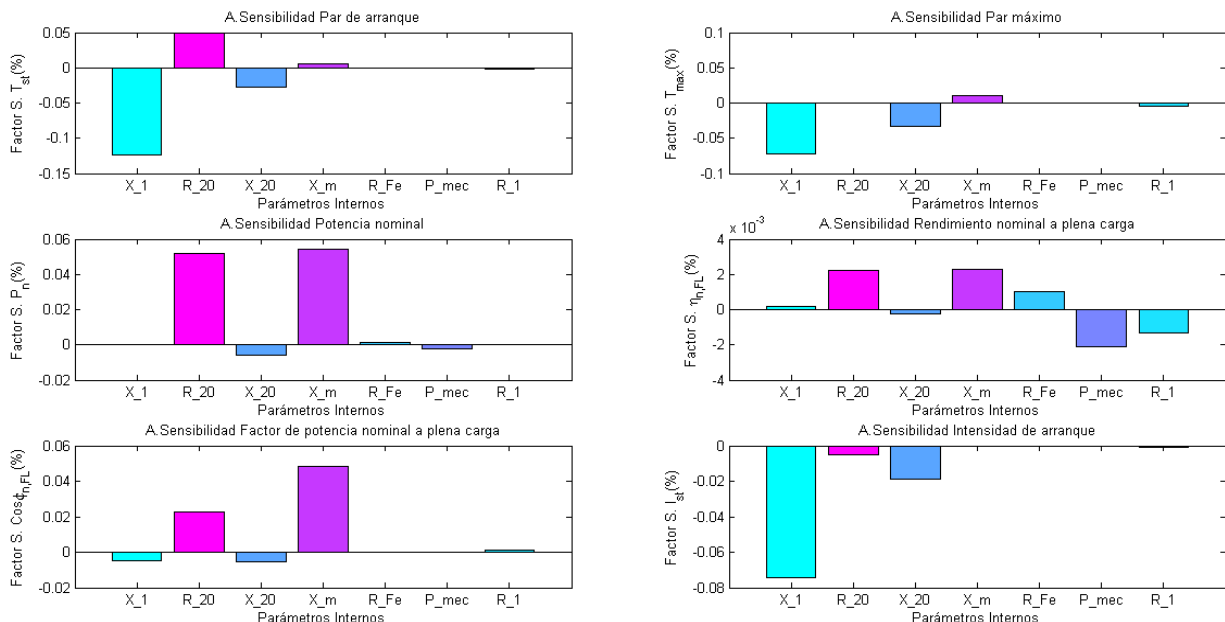


Figura 6.1. Análisis de sensibilidad para catálogo IEC alta tensión de 9 datos.

El resultado más llamativo es la escasa dependencia de las magnitudes con la resistencia estática (Figura 6.1). Así pues, el hecho de que el algoritmo calcule un valor muy

reducido de ésta no afectará a las magnitudes externas. Esto también se puede interpretar como que no se cometería un gran error al establecer algún tipo de relación entre la resistencia estatórica y otro parámetro, fijando el primero como un dato conocido y no como una variable. Esto se ha probado con éxito en otros trabajos.

Como era de esperar, las pérdidas mecánicas sólo influyen en el rendimiento y en la potencia útil en el eje, pero muy ligeramente.

En la Figura 6.2 se aprecia una mayor influencia de la reactancia estatórica así como de la resistencia. Hay una disminución de la sensibilidad con la reactancia del estator.

En la Figura 6.3 se aprecia la misma tendencia descrita en la Figura 6.2, acerca de motores de baja tensión.

En general se observa que una variación de la resistencia del hierro tiene poca importancia. Esto se debe a que al tomar valores tan grandes, las pérdidas en el hierro serán pequeñas, por lo que una disminución de ésta afectará poco al resto de magnitudes.

A la vista de los resultados, cabría pensar que un modelo en el que no se incluya la resistencia del hierro no proporcionará resultados muy alejados de los dados por un modelo completo. Para poder generalizar esta afirmación sin temor de caer en errores importantes es necesaria una mayor investigación.

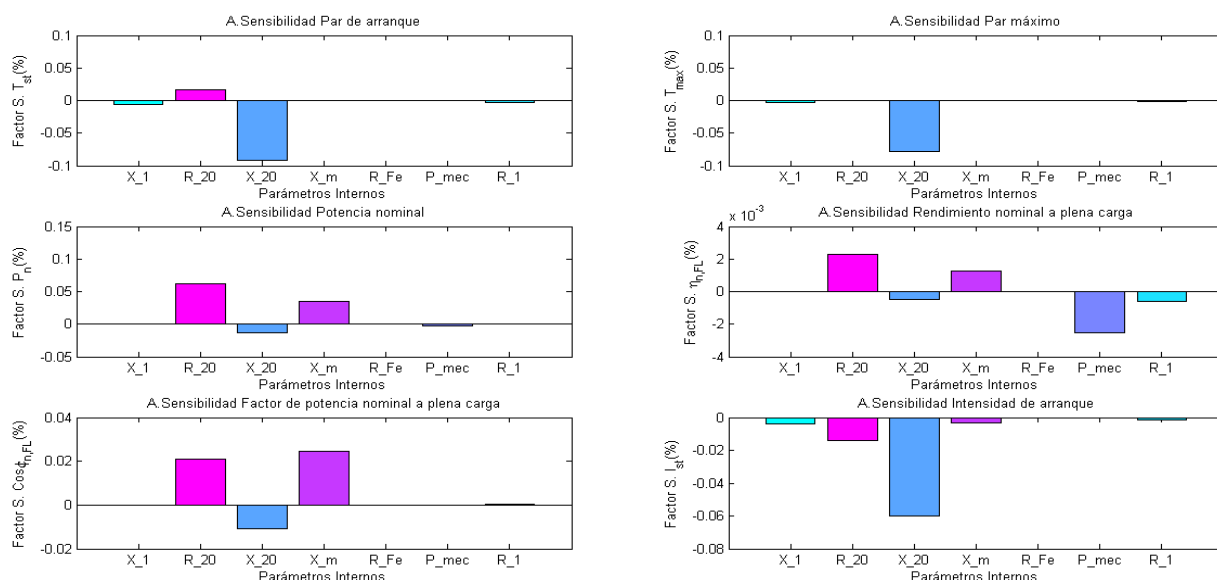


Figura 6.2. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA baja tensión carcasa de protección especial de 11 datos

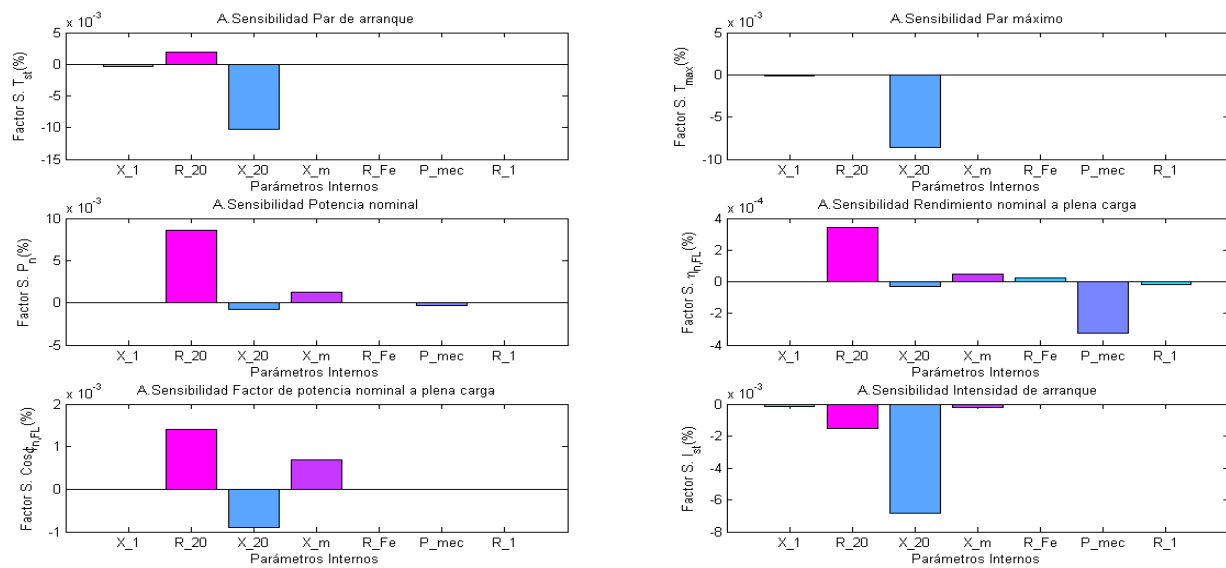


Figura 6.3. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA baja tensión de 12 datos

También es importante resaltar las diferencias entre los factores de sensibilidad obtenidos para los motores IEC y NEMA de alta tensión, siendo estos últimos los más sensibles.

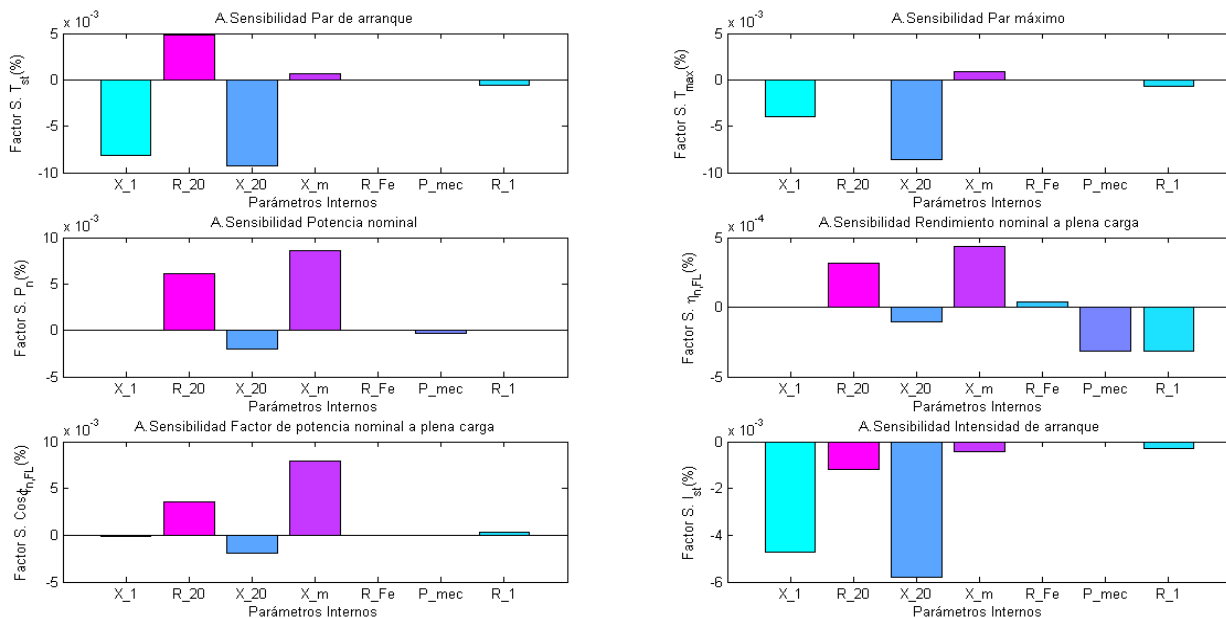


Figura 6.4. Análisis de sensibilidad para catálogo IEC de alto rendimiento de 12 datos

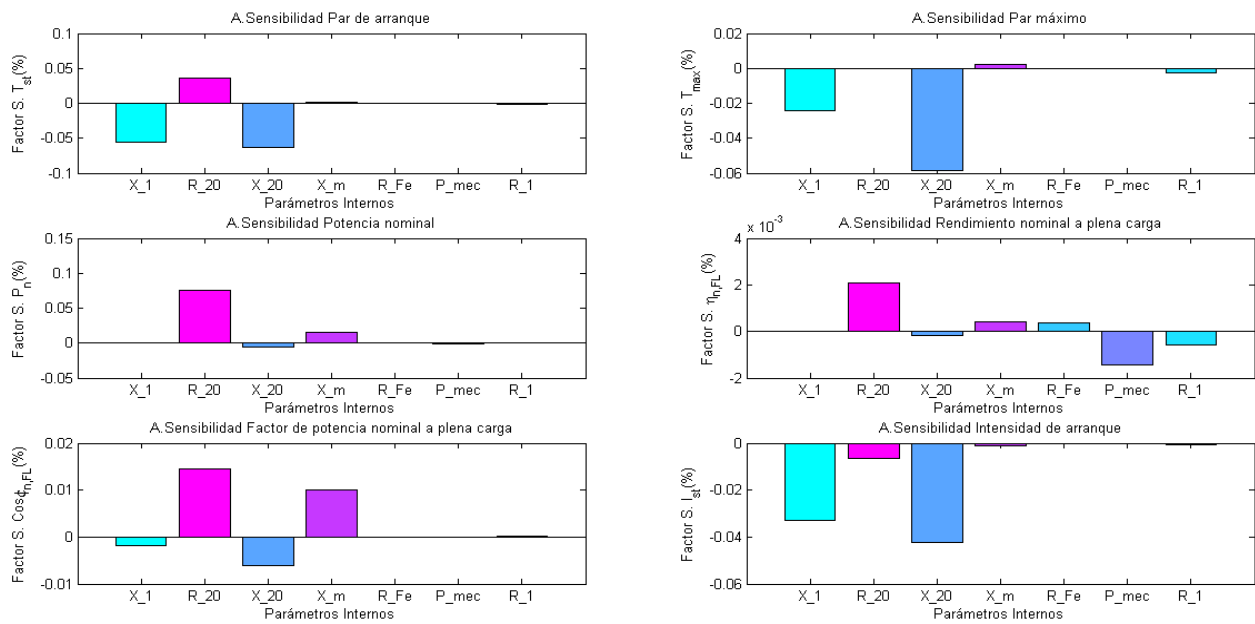


Figura 6.5. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA alta/baja tensión de 12 datos

Para poder comparar correctamente la actuación del algoritmo al tratar de obtener los parámetros internos de motores de alta y de baja tensión, es necesario contar con un catálogo que proporcione la misma información para ambos tipos de motores. Por este motivo, no sería correcto comparar los resultados obtenidos con el catálogo IEC alta tensión de 9 datos, con el catálogo IEC alto rendimiento (baja tensión) de 12 datos, puesto que no se cuenta con la misma información.

