

## 7. RESULTADOS.

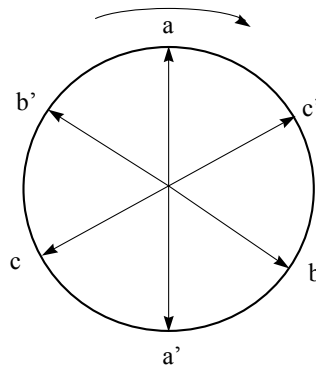
### 7.1. Consideraciones previas.

Se ha realizado la simulación de la máquina descrita en el capítulo anterior, se han tabulado los resultados y se han contrastado con los resultados obtenidos en los prototipos desarrollados en el DEE (Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC).

Para realizar las simulaciones se ha empleado la versión 5.6 del programa ANSYS EMAG. Este programa permite analizar este tipo de motores teniendo en cuenta la velocidad de rotación del rotor. Para poder realizar la simulación el rotor no debe presentar discontinuidades geométricas, es decir, tiene que ser sólido, no admitiendo ranurado de ningún tipo.

El motor analizado es un motor de 20 pares de polos con devanado imbricado de paso diametral y 1 conductores activos por fase y polo.

La alimentación se hace a través del estator con un sistema trifásico equilibrado de corrientes de valor  $i=1$  A.



**Figura 133. Hexágono de corrientes aplicado al modelo.**

La sección de los conductores es de 0.28 mm.

#### 7.1.1. Elementos empleados en la discretización y condiciones de simetría.

Se ha realizado la simulación de un par de polos del motor, empleando únicamente la mitad de un conjunto de par de polos del motor. Es decir, dado que el rotor es doble, se ha empleado únicamente un semiestátor y la mitad del rotor.

La simulación realizada ha sido realizada sobre el sólido en 3 dimensiones, es decir, a diferencia de otros estudios, éste tiene en cuenta las 3 dimensiones X,Y,Z además de la variación temporal (t) de las corrientes. Por tanto el campo senoidal giratorio analizado es un campo tridimensional.

El elemento empleado es del tipo SOLID 117. Este tipo de elemento permite establecer condiciones de giro en el espacio requiriendo la introducción de una constante real que es la  $\omega$  de giro del elemento respecto a un centro definido con anterioridad, en nuestro caso el eje de rotación de la máquina.

Con el fin de simplificar la simulación se ha supuesto que el flujo en las caras no sujetas a condiciones de simetría era paralelo a dichas caras. En las caras sometidas a condiciones de simetría se ha supuesto el flujo normal a dichas caras.

### 7.1.2.Método de resolución empleado.

El método de análisis empleado es un análisis armónico. Este tipo de análisis supone que todas las magnitudes de carga del análisis son senoidales, por lo que no se admiten saturaciones del hierro si éste está presente. Esto implica que el flujo en el entrehierro es siempre senoidal en el análisis, lo que no será cierto cuando se llegue a la saturación del hierro.

Se ha aceptado esta restricción, puesto que el objetivo del análisis es mostrar de una forma gráfica y no expuesta hasta ahora, de los fenómenos que suceden en el interior de las máquinas de flujo axial. Entre ellas, las más importantes, la distribución de las corrientes en rotor y estator, los campos que alcanzan el rotor. Y la variación de todas estas magnitudes con la frecuencia y la velocidad de rotación del rotor (respecto a la  $\Omega$  de sincronismo).

La presentación de resultados disponible en el programa es en forma de magnitudes complejas, con parte real e imaginaria. Por lo que para cada magnitud tendremos una gráfica representando la componente real, y otra la componente imaginaria.

Todos los casos estudiados tenían en común las variables conocidas e impuestas, que son las siguientes:

- $\Omega$  eléctrica de las corrientes estáticas.
- $\Omega$  mecánica de rotación del rotor.  $\Omega_{mecanica} = (1 - s) \cdot \frac{\Omega_{electrica}}{p}$

## 7.2. Resultados simulación máquina 20 pares de polos.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras analizar la máquina descrita en los capítulos 7, 8 y 9. El estudio se ha enfocado en analizar el comportamiento de las corrientes rotóricas con la frecuencia y el deslizamiento.

En el anexo A se puede encontrar la información gráfica de soporte a los resultados del presente capítulo. Esta información es imprescindible, pues no basta únicamente con analizar los valores numéricos obtenidos, sino además la forma en que se reparten las corrientes en el rotor.

Los casos estudiados se muestran en la tabla adjunta, inicialmente se analizó el comportamiento de la máquina para un deslizamiento fijo, variando la frecuencia de las corrientes estáticas.

A continuación se estudió el comportamiento de la máquina para diferentes deslizamientos, para una misma frecuencia de las corrientes estáticas.

s	f									
	50	100	200	300	500	1000	2000	3000	4000	5000
0,05	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
0,10	x									
0,20	x	x		x	x	x		x		
0,40	x									
0,50	x	x		x	x	x		x		
0,60	x									
1,00	x	x		x	x	x		x		

La aparición de vórtices de corriente de sentidos de giro opuestos para determinadas frecuencias, así como la variación en el cierre de las líneas de corriente hace imprescindible el análisis de las imágenes obtenidas para extraer conclusiones.

Hay que recordar que únicamente proporciona par de giro la componente activa en la dirección radial de la corriente, por lo que la aparición de vórtices con líneas de corriente cortas indica un par pequeño para la máquina.

El modelo analizado simula el comportamiento dinámico de la máquina, es decir, se ha simulado la máquina girando. Esto es posible debido a que el rotor es sólido, puesto que el modelo sólo permite analizar sólidos en movimiento homogéneos, sin cambios de sección transversal.

Caso que se pretendiese simular modelos ranurados, ni el programa ni el modelo serían los adecuados.

Cabe añadir, que es el único software del mercado, al menos conocido por el autor, que permite la simulación electrodinámica por elementos finitos.