El catálogo que proporciona dicha información es el catálogo NEMA alta tensión. A pesar del nombre dado a lo largo del trabajo, este catálogo contiene información sobre motores de alta y baja tensión [35]. El inconveniente proviene del escaso número de motores disponibles. Tras el proceso de eliminación de resultados erróneos, sólo se dispone en este catálogo de 19 motores de los 47 originales. De estos 19 sólo 4 son de baja tensión. Originalmente había 17 motores de baja tensión y 30 de alta tensión. En un principio se tenía un 36% y un 64% respectivamente. Tras la eliminación se tiene un 21% de motores de baja tensión y un 79% de alta tensión. Esto es así porque ya en un principio había más motores de alta que de baja tensión. Si se observa detenidamente las cifras, se ve que el número de motores de baja y de alta eliminados es casi el mismo, 13 y 15 respectivamente. Con este resultado, no se podría afirmar que el algoritmo proporcione un mayor número de resultados erróneos en motores de alta tensión o en los de baja.

A continuación se muestra una tabla que contiene los errores medios para motores de alta y baja tensión del catálogo NEMA de alta tensión de 12 datos.

	Error T_{st}	Error T_{max}	Error P_n	Error $\eta_{n,FL}$	Error $\cos\varphi_{n,FL}$	Error I_{st}	Tiempo cálculo	Nº Iter.	Nº Eval.
Baja	$2,78 \cdot 10^{-6}$	0.00044	0.0030 5	0.0063 4	0.0006 8	0.03522	0.05379	37.75	508.5
Alta	0.00121	0.02815	0.0143 7	0.0384 1	0.0304 1	0.11314	0.03997	25.67	357.83
Baja*	$7,13 \cdot 10^{-6}$	0,00118	0,0089 0	0,0198 0	0,0026 5	0,20003	0,05522	35,02	475,75

Tabla 6.3. Errores RMS medios de motores NEMA alta tensión de 12 datos

Como se ve en la Tabla 6.3, el algoritmo obtiene mejores resultados en motores de baja tensión. Si bien, estos resultados corresponden únicamente a 4 motores. Sin embargo, se requiere un número mayor de iteraciones y de evaluaciones, y por tanto de mayor tiempo que para los motores de alta tensión.

Es necesario resaltar que para que los resultados fuesen más concluyentes habría que estudiar un mayor número de motores de alta y de baja tensión, del mismo tipo (NEMA o IEC) y calculados empleando el mismo número de variables.

La última línea de la Tabla 6.3, llamada “Baja*”, corresponde a los errores medios de 315 motores del catálogo NEMA baja tensión de 12 datos. Esta fila se ha añadido para ilustrar mejor los resultados. Se aprecia la misma tendencia comentada anteriormente. Si bien en la intensidad de arranque se aprecia un error mayor, aunque no hay que olvidar que estos resultados corresponden a los obtenidos bajo el criterio de par de arranque. Nuevamente, el número de iteraciones, evaluaciones y, por tanto, el tiempo son mayores para los motores de baja tensión.

También es necesario recordar, que estos resultados dependen fundamentalmente de la veracidad de los datos proporcionados por los fabricantes en los catálogos. Es por esto, por lo que para poder considerar los resultados como totalmente concluyente, se requeriría de datos garantizados, correspondientes a máquinas reales.

Otras comparaciones lógicas que pueden realizarse para probar el algoritmo son entre los dos tipos testados: NEMA e IEC; o entre motores de alto rendimiento (IE3 idéntico a NEMA Premium efficiency) y rendimiento estándar (IE2 o Eff2).

Nuevamente una comparación correcta debería estar basada en resultados obtenidos con la misma información. Sin embargo los datos disponibles IEC 9 datos e IEC alto rendimiento 12 datos, no se corresponden con los de tipo NEMA. De forma que el análisis se llevará a cabo con la información disponible. Para que el análisis sea más riguroso. Se realiza una subdivisión en alta y baja tensión.

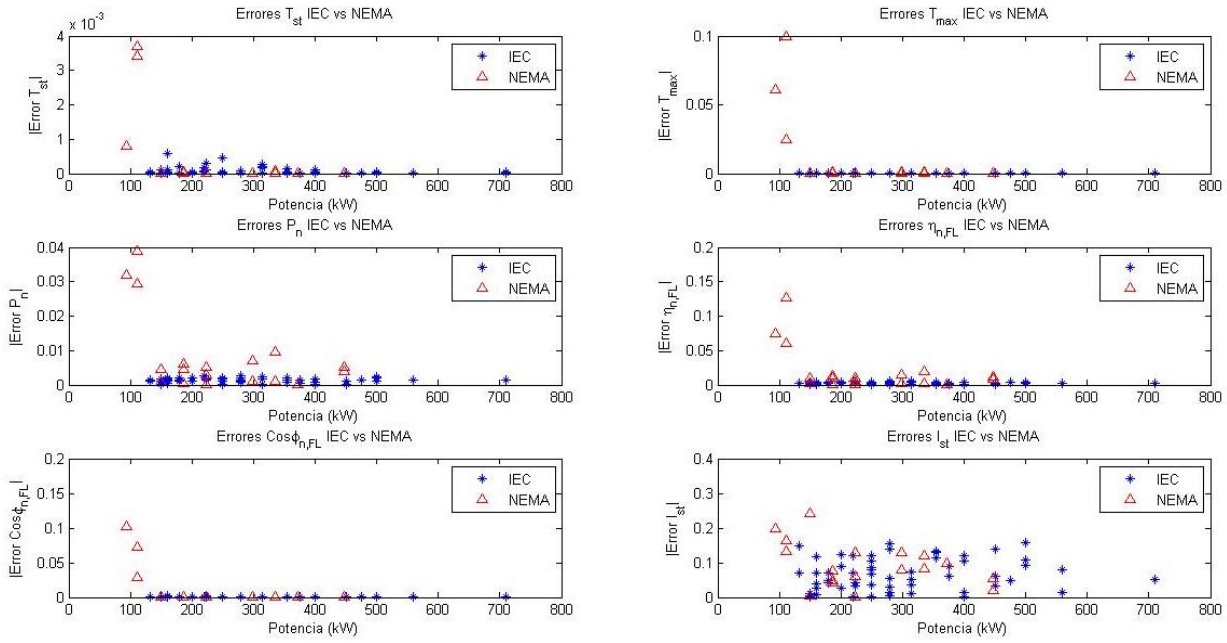


Figura 6.6. Comparación de errores entre motores de tipo IEC y NEMA de alta tensión

Salvo en tres motores de tipo NEMA, para ambos tipos el algoritmo obtiene resultados similares, bastante buenos. Observando todas las gráficas se ve que son los mismos tres motores los que se salen de la tendencia general.

A la vista de los resultados, los errores cometidos con el catálogo IEC son menores. Esto, por otro lado, era de esperar, ya que el catálogo IEC es de alto rendimiento.

Analizando los ratios T_{st}/T_{max} para comprobar si efectivamente los motores de tipo

NEMA son de tipo A o B, se ha visto que hay algunos motores que sobrepasan estos ratios límite. Esto quiere decir que si son motores NEMA de tipo C tiene un par de arranque elevado y, por lo tanto serán mejor definidos empleando un modelo de doble jaula. Este hecho también resulta importante con aquellos motores que teniendo un ratio dentro de los límites de la norma, presentan un elevado par de arranque.

En cuanto a baja tensión, se ve que el comportamiento de ambos tipos de motores es muy parecido. Salvo para la intensidad de arranque, se obtienen muy buenos resultados. Esto es debido a que los errores mostrados pertenecen a parámetros calculados bajo criterio de par de arranque.

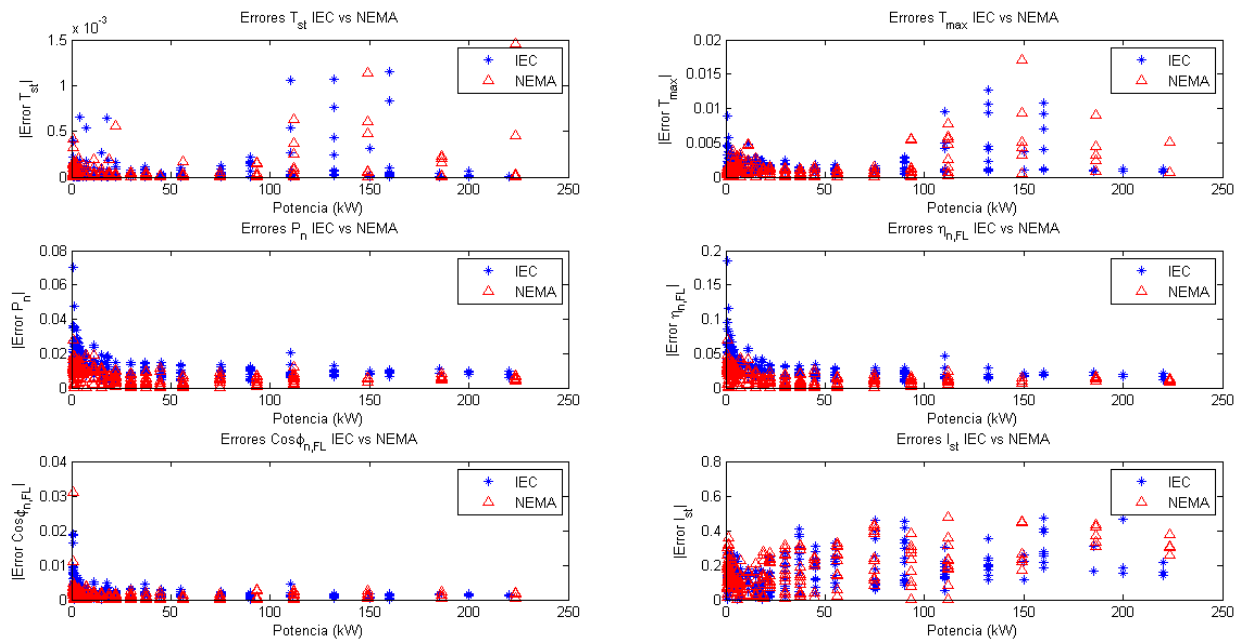


Figura 6.7. Comparación de errores entre motores de tipo IEC y NEMA de baja tensión

En la Figura 6.8 se muestran los errores cometidos al estimar el par máximo frente a la potencia de cada motor para cada catálogo empleado.

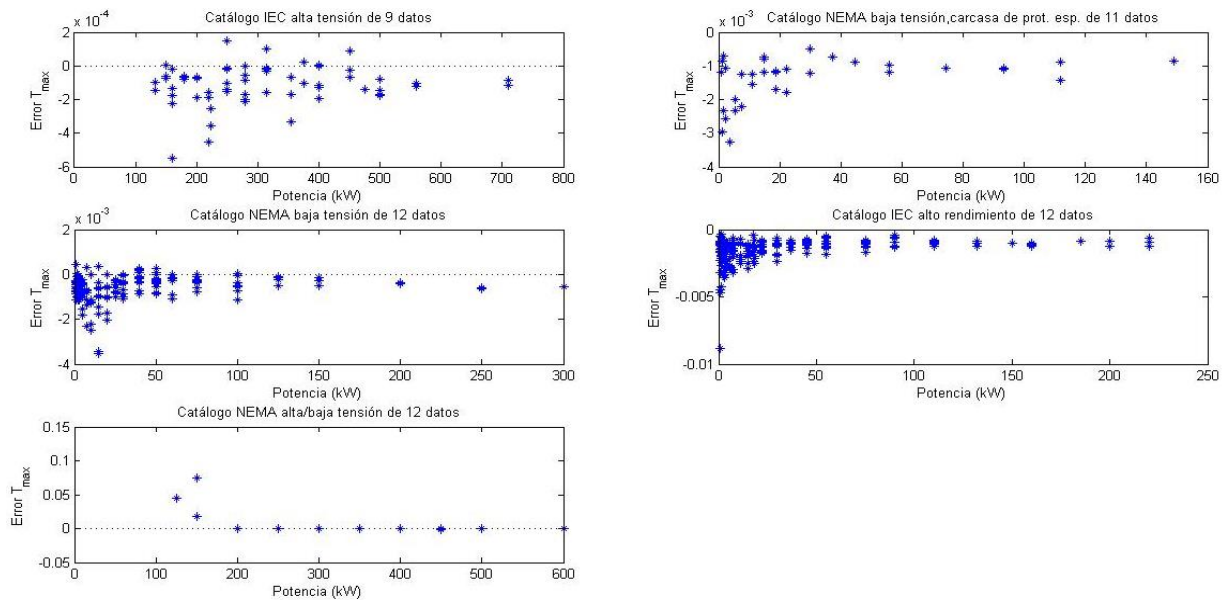


Figura 6.8. Errores en el par máximo ordenados por potencia para cada catálogo

En general la predicción de esta magnitud es bastante buena. Si bien, en la mayoría de las ocasiones el valor calculado es menor que el dado en el catálogo.

En la siguiente figura (Figura 6.9), se muestra la característica Par normalizado-velocidad, estando la velocidad representada mediante el deslizamiento. Esta característica pertenece a un motor del catálogo IEC alta tensión de 9 datos, elegido aleatoriamente. La normalización del par se realiza con el par máximo ya que el par nominal no es un dato disponible en todos los catálogos. Si bien su cálculo es sencillo, dada la potencia nominal, se ha preferido emplear los datos de catálogo. Además facilita la comparación gráfica entre el par máximo dado por el catálogo y el calculado.

En esta figura, se han representado dos curvas distintas. En una se han empleado los parámetros ajustados con el deslizamiento, mientras que en la otra, se han empleado parámetros constantes.

El punto a, representado mediante un triángulo, marca el punto de par máximo calculado a partir de la fórmula (2.22), que está basada en el cálculo del deslizamiento de par máximo, dado por (2.6). A partir de este punto ambas curvas tienen el mismo comportamiento. Sin embargo, para deslizamientos superiores al de par máximo, las dos curvas se comportan de formas muy diferentes. Resulta evidente que la curva con parámetros ajustados con el deslizamiento presenta una forma más acorde a la teoría de máquinas de inducción.

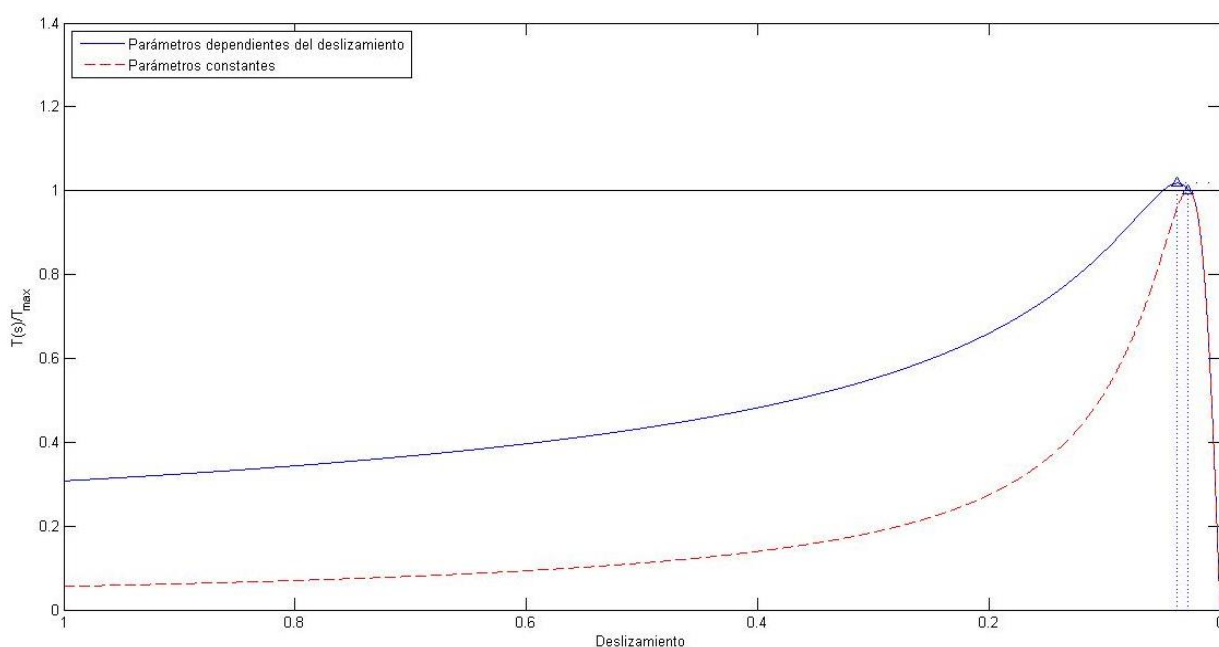


Figura 6.9. Característica Par normalizado-Deslizamiento

Como puede apreciarse en la Figura 6.9, el punto de par máximo calculado es muy cercano, casi atravesado, a la línea que marca el valor de par normalizado igual a 1. Es decir, el par máximo calculado es próximo al valor dado por el catálogo. Este hecho confirma lo mostrado en la Figura 6.8. Para el resto de catálogos se han obtenido curvas más o menos similares, pero prácticamente todas con el mismo ajuste entre el par máximo calculado y el valor dado por el catálogo.

Ahora bien, a pesar de estas bondades, resultado muy llamativa, la diferencia entre el verdadero máximo de la curva de parámetros ajustados con el deslizamiento y el punto máximo calculado. En otras palabras, la diferencia entre el punto a y b. Cuando se calcula la curva empleando los parámetros proporcionados por el algoritmo, se obtiene un deslizamiento de par máximo y un valor de par máximo, diferentes a los obtenidos al emplear la fórmula (2.22) basada en la fórmula (2.6). Este hecho es indicativo de la necesidad de corregir el cálculo del punto de par máximo.

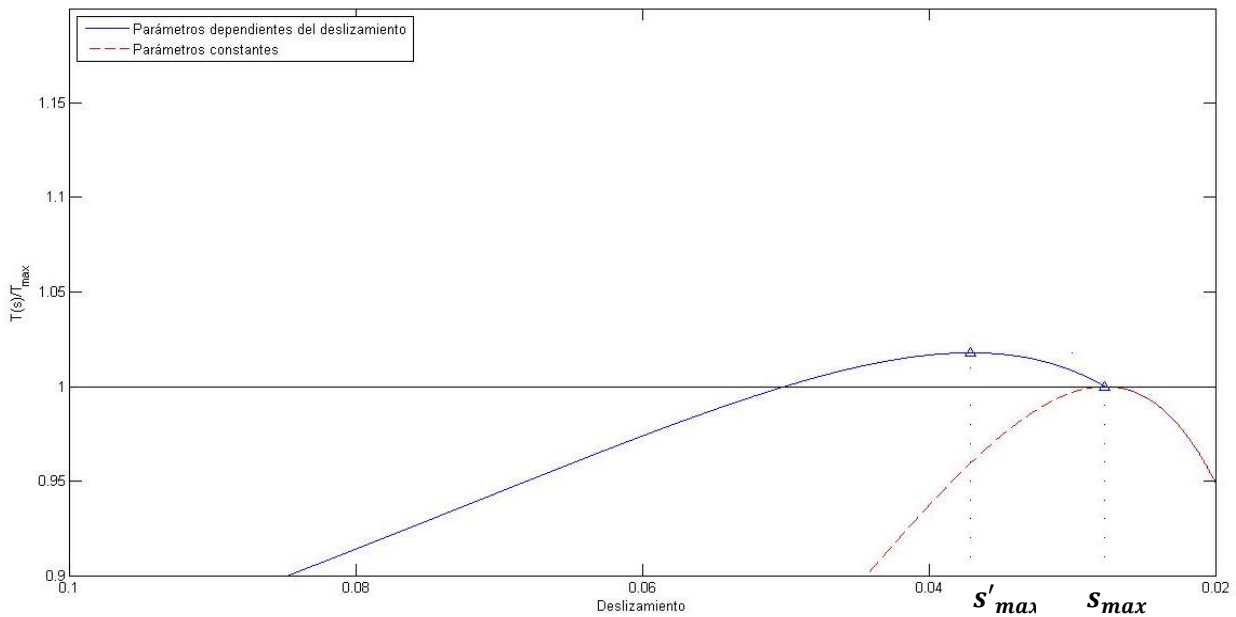


Figura 6.10. Detalle de la característica Par normalizado-Deslizamiento

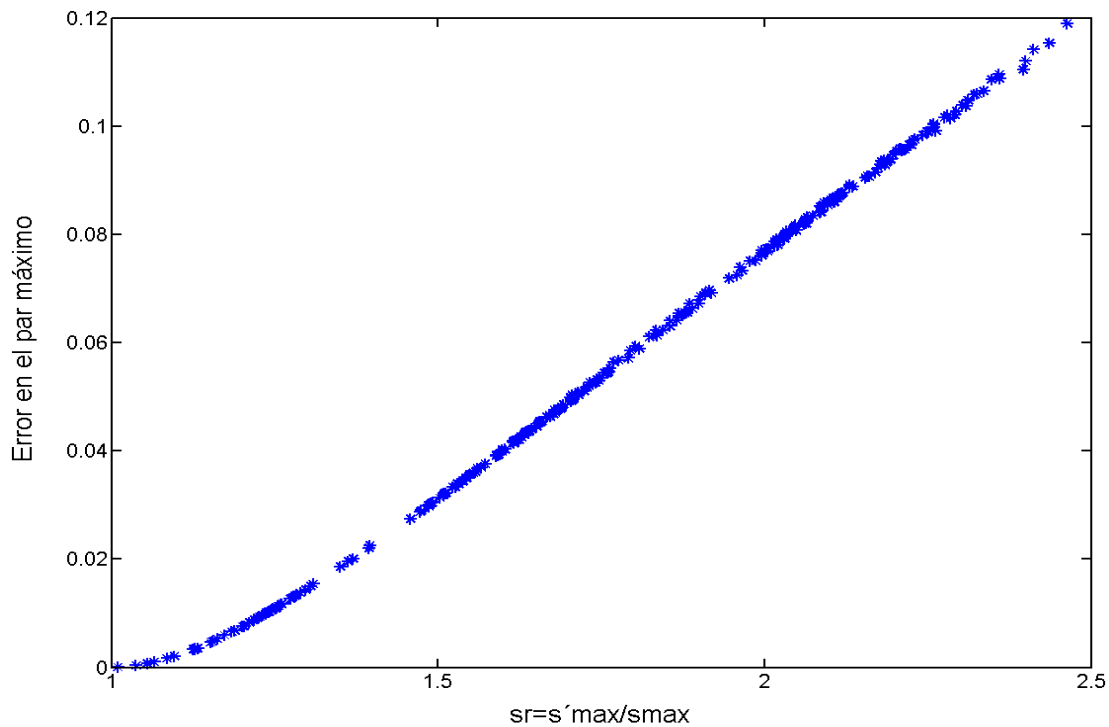


Figura 6.11. Característica Error en par máximo frente a ratio s_r para modelos simplificados

En otros trabajos en los que se emplean modelos simplificados del motor de inducción, resuelven este problema mediante una aproximación empírica. De la figura 6.10, se deduce que el error en el par máximo depende de la diferencia entre los deslizamientos máximos s_{max} y s'_{max} o la relación entre ambos $s_r = \frac{s'_{max}}{s_{max}}$. Para los modelos más simplificados, cuando se representa el error de par máximo frente al ratio s_r se ve que la relación es prácticamente lineal. Sin embargo, el valor de s_r no se conoce previamente, y por lo tanto no se puede emplear en el proceso iterativo de *fsolve*. En esos trabajos se obtiene una relación basada en esta relación lineal que consigue mejorar enormemente el error en el par máximo calculado.

Volviendo al modelo completo empleado en este trabajo, además del desconocimiento previo del ratio s_r , cuando se representa el error de par máximo frente a dicho ratio, no se obtiene una curva que presente una relación prácticamente lineal. Por el contrario, se obtienen una serie de puntos, que de tener alguna relación entre sí, ésta es muy compleja. En la siguiente figura, se muestran las curvas para cada uno de los catálogos empleados en este trabajo.

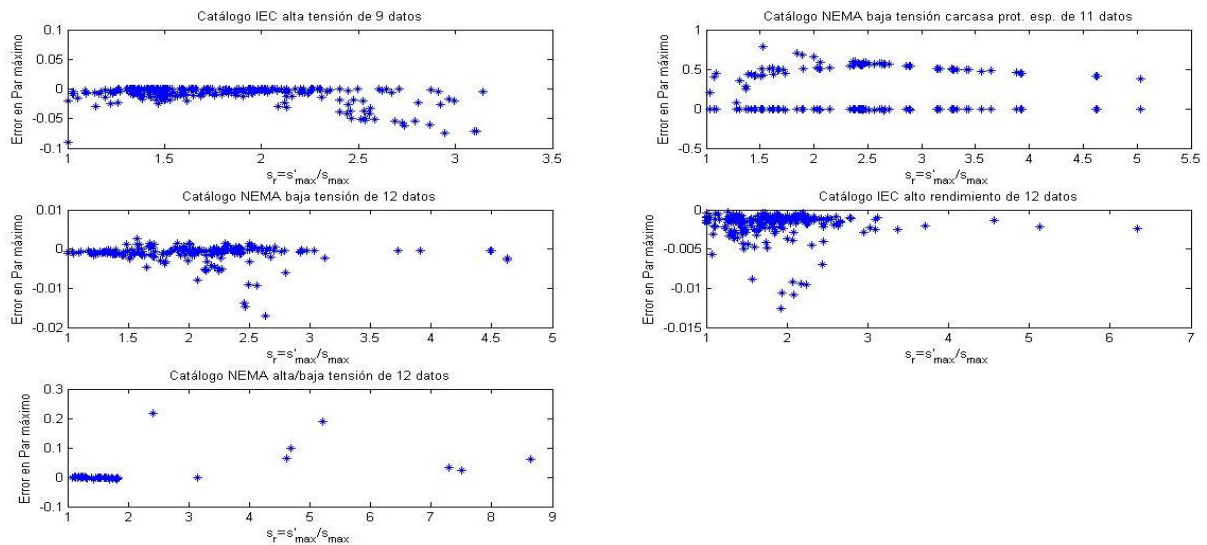


Figura 6.12. Característica Error en par máximo frente a ratio s_r para modelos completos

En la Figura 6.12 se han representado todos los motores de los catálogos, incluso aquellos que contienen resultados erróneos en algunos de los parámetros. Como muestran las figuras, no existe una relación clara a simple vista. De los catálogos 1, 3 y 4, podría deducirse una relación aproximadamente lineal, casi constante, si desprecian algunos motores que se salen de esta tendencia. Sin embargo esta teoría pierde fuerza al observar los resultados de los otros dos catálogos. Así pues, para la determinación de una relación que permite modificar el cálculo del par máximo se requiere un estudio mucho más profundo, empleando un mayor número de motores como muestras, de forma que se pueda obtener una correcta relación, válida para cualquier motor. Este estudio, escapa al alcance de este proyecto y es por este motivo por el que no se ha realizado.

Además de obtener una relación empírica entre estos puntos que proporcione una solución, se podría plantear incluir un recálculo dentro del algoritmo. Esta aproximación consiste en para cada conjunto de parámetros dados al algoritmo, empleando una función auxiliar, calcular la curva completa de par frente al deslizamiento. De esta forma se puede determinar el verdadero deslizamiento de par máximo, así como el valor de éste, para dicho conjunto de parámetros. Esta hipótesis sí ha sido desarrollada. Sin embargo los resultados obtenidos no han sido satisfactorios. El tiempo de cálculo se incrementa más de 1000 veces. Además se obtienen mayores errores en el resto de magnitudes externas calculadas, así como en el propio par máximo.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros y los errores de un motor de cada catálogo.

Motor	1	2	3	4	5
Tipo	IEC	NEMA	NEMA	IEC	NEMA
Potencia [kW]	132	14.91	111.86	200	223.71
Tensión [V]	3300	460	575	690	4000
Frecuencia [Hz]	50	60	60	50	60
Nº Polos	6	2	4	4	2
R_1 [Ω]	0.65739	0.32069	0.03433	0.01702	1.17557
R_1 [pu]	0.00796	0.0226	0.01161	0.00715	0.01643
X_1 [Ω]	3.70103	0.16276	0.10681	0.10693	9.56466
X_1 [pu]	0.04486	0.01147	0.03613	0.04492	0.13373
R_{20} [Ω]	0.86006	0.20398	0.01456	0.01382	0.43381
R_{20} [pu]	0.01042	0.01437	0.00492	0.0058	0.00606
X_{20} [Ω]	11.876	1.86425	0.41288	0.314	1.781
X_{20} [pu]	0.14395	0.13139	0.13968	0.1319	0.0249
R_{Fe} [Ω]	23335.919	4726.889	3767.75	2289.447	2538.56
R_{Fe} [pu]	282.859	333.1608	1274.681	961.75	35.493
X_m [Ω]	143.547	45.4007	7.91543	6.19	290.621
X_m [pu]	1.73997	3.199	2.6779	2.60032	4.06342
P_{mec} [W]	3248.069	550.555	1511.619	3347.785	18.683
P_{mec} [pu]	0.0246	0.03691	0.01351	0.01673	$8,35 \cdot 10^{-5}$
$s_{75\%}$	0.0088	0.0121	0.004	0.0047	0.005
$s_{50\%}$	-	0.0078	0.0026	0.003	0.0033
s_{max}	-	-	-	-	-
Error T_{st}	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$3,87 \cdot 10^{-6}$	$-1,26 \cdot 10^{-5}$	$-1,20 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-7}$
Error T_{max}	-0.00014	-0.00079	-0.00018	-0.00086	$-2,97 \cdot 10^{-6}$
Error P_n	0.00113	0.00873	0.00163	0.00787	$-8,72 \cdot 10^{-5}$
Error $\eta_{n,FL}$	0.00242	0.01799	0.00323	0.01632	-0.00016
Error $\cos\varphi_{n,FL}$	-0.00011	-0.00141	-0.00051	-0.00159	0.00016
Error I_{st}	0,07041	-	0.22581	0,18383	-0.13053

Tabla 6.4. Ejemplos de resultados obtenidos según el catálogo

La Tabla 6.5 muestra la evolución del algoritmo iterativo para un motor IEC de alto rendimiento de 750 W, 690 V, 6 polos. Aproximadamente han sido necesarias 30 iteraciones por término medio y unas 400 evaluaciones de la función. El algoritmo converge rápidamente adaptando el tamaño del paso en cada iteración. Para cada iteración se muestra el número de iteración, el número de evaluaciones de la función

objetivo, el residuo del punto actual entre otros datos. El dato de *optimalidad de primer orden* es una medida de cómo de cerca está la solución del óptimo. *Lambda* es el término que determina la magnitud y la dirección de búsqueda en el método de Levenberg-Marquardt. La norma del paso indica el tamaño del desplazamiento en una iteración.