**7.2.1.Valores para s=0.05 y variación de f**

s=0,05				
<b>Jr ROTOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
50	137,03	1213,00	0,000137	0,001213
100	110,35	933,75	0,000110	0,000934
200	105,96	914,95	0,000106	0,000915
300	642,79	5407,00	0,000643	0,005407
500	13448,00	85740,00	0,013448	0,085740
1000	9092,00	68209,00	0,009092	0,068209
2000	3654,00	30956,00	0,003654	0,030956
3000	17752,00	154304,00	0,017752	0,154304
4000	4990,00	38649,00	0,004990	0,038649
5000	2882,00	50185,00	0,002882	0,050185

s=0,05				
<b>Ji ROTOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
50	293,24	2420,00	0,000293	0,002420
100	189,19	1607,00	0,000189	0,001607
200	262,74	2097,00	0,000263	0,002097
300	765,89	6436,00	0,000766	0,006436
500	6319,00	48338,00	0,006319	0,048338
1000	12106,00	82632,00	0,012106	0,082632
2000	3250,00	26548,00	0,003250	0,026548
3000	28253,00	209703,00	0,028253	0,209703
4000	6148,00	50185,00	0,006148	0,050185
5000	2763,00	22161,00	0,002763	0,022161

s=0,05				
<b>Jr ESTATOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
50	3160000	28500000	3,2	28,5
100	1950000	17600000	2,0	17,6
200	909776	8180000	0,9	8,2
300	3620000	32600000	3,6	32,6
500				
1000	7450000	67000000	7,5	67,0
2000	1520000	13600000	1,5	13,6
3000	5770000	51900000	5,8	51,9
4000	2220000	19900000	2,2	19,9
5000	836396	7410000	0,8	7,4

s=0,05				
<b>Ji ESTATOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
50			0,0	0,0
100	1290000	11300000	1,3	11,3
200	862037	7460000	0,9	7,5
300	2420000	21100000	2,4	21,1
500				
1000	4350000	38900000	4,4	38,9
2000	2340000	19500000	2,3	19,5
3000	6080000	53300000	6,1	53,3
4000	7710000	34600000	7,7	34,6
5000	1270000	10700000	1,3	10,7

s=0,05				
<b>Br ROTOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
50				
100	0,00004	0,0003	35	313,71
200	0,00001	0,0001	12,8	115
300	0,00001	0,0001	7,42	60,7
500				
1000	0,00012	0,0010	122	1003
2000	0,00002	0,0001	15,8	131
3000	0,00006	0,0005	62,7	540
4000	0,00003	0,0002	26,1	181
5000	0,00001	0,0001	9,61	77,4

s=0,05				
<b>Bi ROTOR</b>				
f(Hz)	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
50				
100	0,00002	0,00019	20,8	187
200	0,00008	0,00007	77,4	69,1
300	0,00001	0,00004	5,06	42,5
500				
1000	0,00010	0,00083	95,2	834
2000	0,00002	0,00011	23,1	114
3000	0,00005	0,00036	51,1	362
4000	0,00002	0,00015	23,5	146
5000	0,00001	0,00007	8,61	67,2

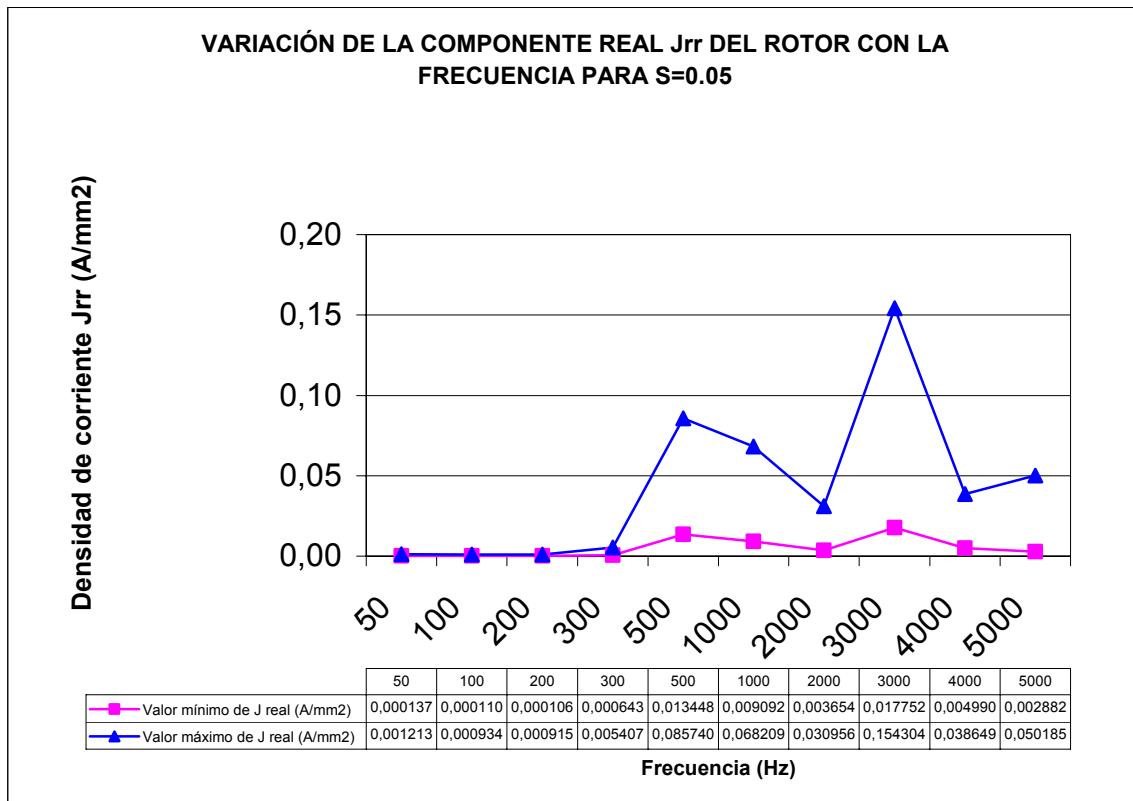


Figura 134. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(f)$  para  $s=0,05$ .