Iteración	Contador de funciones	Residuo	Optimalidad de primer orden	Lambda	Norma del paso
0	12	0.201482	2.09	0.01	
1	25	0.071488	0.186	0.1	35015.8
2	37	0.00665821	0.0823	0.01	94925.4
3	49	0.00372474	0.242	0.001	141346
4	62	0.00148746	0.00668	0.01	16.1172
5	74	0.00101661	0.000886	0.001	7.22256
6	89	0.00101439	0.0121	1	1205.85
7	101	0.00101417	0.00303	0.1	5342.03
8	115	0.0010139	0.00264	10	603.738
9	127	0.00101364	0.00405	1	0.0108958
10	139	0.00101186	0.00629	0.1	0.0729117
11	152	0.00101163	0.0207	1	3088.71
12	164	0.00100977	0.0132	0.1	783.364
13	177	0.00100873	0.00721	1	947.558
14	189	0.00100803	0.0065	0.1	11768.1
15	203	0.00100781	0.0058	10	821.985
16	215	0.00100767	0.00518	1	13966.7
17	227	0.00100631	0.00507	0.1	0.0680262
18	239	0.000998992	0.00268	0.01	0.563851
19	251	0.000974204	0.00027	0.001	2.74785
20	263	0.000960536	0.00259	0.0001	5.23033
21	276	0.000959135	0.00191	0.001	0.776469
22	288	0.000958017	0.000953	0.0001	1.44431
23	301	0.000957954	0.00153	0.001	0.987173
24	313	0.000957108	0.00069	0.0001	1.23652
25	325	0.000956717	0.00501	1e-05	2.81483
26	343	0.000956702	0.00479	10	209.08
27	366	0.000956702	0.00479	1e+12	1.84176e-07

Tabla 6.5. Datos de la evolución del proceso iterativo del algoritmo para un motor

En la siguiente figura se muestra la evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones, para el mismo motor. Se ve claramente cómo el algoritmo trabaja de forma unidireccional. A partir de la quinta iteración los ajustes que realiza son casi iguales en las siguientes iteraciones. Esta gráfica evidencia la principal virtud de este algoritmo: si converge hacia una solución buena, lo hace muy rápidamente.

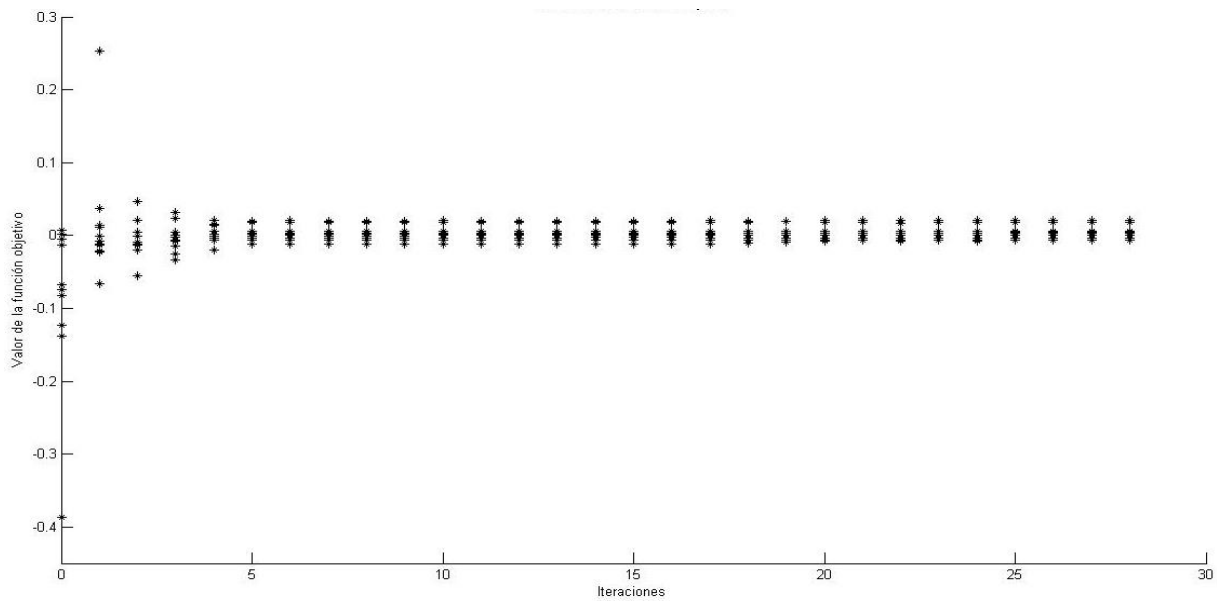


Figura 6.13. Evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones

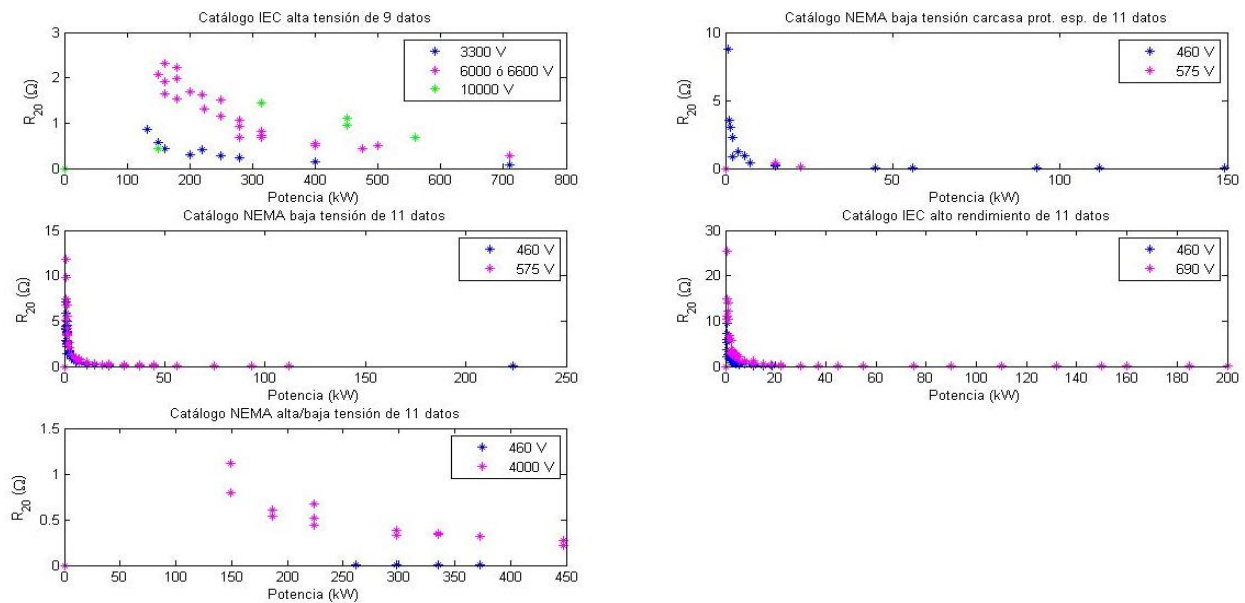


Figura 6.14. Distribución de R_{20} por potencia y tensión para cada catálogo

Otra forma de analizar la actuación del algoritmo en el cálculo de los parámetros es estudiar el sentido físico de éstos. Así pues, a continuación se presentan varias figuras que muestran los valores de los distintos parámetros según su nivel de potencia y de tensión.

La tendencia que muestra R_{20} (Figura 6.14) es la misma para todos los catálogos. A medida que aumenta la potencia su nivel disminuye. Esto es correcto físicamente ya que al aumentar la potencia aumenta la intensidad que circula por estator y rotor y con ellos se necesitan conductores de mayor sección, lo cual hace que la resistencia sea menor. Si no fuese así, el nivel de pérdidas por efecto Joule sería, seguramente, inadmisibles, no pudiendo alcanzarse los rendimientos deseados ni la vida útil que este tipo de motores requieren. Esto mismo queda reflejado con la evolución conforme al nivel de tensión. Para una misma potencia la resistencia será mayor si el nivel de tensión es mayor. A igual nivel de potencia, si la tensión es mayor, la intensidad será menor, y por tanto se requiere un conductor de menor sección, mayor resistencia, para un mismo nivel de pérdidas por efecto Joule.

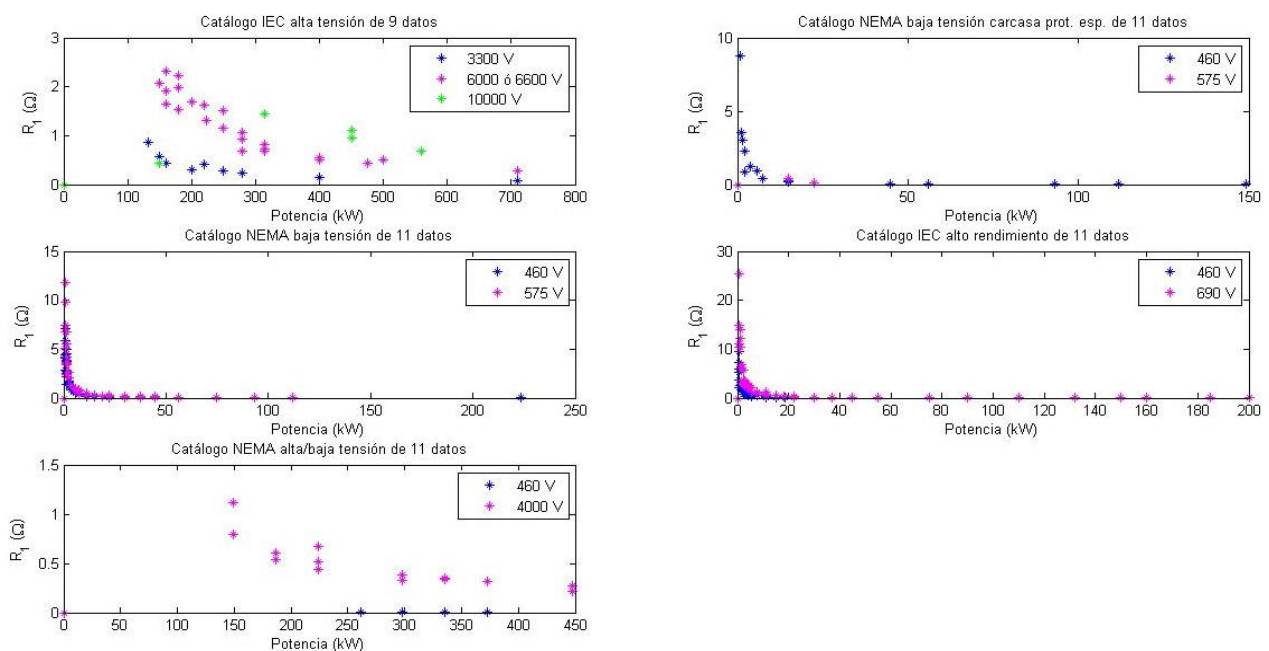


Figura 6.15. Distribución de R_1 por potencia y tensión para cada catálogo

En la Figura 6.15 se muestra la distribución de la resistencia estática. Para este parámetro es de aplicación todo lo explicado para la resistencia del rotor. Como prueba de esta afirmación, se ve que todas las gráficas tienen la misma forma que las correspondientes de la resistencia del rotor.

A continuación se presenta la distribución de la reactancia del estator. La forma de las curvas es, nuevamente, hiperbólica. Algunos autores han aprovechado este hecho para ajustar los valores mediante una curvas de regresión y poder posteriormente obtener de forma rápida y aproximada los valores típicos de los parámetros del modelo de circuito

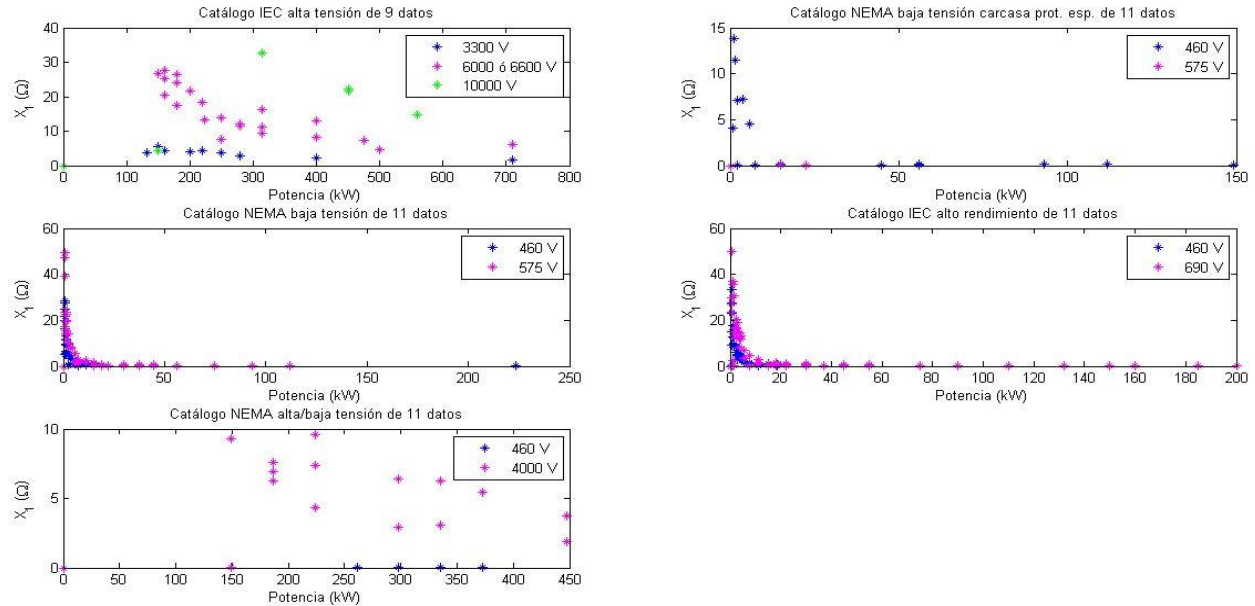


Figura 6.16. Distribución de X_1 por potencia y tensión para cada catálogo

de un motor en función de su potencia y su tensión [6], [4]. Atendiendo a criterios energéticos, la reactancia del estator está relacionada con la potencia reactiva de pérdidas en el estator. De esta forma aplicando el mismo razonamiento que para las

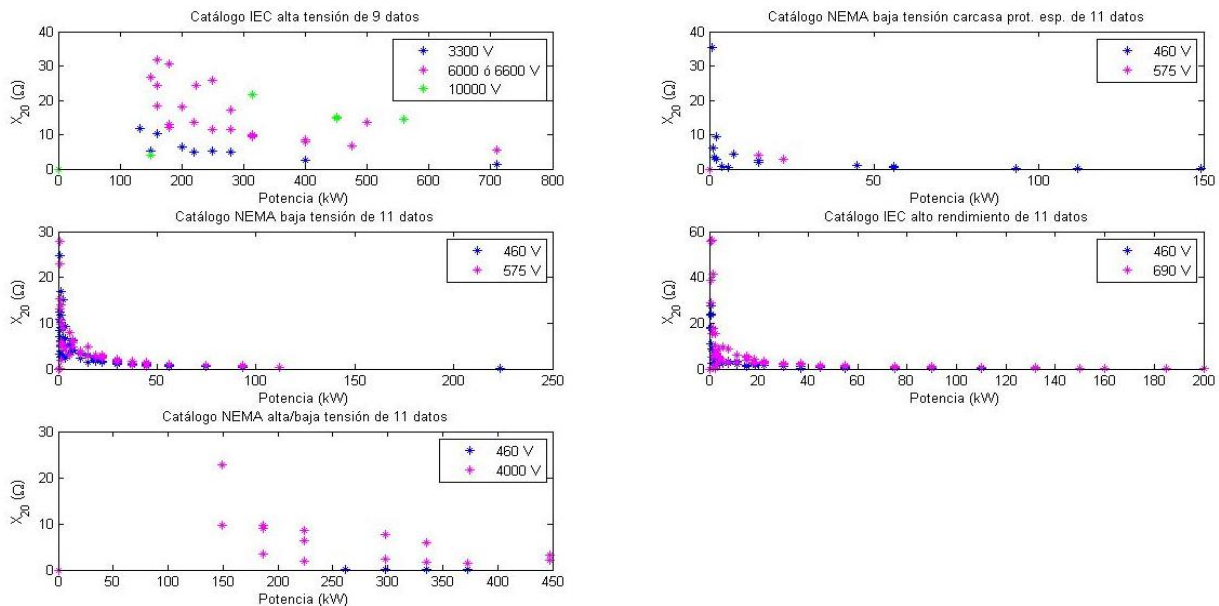


Figura 6.17. Distribución de X_{20} por potencia y tensión para cada catálogo

resistencias se ve que los valores obtenidos son correctos físicamente.

En la Figura 6.17 se muestran las distribuciones de la reactancia de dispersión del rotor. Aplicando los mismos conceptos energéticos desarrollados por el momento, se ve claramente que los puntos representados tiene sentido físico.

En la Figura 6.18 se presenta la resistencia del hierro. Este parámetro no tiene una distribución tan clara como el resto de parámetros estudiados hasta el momento. La resistencia del hierro modela las pérdidas por corrientes parásitas, las cuales dependen de la sección de cada lámina del núcleo del motor, del tipo de acero, así como del tratamiento a que haya sido sometido. Por este motivo, cabría esperar unos valores más elevados, lo que implica menores pérdidas, en los motores de alto rendimiento, así como en aquellos de mayores potencias, que requieren un control más preciso de las pérdidas. Así mismo, para niveles de tensión más elevados, la resistencia del hierro será mayor puesto que se puede considerar que: $V_1 \sim E$ y $P_{Fe} \propto E^2$, por lo que para mayores niveles de tensión se espera una mayor resistencia del hierro para contrarrestar en efecto proporcional de la fuerza electromotriz sobre las pérdidas. Este hecho se observa en casi todas las gráficas presentadas.

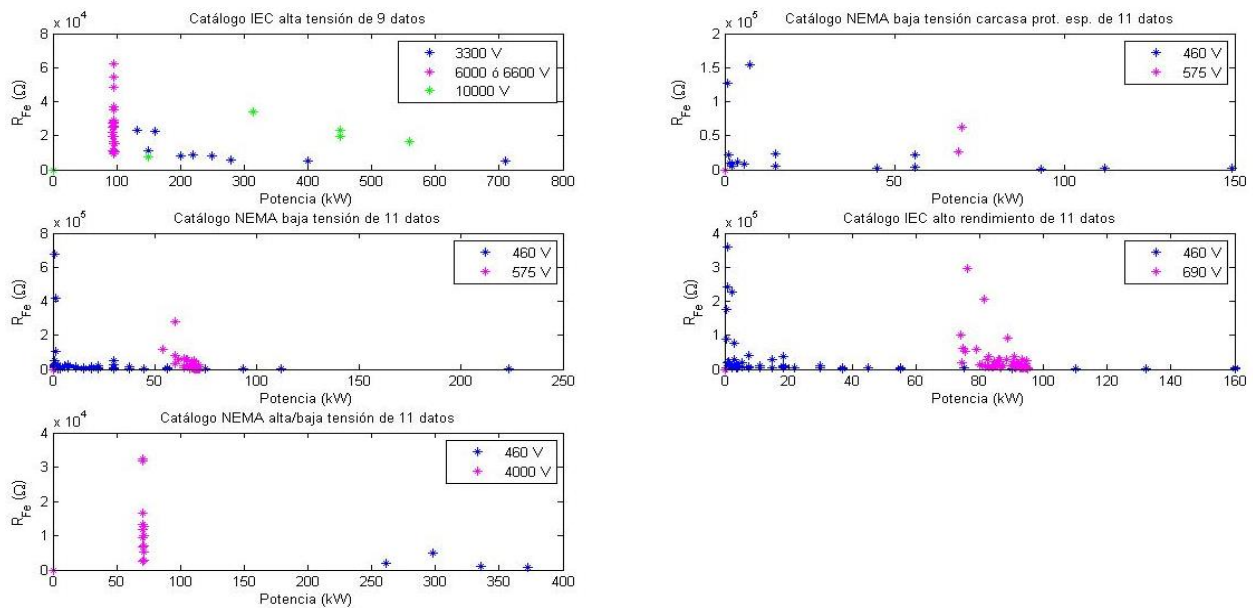


Figura 6.18. Distribución de R_{Fe} por potencia y tensión para cada catálogo

En la Figura 6.19 se presenta la reactancia de magnetización, que modela el consumo de energía reactiva necesaria para crear el campo magnético que atraviese el entrehierro y cree las fuerzas electromotrices en los conductores del rotor. Así pues, es de esperar una distribución hiperbólica, al igual que sucedió con las reactancias rotórica y estática, pero de una magnitud mayor, puesto que el aire del entrehierro presenta una reluctancia muy grande, lo que implica que la reactancia será mayor. Esto es lo que puede observarse gráficamente en la figura.

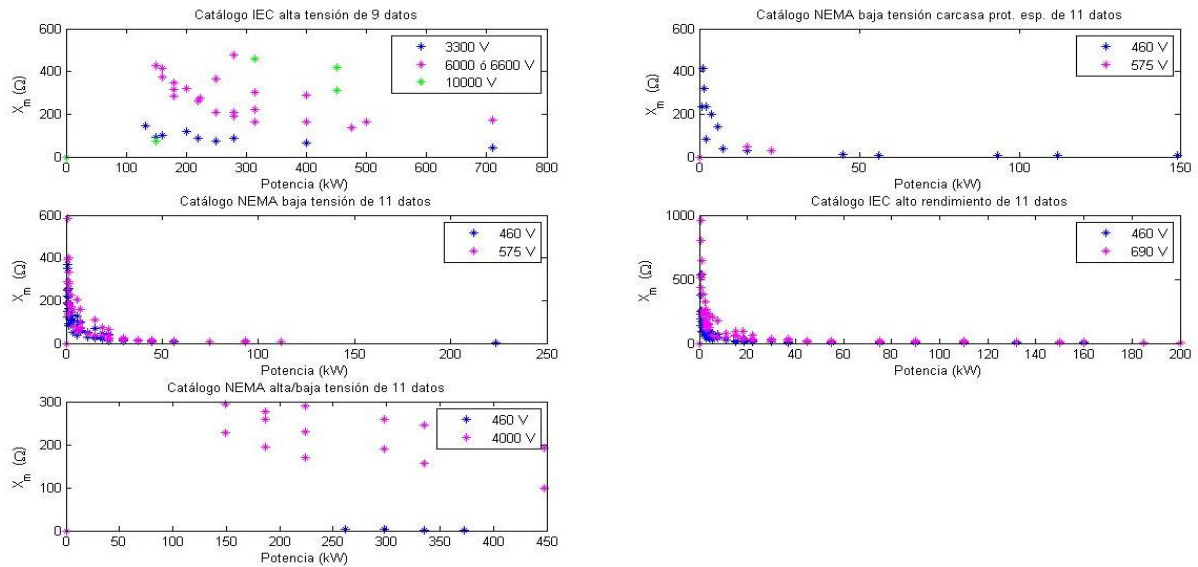


Figura 6.19. Distribución de X_m por potencia y tensión para cada catálogo

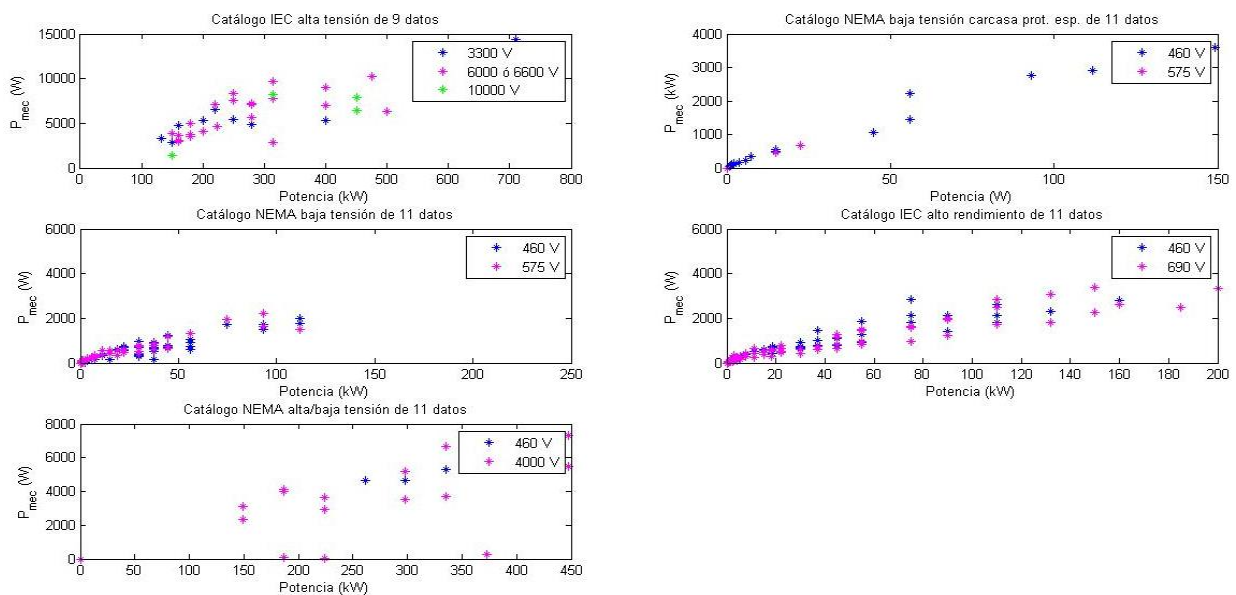


Figura 6.20. Distribución de P_{mec} por potencia y tensión para cada catálogo

En la figura anterior (Figura 6.20), se muestra la distribución de las pérdidas mecánicas. Como era de esperar, esta distribución es lineal con la potencia útil del motor. El nivel de tensión no tiene efecto sobre las pérdidas mecánicas, hecho esperable, y que se aprecia en las gráficas. Las pérdidas mecánicas dependen de la fabricación y

construcción del motor, así como de las condiciones de funcionamiento y de los elementos anti fricción instalados.

De modo que puede afirmarse, que si el algoritmo converge, las soluciones que proporciona serán válidas físicamente, y con errores muy bajos. Además el cálculo se producirá casi instantáneamente.

6.1.2. Modelo de circuito de jaula doble

En este apartado se procede a analizar la actuación del algoritmo de mínimos cuadrados en la determinación de los parámetros del motor de inducción cuando se considera un modelo de doble jaula, como el expuesto en el Capítulo 2: *Modelos de circuito*. Ahora el modelo básico se compone de 9 incógnitas, a las que se añadirán los deslizamientos en condiciones de carga parcial y en el punto de par máximo cuando la información disponible lo permita.

Se va a desarrollar los mismos análisis que para el modelo de jaula simple con el fin de poder realizar una comparación rigurosa.

En rasgos generales la actuación del algoritmo es peor que para el caso de jaula simple. La magnitud de los errores es mayor, si bien no alcanza valores demasiado alarmantes en la mayoría de los casos. El hecho más destacable es la alta convergencia del algoritmo. Al igual que para el caso de jaula simple, se ha considerado que el algoritmo no converge si supera el límite de iteraciones, el límite de evaluaciones de la función o si determina que alguno de los parámetros internos es negativo. En un primer análisis visual de los resultados se ve que el número de iteraciones necesarias para el cálculo de los parámetros, así como el número de evaluaciones están dentro de los límites en casi el 100% de los casos testados. Sin embargo, el problema aparece cuando se observa que hay una gran cantidad de parámetros estimados con valores negativos, lo cual es físicamente erróneo, si bien el algoritmo, en su intento por minimizar la función objetivo, toma parámetros negativos. En el Capítulo 2: *Modelos de circuito* se explicó el cambio de variables necesario para que se cumplan ciertas restricciones físicas impuestas por el comportamiento del motor. El algoritmo calcula los parámetros de forma que se cumpla dicho sistema de variables pero, como se explicó, la restricción de que dichas variables fuesen positivas se imponía trabajando con valores absolutos, lo que no impide al algoritmo establecer algunas de esas variables como negativas. Es necesaria una investigación más profunda de este hecho con motores que puedan ser testados en laboratorio. De esta forma, se pueden comparar las curvas características de dichos motores obtenidas en laboratorio con las generadas con los parámetros calculados por el algoritmo, buscando validar aquellos casos en los que el algoritmo ha

obtenido parámetros negativos. En este aspecto es necesario resaltar, que si se consideran válidos los modelos definidos por los valores absolutos de los parámetros calculados por el algoritmo, entonces, la convergencia de este es magnífica. De este modo, puesto que el algoritmo de cálculo de los parámetros trabaja con valores absolutos, se supondrán como válidos aquellos resultados que habrían quedado invalidados al considerar que alguno de los parámetros es negativo.