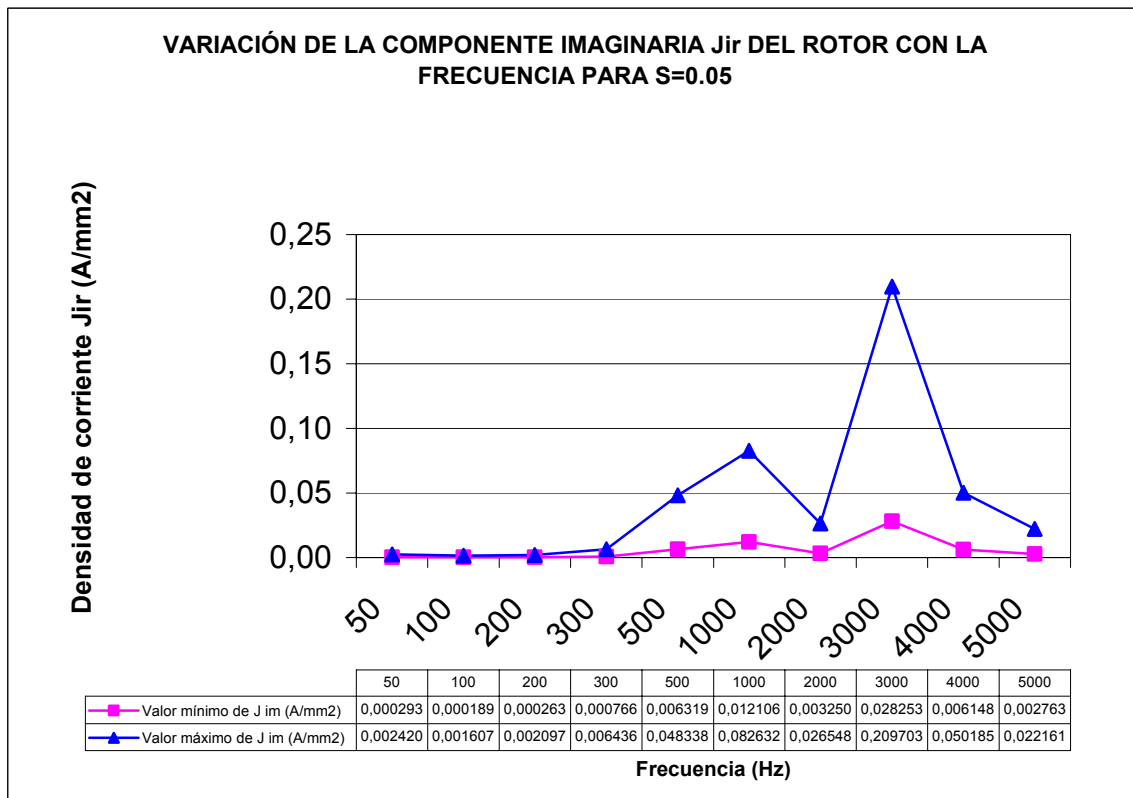


Figura 135. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(f)$  para  $s=0,05$ .



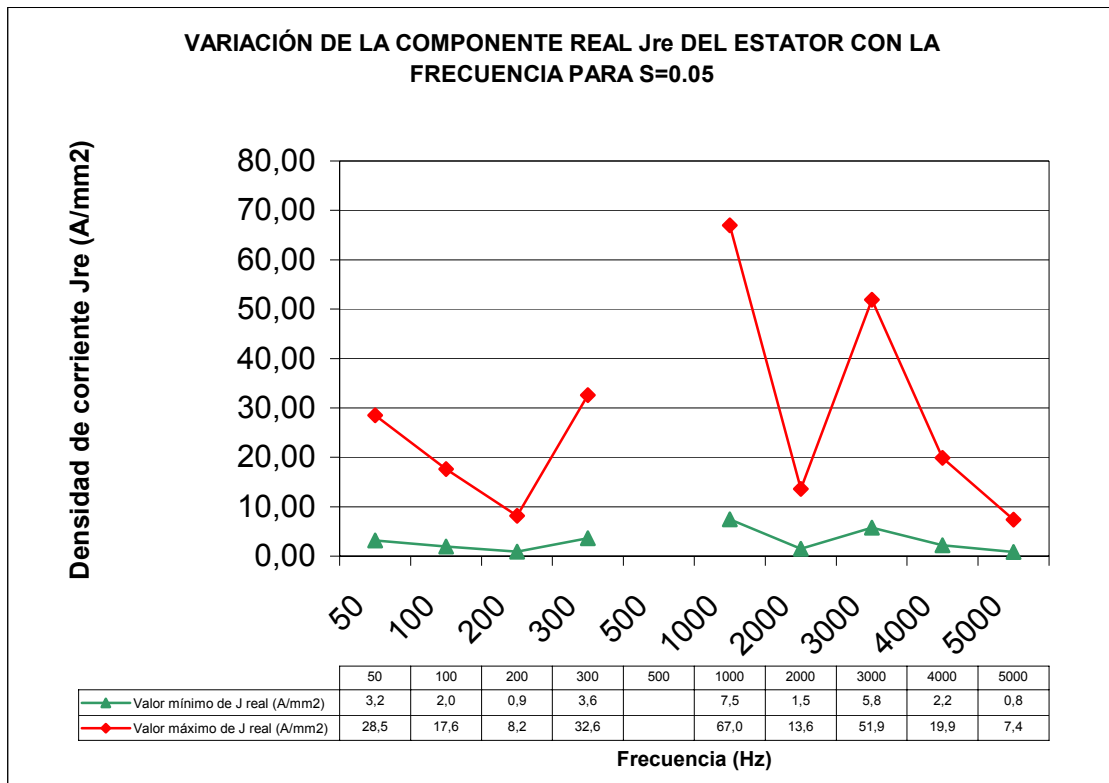


Figura 136. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(f)$  para  $s=0,05$ .