A continuación se presentan algunos datos referentes a lo expuesto, así como una tabla comparativa entre los errores obtenidos al partir de una solución genérica y cuando se parte de una solución dada por un modelo más sencillo. En cuanto a esto último, se hace necesario resaltar que en esta ocasión, al contrario que lo sucedido en jaula simple, se consigue aproximadamente la misma convergencia cuando se parte de una solución genérica. Incluso para algunos catálogos los errores son menores. Esto puede ser a que la solución más sencilla no va en la dirección correcta para alcanzar la solución para el modelo más complejo, y puesto que el algoritmo de mínimos cuadrados sólo explora el espacio de soluciones en una dirección, este hecho condenaría la solución así obtenida al error.

Si se tiene en cuenta la no convergencia producida por valores negativos de los parámetros internos, se obtienen los siguientes resultados en referencia a la convergencia: entre un 23 y un 28 % para el catálogo IEC alta tensión de 9 datos, entre un 66 y un 19 % para el catálogo NEMA baja tensión de carcasa de protección especial de 11 datos, entre el 31 y el 19 % para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, entre un 28 y un 22 % para el catálogo IEC alto rendimiento de 12 datos y entre un 19 y un 21 % para el catálogo NEMA alta/baja tensión de 12 datos. El primer término corresponde a los resultados obtenidos partiendo de una solución genérica y el segundo a los obtenidos al partir de la solución de un modelo más sencillo.

Si se considera que los valores absolutos de los resultados son válidos para modelar la máquina, la convergencia por catálogo sería: 100 % para el catálogo IEC alta tensión de 9 datos, 100 % para el catálogo NEMA baja tensión de carcasa de protección especial de 11 datos, entre el 99 y el 100 % para el catálogo NEMA baja tensión de 12 datos, entre un 98 y un 99 % para el catálogo IEC alto rendimiento de 12 datos y entre un 100 y un 98 % para el catálogo NEMA alta/baja tensión de 12 datos. Siendo nuevamente el primer término el correspondiente a los resultados obtenidos partiendo de una solución genérica y el segundo a los obtenidos al partir de la solución de un modelo más sencillo. Lo cual se resume en que converge casi el 100% de las veces, independientemente del catálogo.

Así pues, en esta ocasión se van a estudiar casi la totalidad de los motores de cada catálogo. Este hecho podría indicar que para algunos casos para los que el algoritmo no convergió al tratar de modelarlos como jaula simple, sí lo ha hecho al considerarlos como jaula doble. Es decir, que realmente esos motores tienen jaula doble o presentan ranuras profundas.

	Error T_{st}	Error T_{max}	Error P_n	Error $\eta_{n,FL}$	Error $\cos\varphi_{n,FL}$	Error I_{st}	Tiempo cálculo	Nº Iter.	Nº Eval.
1	0.12768	0.14078	0.07465	0.06691	0.02486	0.13667	0.51031	11.27	317.52
1*	0.10751	0.14765	0.13381	0.1404	0.04294	0.14462	0.55169	15.77	365.01
2	0.23227	0.22967	0.15449	0.09561	0.05588	-	0.3535	33.05	612.3
2*	0.16468	0.08336	0.05534	0.08798	0.07446	-	0.41161	13.22	365.77
3	0.1957	0.34971	0.14387	0.11315	0.08118	0.18837	0.21310	23.73	519.87
3*	0.14774	0.25931	0.0691	0.1609	0.08828	0.10669	0.31795	37.07	701.49
4	0.17513	0.3268	0.14854	0.11991	0.08163	0.15997	0.21818	32.12	633.19
4*	0.14919	0.25732	0.06628	0.13687	0.08151	0.10656	0.27444	48.53	857.14
5	0.20739	0.35216	0.12955	0.13298	0.0454	0.24897	0.30055	26.54	556.89
5*	0.10439	0.38323	0.1578	0.21833	0.05305	0.16594	0.36989	37.55	706.65

Tabla 6.6. Tabla comparativa de resultados obtenidos partiendo de distintas soluciones iniciales

En la Tabla 6.6, la columna izquierda hace referencia al catálogo, siendo:

1. IEC de 9 datos.
2. NEMA baja tensión con carcasa de protección especial de 11 datos.
3. NEMA baja tensión de 12 datos.
4. IEC alto rendimiento de 12 datos.
5. NEMA alta/baja tensión de 12 datos.

El “*” hace referencia a los resultados partiendo de una solución genérica.

Si se comparan estos resultados con los de la Tabla 6.2, se ve que en general, la estimación del algoritmo para el modelo de jaula doble es peor que para el caso de jaula simple. Sin embargo, la convergencia es mucho mejor para el modelo de jaula doble. Los tiempos de cálculo también son mayores, pero en cuanto al número de iteraciones y de evaluaciones de la función se ve que, por término general, son menores que para el caso de jaula simple. El algoritmo tarda menos en encontrar una solución pero lo hace cometiendo mayores errores.

A continuación se muestran los análisis de sensibilidad para cada uno de los catálogos. Nuevamente se ha incrementado en un 1% cada uno de los parámetros por separado, y se muestran los resultados obtenidos.

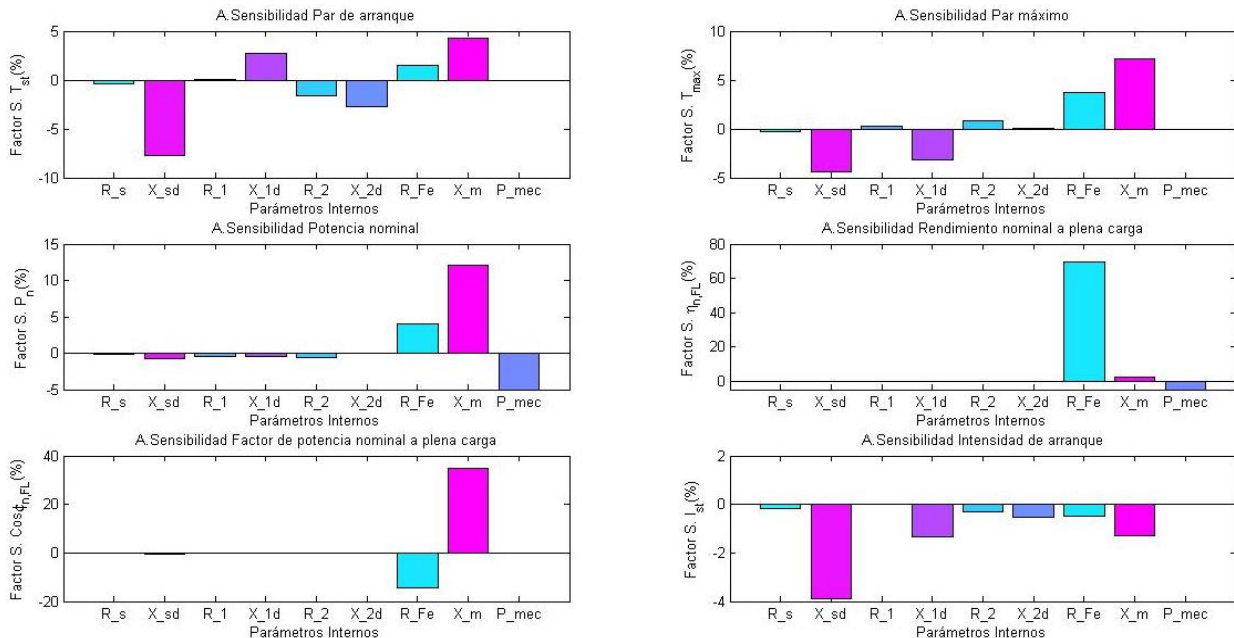


Figura 6.21. Análisis de sensibilidad para catálogo IEC alta tensión de 9 datos jaula doble

En el análisis de la Figura 6.21, y en los siguientes, es necesario resaltar que la barra que muestra la sensibilidad respecto a las pérdidas mecánicas ha sido truncada para mostrar la sensibilidad respecto al resto de parámetros. Esto se ha tenido que hacer así porque el factor de sensibilidad respecto a las pérdidas mecánicas para la potencia nominal y el rendimiento llega a ser del 1000 %.

En la Figura 6.22 se aprecian notables diferencias respecto a la Figura 6.21, al tratarse la primera de motores de alta tensión y la segunda de motores de baja tensión.

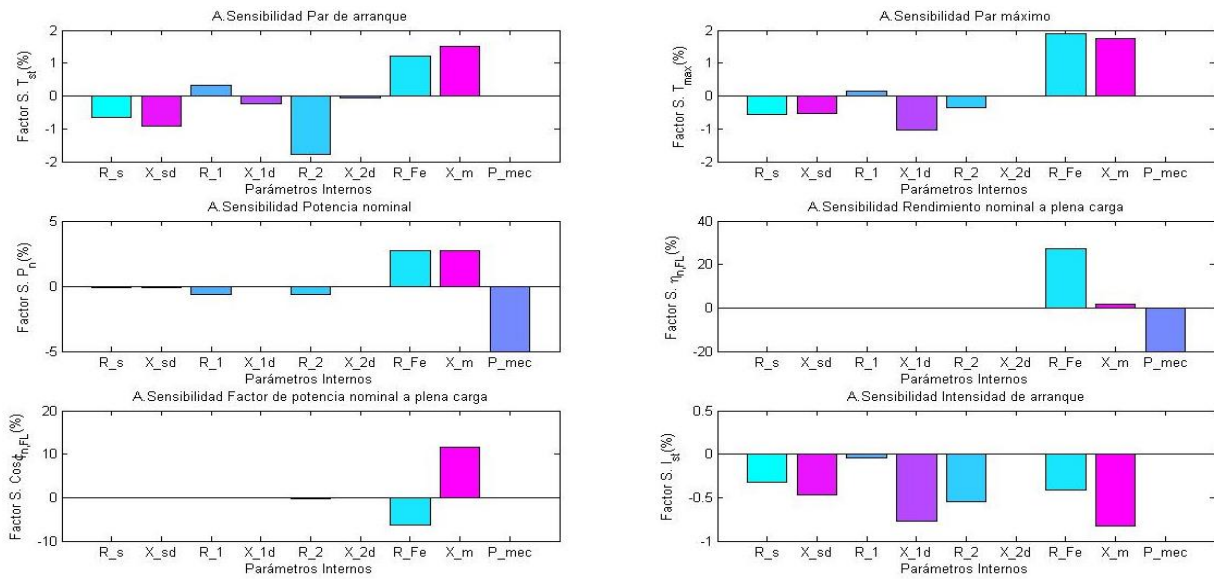


Figura 6.22. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA baja tensión de carcasa de protección especial de 11 datos jaula doble

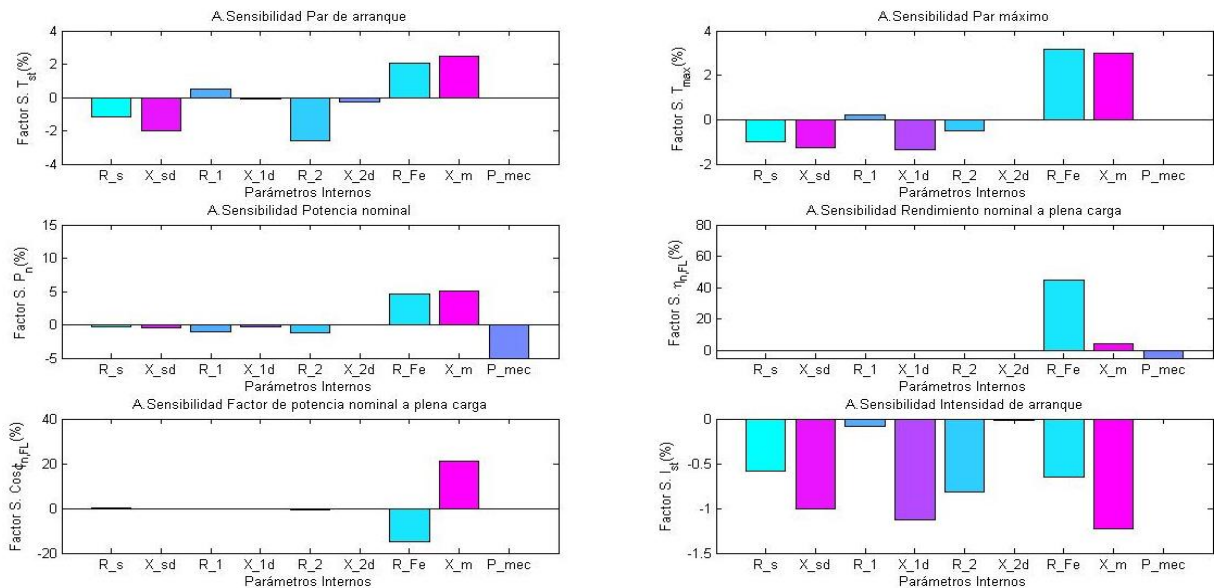


Figura 6.23. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA baja tensión de 12 datos jaula doble

En la Figura 6.25 se aprecia una tendencia un poco distinta, pero similar a la Figura 6.21. Esto es así porque ambas representan la información de catálogos de alta tensión. En la Figura 6.25 se representa un catálogo que contiene motores de alta y de baja tensión, pero que tiene una mayoría de motores de alta tensión. A parte de esto, se ve una tendencia general de comportamiento, que varía ligeramente en los porcentajes, es decir cuantitativamente, pero no cualitativamente.

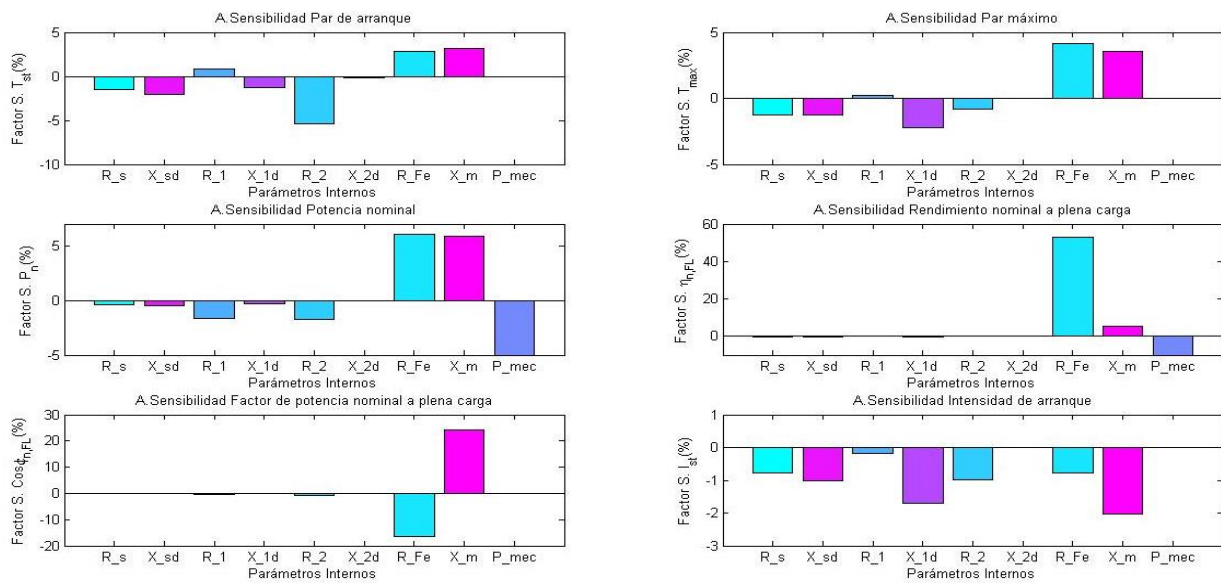


Figura 6.24. Análisis de sensibilidad para catálogo IEC alto rendimiento de 12 datos jaula doble

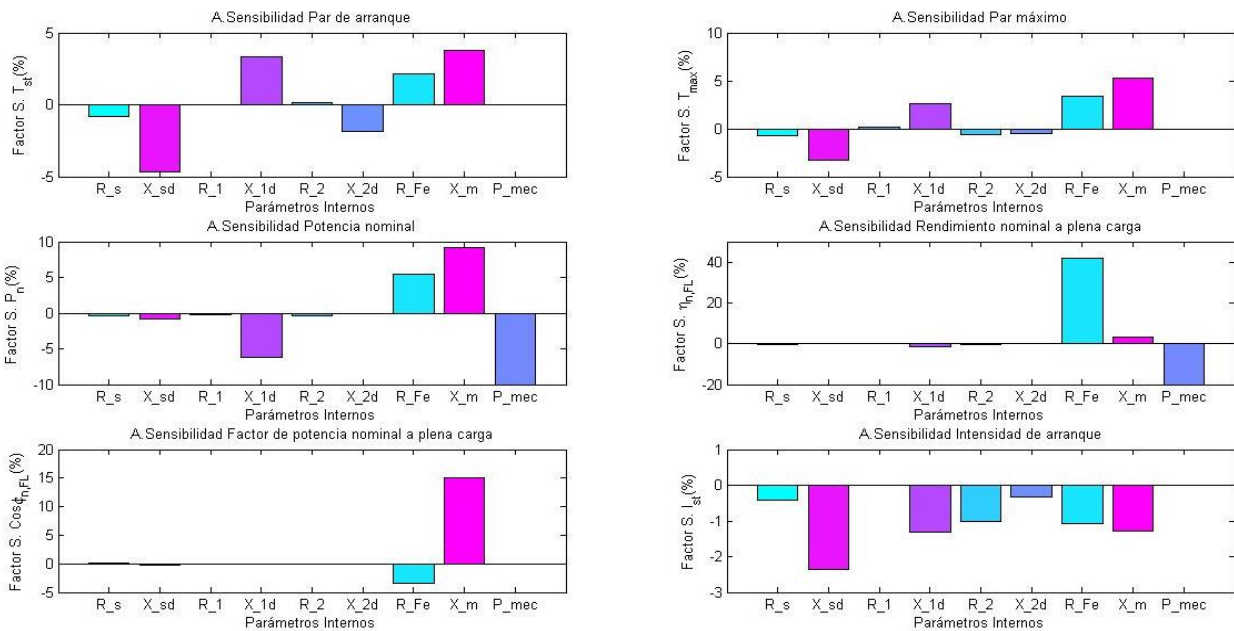


Figura 6.25. Análisis de sensibilidad para catálogo NEMA alta/baja tensión de 12 datos jaula doble

En la Figura 6.26 se muestran los errores cometidos al calcular el par máximo, ordenados por potencia nominal del motor. En esta gráfica se ve que en la mayoría de las estimaciones se está por debajo del par indicado por el catálogo. La distribución es similar al caso de jaula simple. Por este motivo se hace necesario estudiar la característica Par-Deslizamiento, representada en la Figura 6.27. En esta gráfica se representan las curvas de jaula simple y jaula doble para un motor del catálogo IEC alta tensión de 9 datos. Los puntos mostrados son:

- A: punto de par máximo calculado, en jaula doble, siendo su valor de abscisas $s_{max}(\text{jaula doble})$.
- B: punto de par máximo de la curva de jaula doble.
- C: punto de par máximo de la curva de jaula simple.
- D: punto de par máximo calculado, en jaula simple, siendo su valor de abscisas $s_{max}(\text{jaula simple})$.

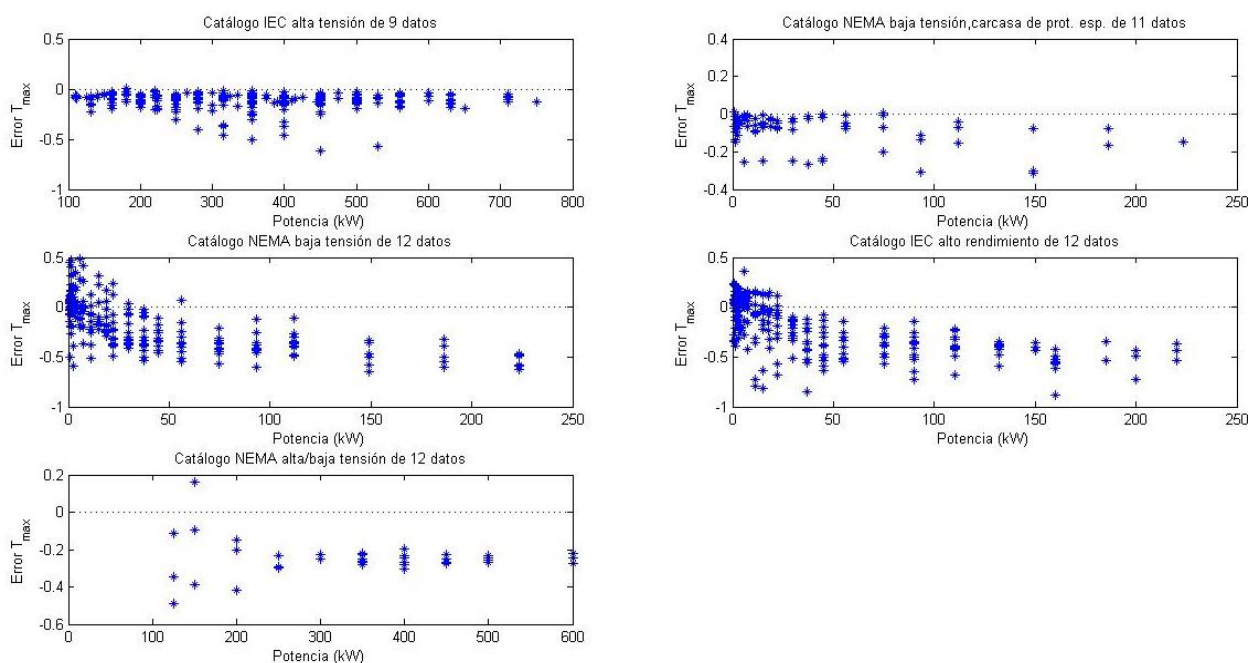


Figura 6.26. Errores en el par máximo ordenados por potencia para cada catálogo

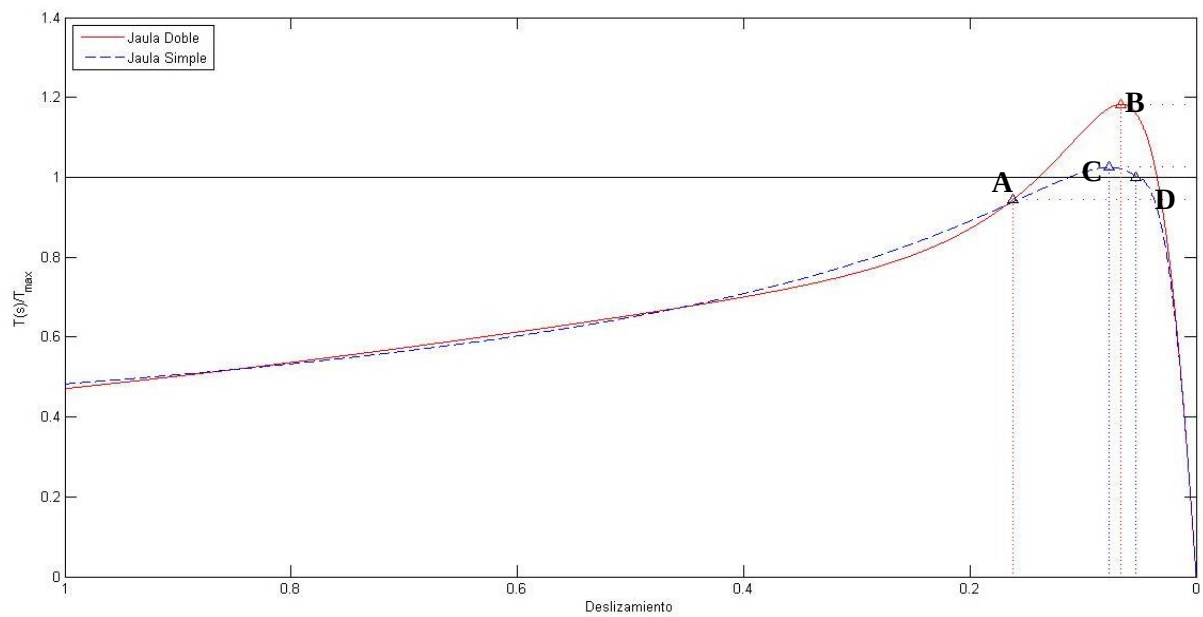


Figura 6.27. Característica Par normalizado-Deslizamiento jaula doble

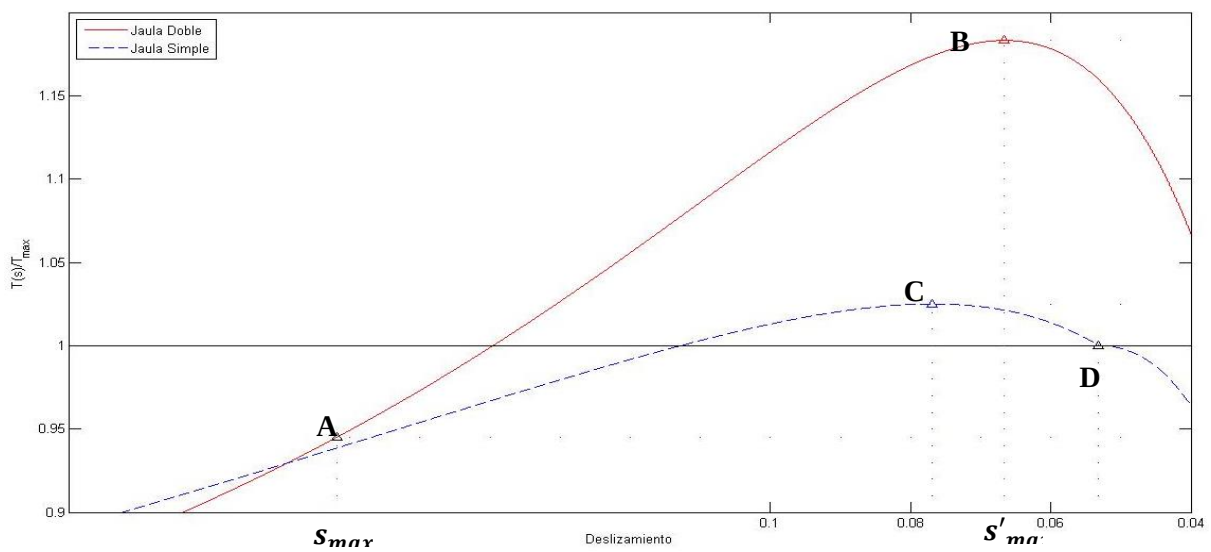


Figura 6.28. Detalle de la característica Par normalizado-Deslizamiento jaula doble

En la Figura 6.28 se presenta un detalle de la zona de pares máximos

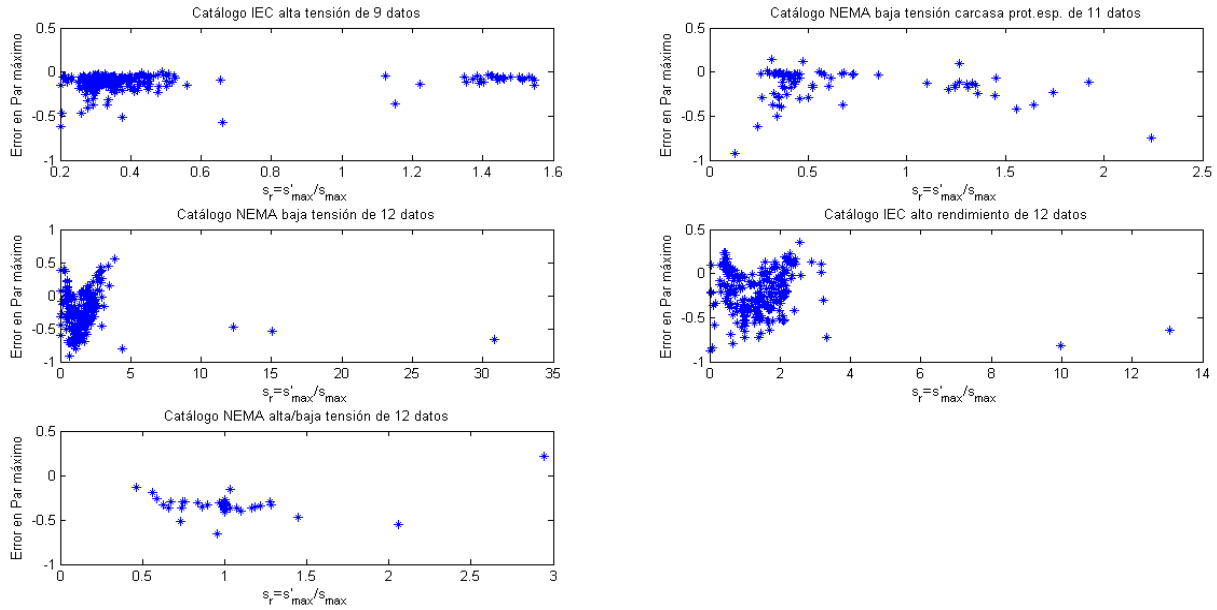


Figura 6.29. Error en par máximo frente a ratio s_r para modelos de jaula doble completos

Las características obtenidas para el resto de motores son similares. Se ve claramente cómo el error cometido en el caso de jaula doble es mayor que en el caso de jaula simple.