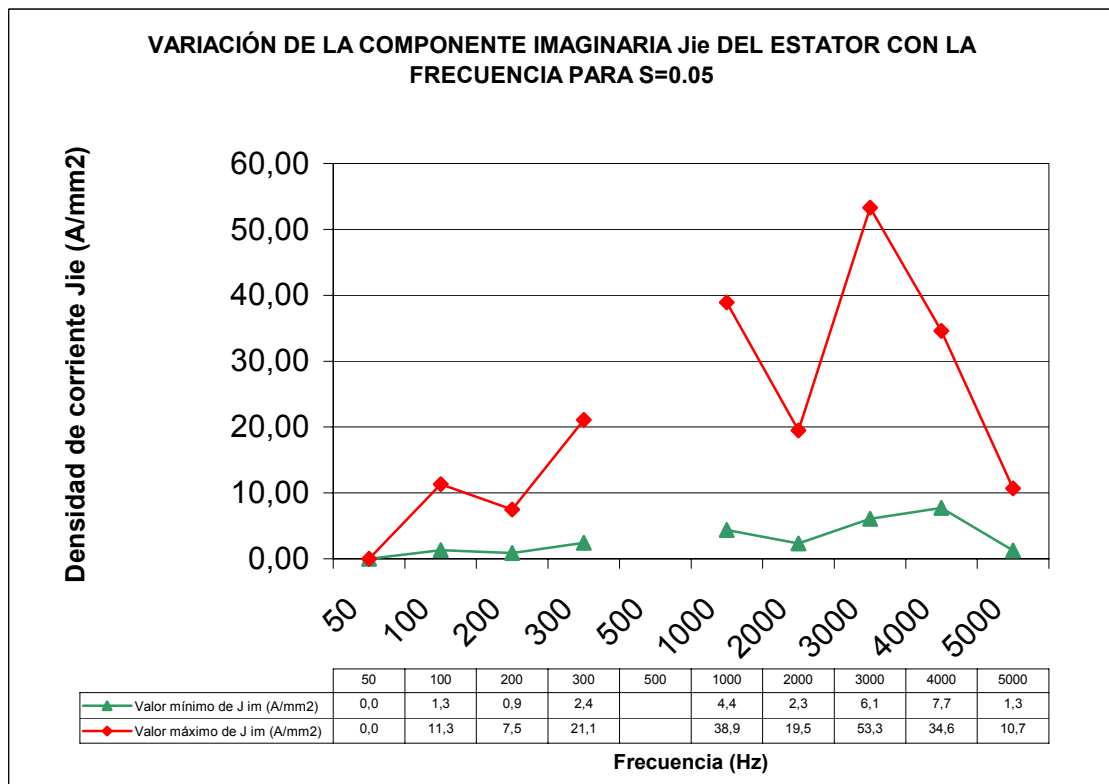


Figura 137. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ie}=f(f)$  para  $s=0,05$ .

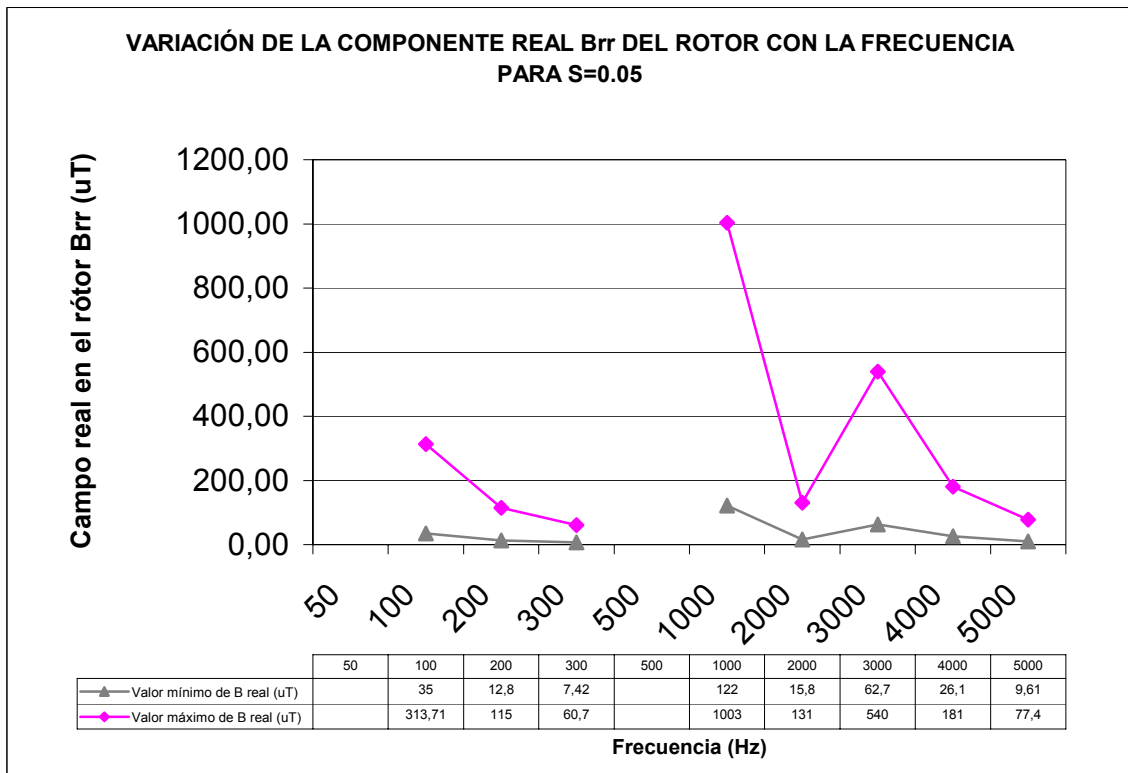


Figura 138. Campo real en el rotor  $B_{rr}=f(f)$  para  $s=0,05$ .