En esta ocasión también es necesario estudiar la distribución del error del par máximo frente al ratio $s_r = \frac{s'_{max}}{s_{max}}$.

Como es de esperar observando la Figura 6.28, en la Figura 6.29 se ve que para casi la práctica mayoría de los motores analizados el ratio s_r es menor que la unidad para jaula doble, al contrario de lo que sucedía para jaula simple. Sin embargo, al igual que ocurría con jaula simple, la distribución no presenta una forma sencilla, fácil de reconocer. Por lo tanto se requiere un estudio más profundo, contando con datos reales, no valores medios de catálogos, para poder determinar la relación existente entre ambos deslizamientos y poder así implementar una ecuación que proporcione un valor del par máximo más correcto.

En los análisis de sensibilidad anteriores se vieron ciertas diferencias entre los resultados proporcionados por motores de alta y de baja tensión. En la Figura 6.30, se muestran los errores de las principales magnitudes calculadas para los motores de alta tensión, tanto NEMA como IEC

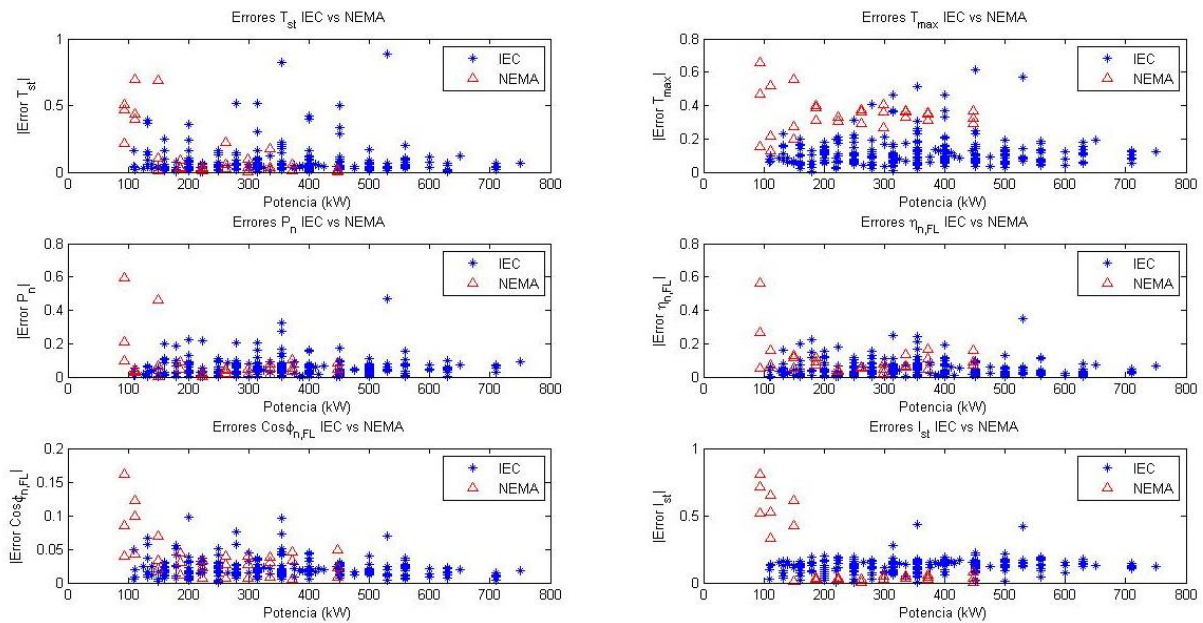


Figura 6.30. Comparación de errores entre motores de tipo IEC y NEMA de alta tensión, jaula doble

Los motores NEMA representados han sido calculados empleando 12 datos mientras que los de tipo IEC se han calculado empleando 9 datos. Sin embargo, en general se obtienen mejores resultados para estos últimos, sobre todo en el par máximo. En favor de los motores NEMA hay que resaltar que el número de motores analizados es mucho menor que el de motores IEC, por lo tanto habría que estudiar más motores para considerar los resultados como concluyentes.

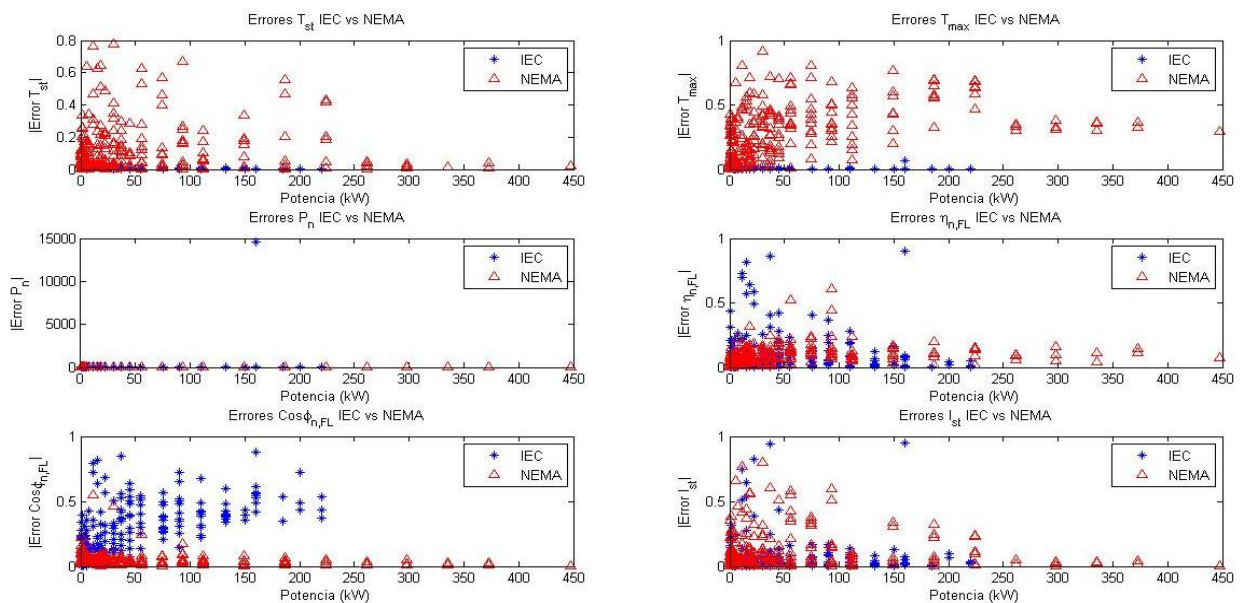


Figura 6.31. Comparación de errores entre motores de tipo IEC y NEMA de alta tensión, jaula doble

En la Figura 6.31 se hace la misma comparación, pero entre motores de baja tensión. Se muestra la situación contraria al caso de alta tensión. Ahora el número de motores de tipo NEMA es casi el doble que el de tipo IEC. Los mayores errores aparecen en el par máximo, como ya se ha visto. En el resto de magnitudes, la situación está compensada. Para algunas magnitudes los motores tipo NEMA presentan mayores errores y en otras ocurre al revés.

En la Tabla 6.7 se muestran los valores obtenidos al analizar los mismos motores estudiados para jaula simple. Comparándolos entre sí, se ve que hay importantes diferencias. En primer lugar, como se ha comentado, los errores son mayores, en general, para jaula doble. Sin embargo, para jaula doble se obtienen buenos resultados del error de par e intensidad de arranque simultáneamente, hecho que no sucedía con normalidad en jaula simple. En cuanto a los deslizamientos se comprueba que se producen casi exactamente en los mismos puntos en ambos modelos.

Al igual que hizo con el modelo de jaula simple, a continuación se muestra un análisis del proceso de obtención de una solución. La Tabla 6.8 muestra la evolución del algoritmo iterativo para un motor IEC de alto rendimiento de 750 W, 690 V, 6 polos. En esta ocasión, el algoritmo sólo necesita 9 iteraciones, si bien esto no es lo común, como se mostró en la Tabla 6.6, de dónde se puede extraer que el número medio de iteraciones está entre 20 y 30.

En la Figura 6.32 se muestra la evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones, para el mismo motor. Al igual que en el caso de jaula simple, se ve claramente cómo el algoritmo trabaja de forma unidireccional. A partir de la quinta iteración los ajustes que realiza son casi iguales en las siguientes iteraciones. Cuando hay convergencia, el algoritmo halla la solución muy rápidamente. Si bien, al igual que en el ejemplo para jaula simple, el valor de la función objetivo está muy por encima del mínimo fijado como criterio de salida, sin embargo, el paso de la función sí que alcanza el valor más pequeño permitido.

Motor	1	2	3	4	5
Tipo	IEC	NEMA	NEMA	IEC	NEMA
Potencia [kW]	132	14.91	111.86	200	223.71
Tensión [V]	3300	460	575	690	4000
Frecuencia [Hz]	50	60	60	50	60
Nº Polos	6	2	4	4	2
$R_s [\Omega]$	4.294	0.30468	0.13161	0.15382	2.1187
$R_s [\text{pu}]$	0.05204	0.02147	0.04452	0.0646	0.02962
$X_{sd} [\Omega]$	3.29362	0.18366	0.23301	0.16417	6.175
$X_{sd} [\text{pu}]$	0.03992	0.01294	0.07883	0.06896	0.08634
$R_1 [\Omega]$	0.89017	0.213	0.01435	0.01378	0.51716
$R_1 [\text{pu}]$	0.01079	0.01501	0.00485	0.00578	0.00723
$X_{1d} [\Omega]$	5.88632	1.535	0.1997	0.17246	8.749
$X_{1d} [\text{pu}]$	0.07134	0.10824	0.06756	0.07244	0.12233
$R_2 [\Omega]$	22.843	6.959	0.21557	0.16169	2.3009
$R_2 [\text{pu}]$	0.27688	0.4905	0.07293	0.06792	0.03217
$X_{2d} [\Omega]$	2.109	0.1425	0.10093	0.07866	4.238
$X_{2d} [\text{pu}]$	0.02556	0.01004	0.03414	0.033	0.05926
$R_{Fe} [\Omega]$	210045.48	249155.48	172387.8	1469721.54	20937.72
$R_{Fe} [\text{pu}]$	2546.005	17560.98	58321.17	617400.35	292.74
$X_m [\Omega]$	119.916	42.487	7.084	5.28	266.42
$X_m [\text{pu}]$	1.453	2.994	2.396	2.218	3.725
$P_{mec} [\text{W}]$	2763.23	513.54	9298.67	16406.75	5753.39
$P_{mec} [\text{W}]$	0.02093	0.03443	0.08313	0.082	0.02571
$s_{75\%}$	-	0.012	0.0036	0.0039	0.0048
$s_{50\%}$	-	0.0078	0.0018	0.002	0.003
s_{max}	-	-	0.0322	0.0377	0.037
Error T_{st}	-0.09031	-0.06663	0.00602	-0.04021	0.03171
Error T_{max}	-0.07146	-0.0476	-0.498	-0.48616	-0.30284
Error P_n	-0.00025	0.01084	-0.07909	-0.09716	-0.01935
Error $\eta_{n,FL}$	-0.07765	0.0022	-0.12623	-0.14406	-0.03171
Error $\cos\varphi_{n,FL}$	0.05718	0.00816	0.03223	0.04027	0.00715
Error I_{st}	0.07136	-	0.0275	0.00324	-0.02364

Tabla 6.7. Ejemplos de resultados obtenidos según el catálogo, jaula doble

Si se compara la Tabla 6.7 con la Tabla 6.4 se observa que existen grandes diferencias entre los parámetros obtenidos. Por la magnitud de los errores se podría decir que el modelo de jaula simple es mejor, más preciso. Sin embargo para poder aseverar eso sin temor a cometer errores, habría que conocer los parámetros reales de la máquina, y compararlos con los calculados, o disponer de la curva característica.

Iteración	Contador de funciones	Residuo	Optimalidad de primer orden	Lambda	Norma del paso
0	13	0.631742	4.59	0.01	-
1	27	0.168176	10.9	0.1	7485.78
2	40	0.167992	0.681	0.01	28483.7
3	56	0.152136	1.27	10	13264.8
4	69	0.142205	9.68	1	6655.49
5	82	0.0840576	2.11	0.1	84643.4
6	97	0.0818494	1.45	10	14006.2
7	111	0.0811692	1.38	100	869.827
8	138	0.0811692	1.38	1e+16	9.16941e-15

Tabla 6.8. Datos de la evolución del proceso iterativo de un motor, jaula doble

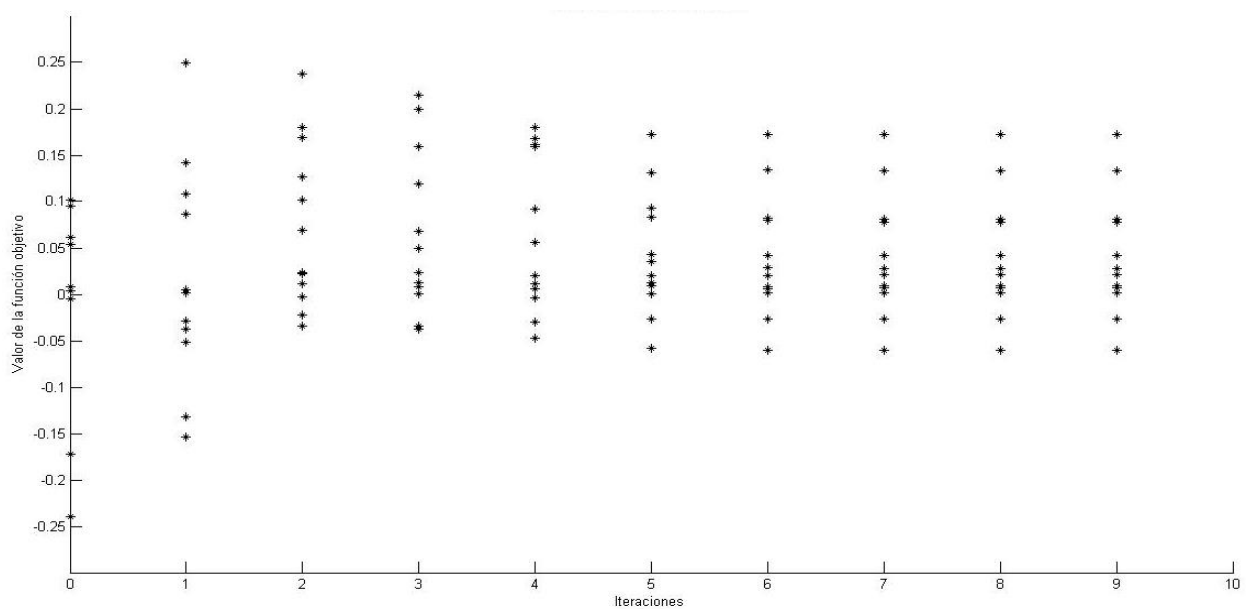


Figura 6.32. Evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones, jaula doble