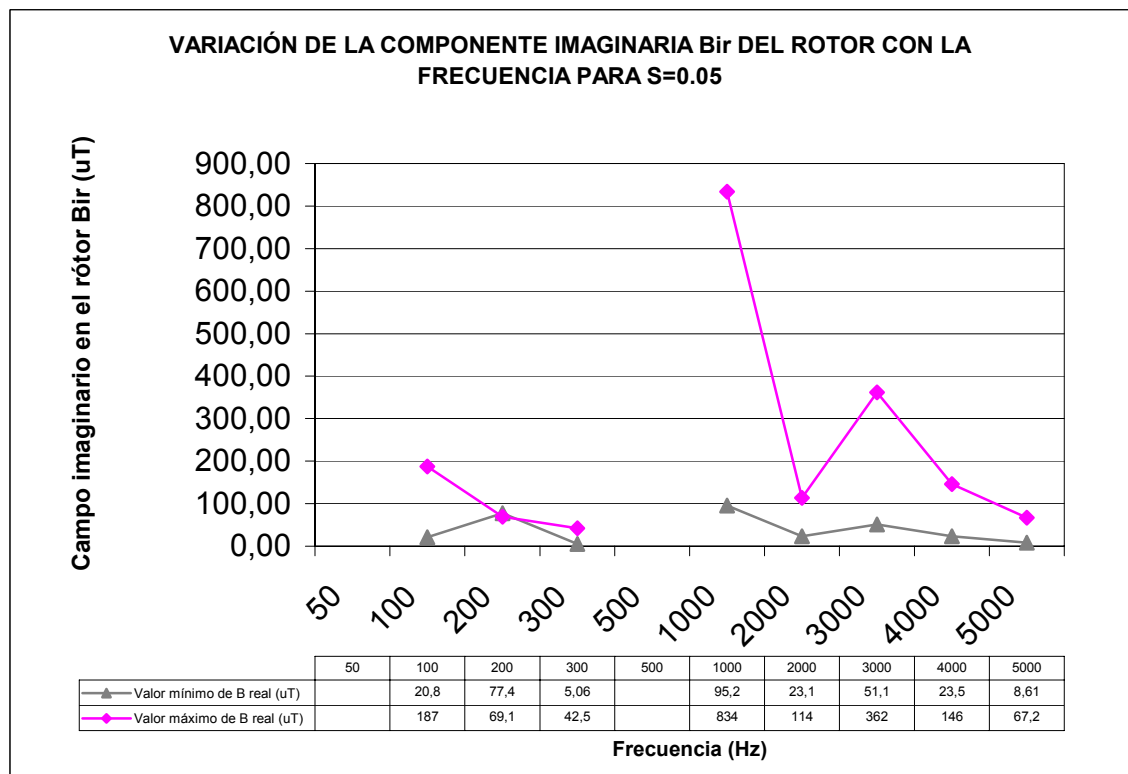


Figura 139. Campo imaginario en el rotor  $B_{ir}=f(f)$  para  $s=0,05$ .

**7.2.2.Valores para f=50Hz y variación de s**

f=50Hz				
<b>Jr ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	137,03	1213,00	0,000137	0,001213
0,1	31,11	255,73	0,000031	0,000256
0,2	284,31	2431,00	0,000284	0,002431
0,4	812,75	6549,00	0,000813	0,006549
0,5	383,15	3091,00	0,000383	0,003091
0,6	172,65	1396,00	0,000173	0,001396
0,999	16,74	136,92	0,000017	0,000137

f=50 Hz				
<b>Ji ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
50	293,24	2420,00	0,000293	0,002420
100	42,10	359,20	0,000042	0,000359
200	526,28	4294,00	0,000526	0,004294
0,4	1418,00	12105,00	0,001418	0,012105
0,5	976,74	7632,00	0,000977	0,007632
0,6	290,08	2483,00	0,000290	0,002483
0,999	20,53	149,74	0,000021	0,000150

f=50Hz				
<b>Jr ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	3160000	28500000	3,2	28,5
0,1	1370000	12300000	1,4	12,3
0,2	7560000	68000000	7,6	68,0
0,4	18500000	167000000	18,5	167,0
0,5	12100000	109000000	12,1	109,0
0,6	3280000	29500000	3,3	29,5
0,999	591411	5320000	0,6	5,3

f=50Hz				
Ji ESTATOR				
s	Valor mínimo de J im (A/m2)	Valor máximo de J im (A/m2)	Valor mínimo de J im (A/mm2)	Valor máximo de J im (A/mm2)
0,05			0,0	0,0
0,1	862524	7540000	0,9	7,5
0,2	4260000	38100000	4,3	38,1
0,4	10500000	94500000	10,5	94,5
0,5	6760000	60600000	6,8	60,6
0,6	1830000	16200000	1,8	16,2
0,999	640791	5440000	0,6	5,4

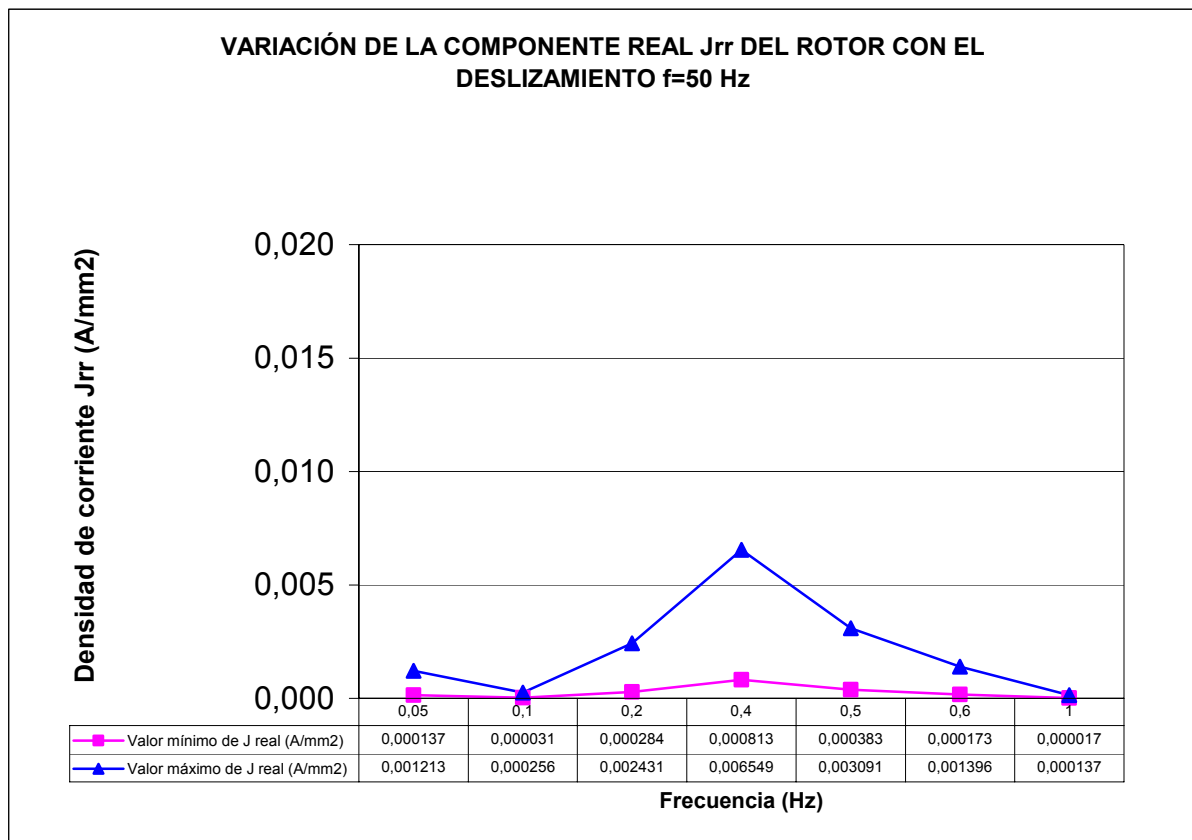


Figura 140. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=50$  Hz.

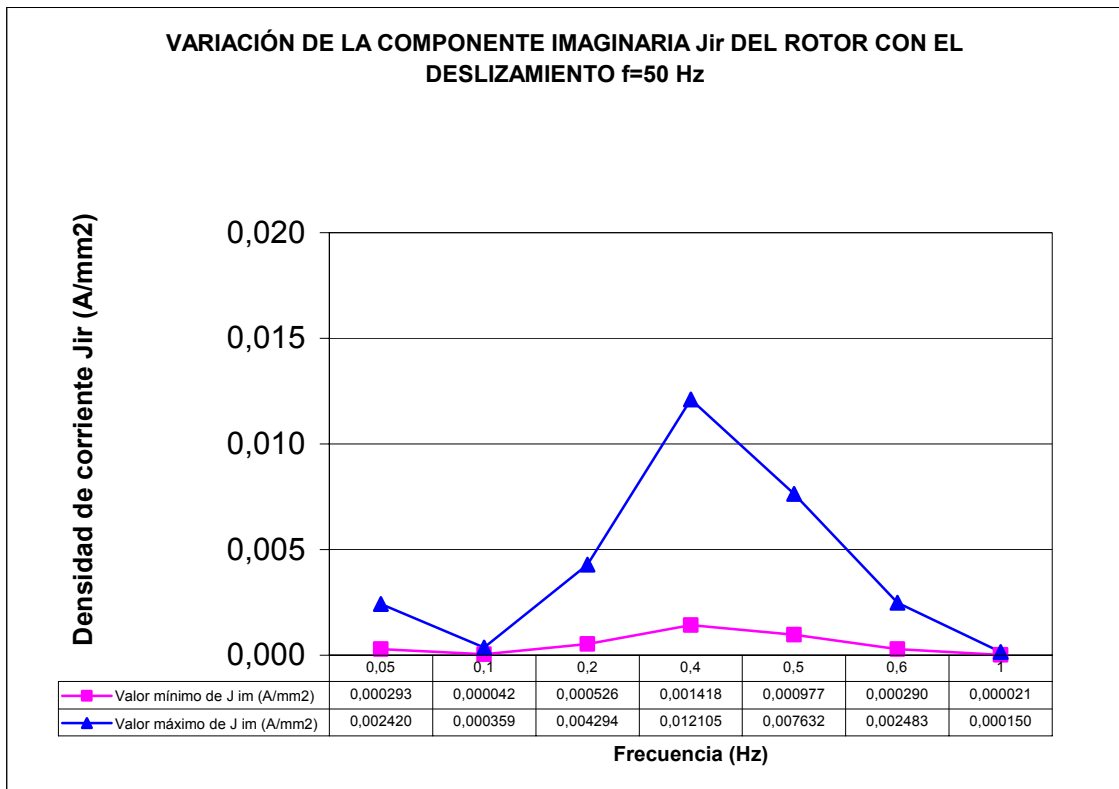


Figura 141. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=50$ Hz.

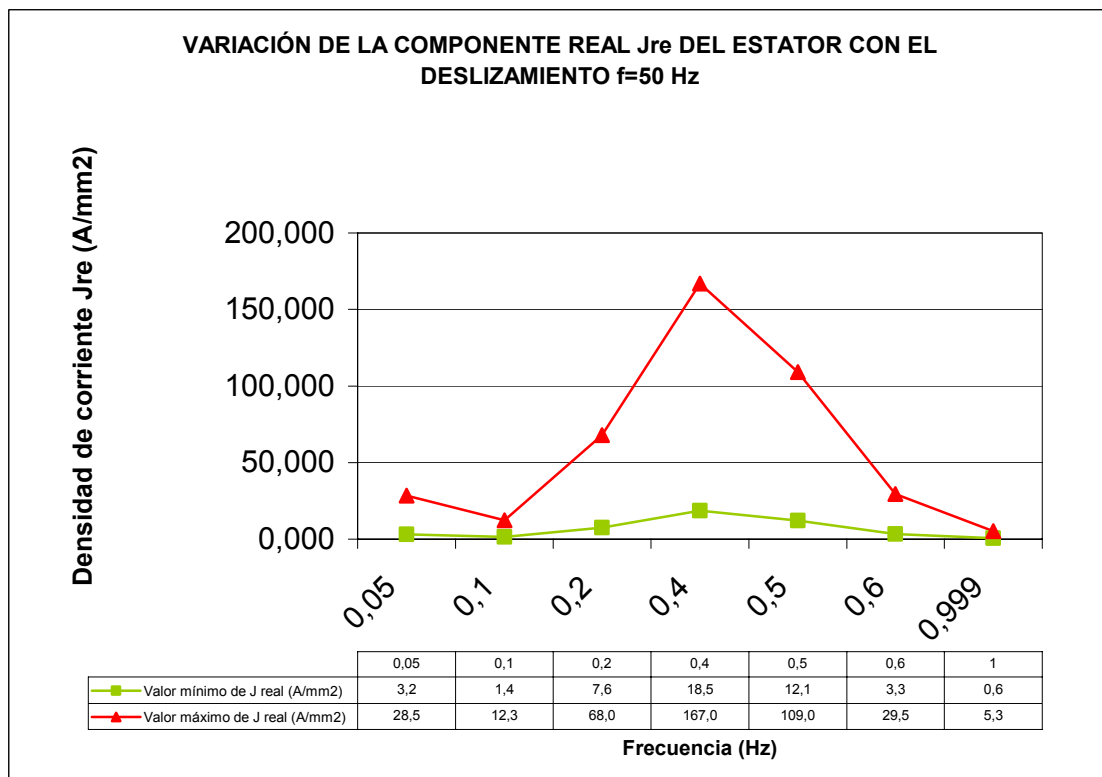


Figura 142. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=50$ Hz.

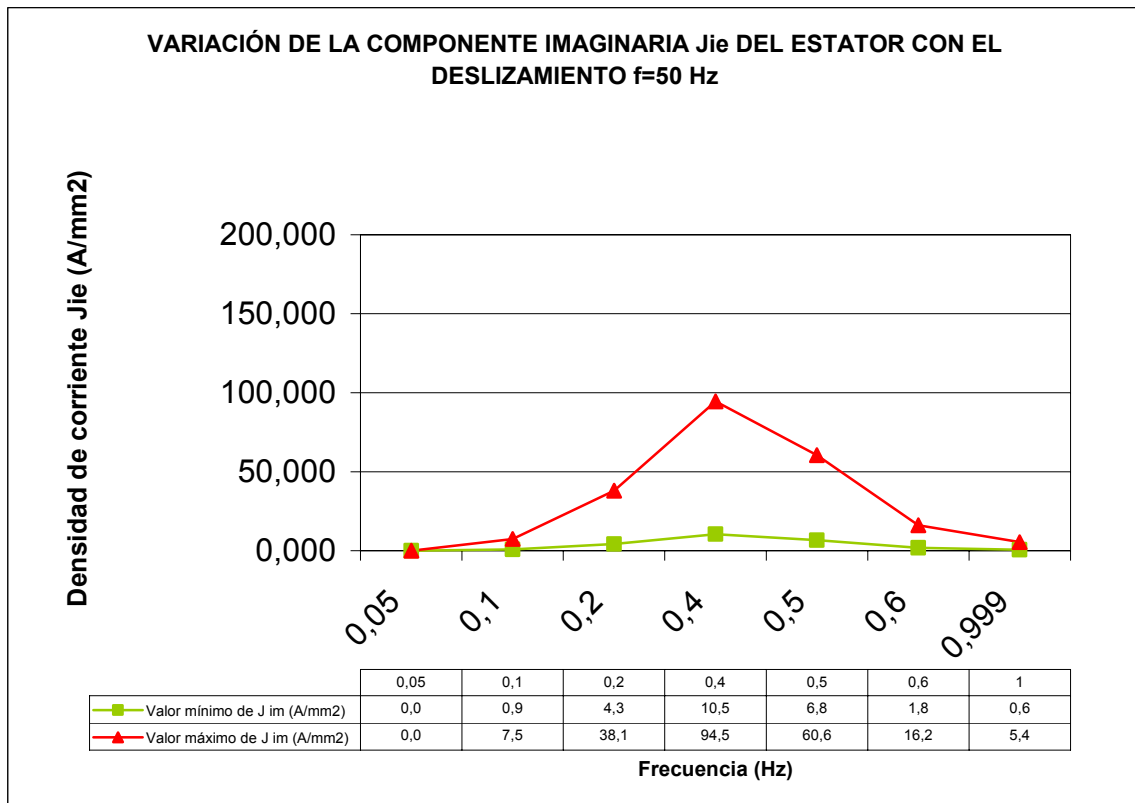


Figura 143. Densidad de corriente reactiva en el estator  $J_{ie}=f(s)$  para  $f=50$ Hz.

**7.2.3. Valores para f=100 Hz y variación de s**

f=100Hz				
<b>Jr ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	110,35	933,75	0,000110	0,000934
0,2	85,138	687,004	0,000085	0,000687
0,5	55,32	487,35	0,000055	0,000487
0,999	77,05	631,64	0,000077	0,000632

f=100Hz				
<b>Ji ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	189,19	1607,00	0,000189	0,001607
0,2	93,52	730,14	0,000094	0,000730
0,5	81,11	698,12	0,000081	0,000698
0,999	159,86	1321,00	0,000160	0,001321

f=100Hz				
<b>Jr ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	1950000	17600000	2,0	17,6
0,2	978122	8800000	1,0	8,8
0,5	621047	5990000	0,6	6,0
0,999	1160000	10400000	1,2	10,4

f=100Hz				
<b>Ji ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	1290000	11300000	1,3	11,3
0,2	580306	5100000	0,6	5,1
0,5	582681	4950000	0,6	5,0
0,999	761465	6490000	0,8	6,5

f=100Hz				
<b>Br ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00004	0,0003	35	313,71
0,2	0,00001	0,0001	11,4	96,3
0,5	0,00001	0,0001	6,79	50,8
0,999	0,00002	0,0002	22,5	179

f=100Hz				
<b>Bi ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00002	0,00019	20,8	187
0,2	0,00001	0,00009	10,5	88,6
0,5	0,00001	0,00005	6,26	52,8
0,999	0,00001	0,00009	10,8	87



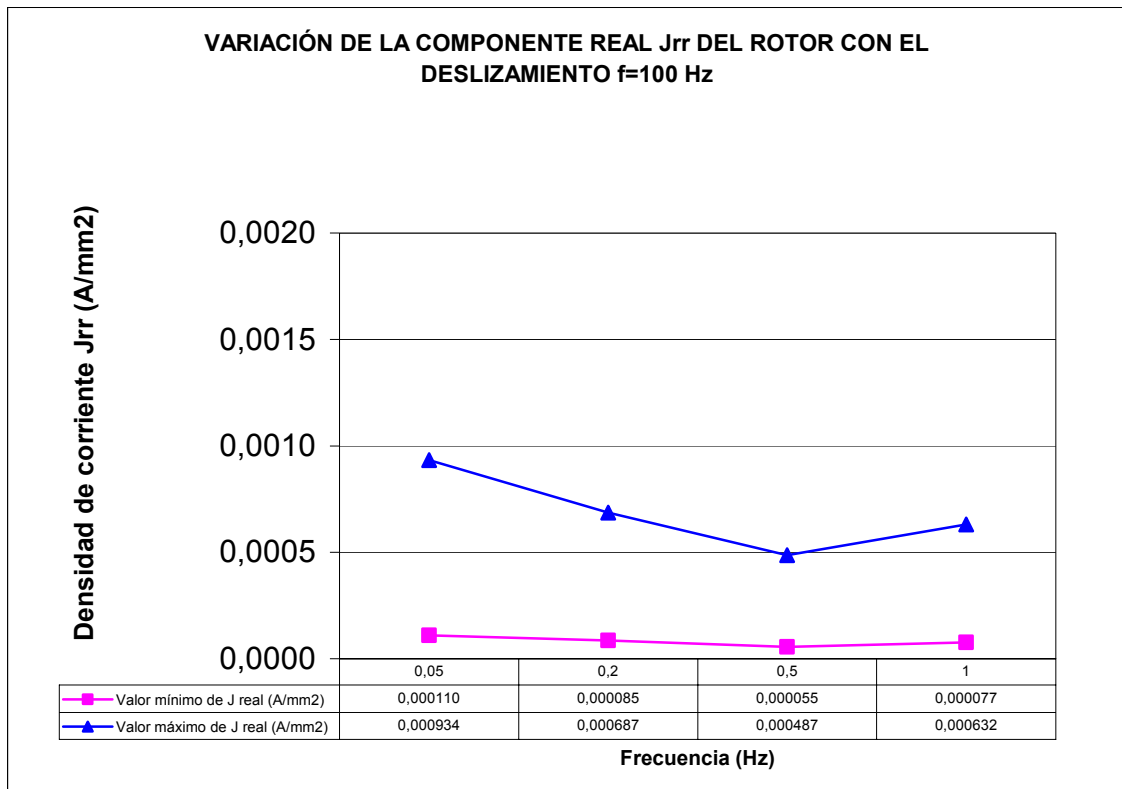


Figura 144. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=100$  Hz.

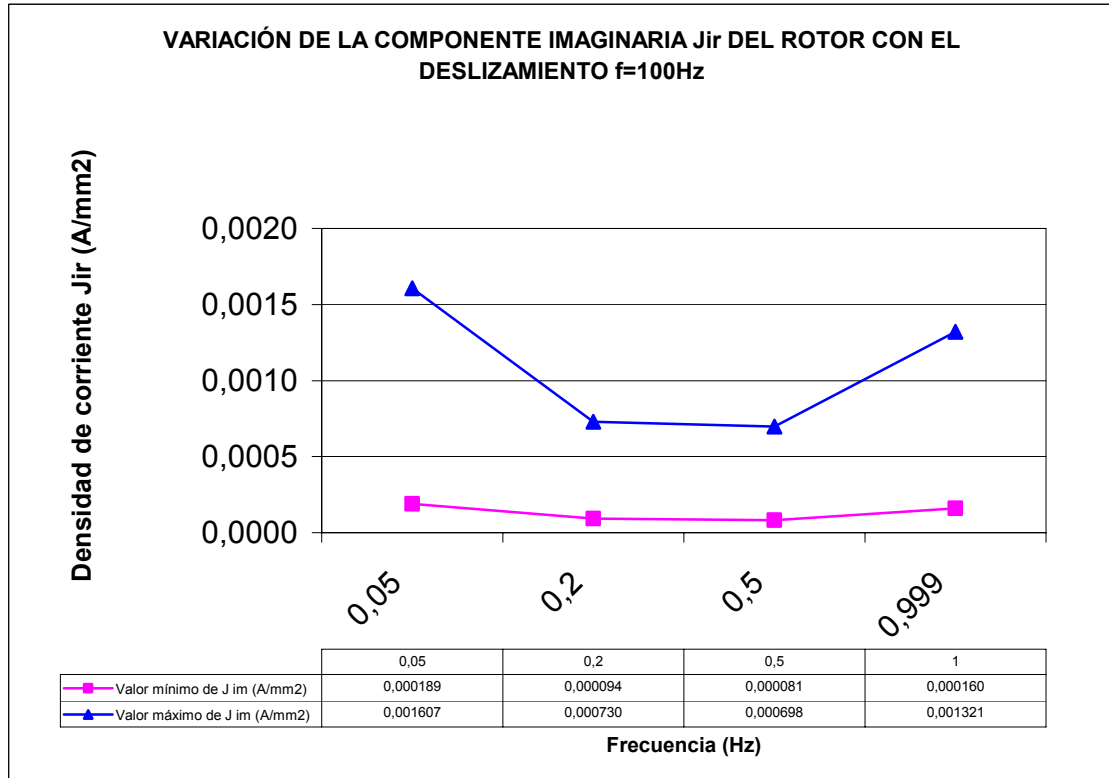


Figura 145. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=100$  Hz.

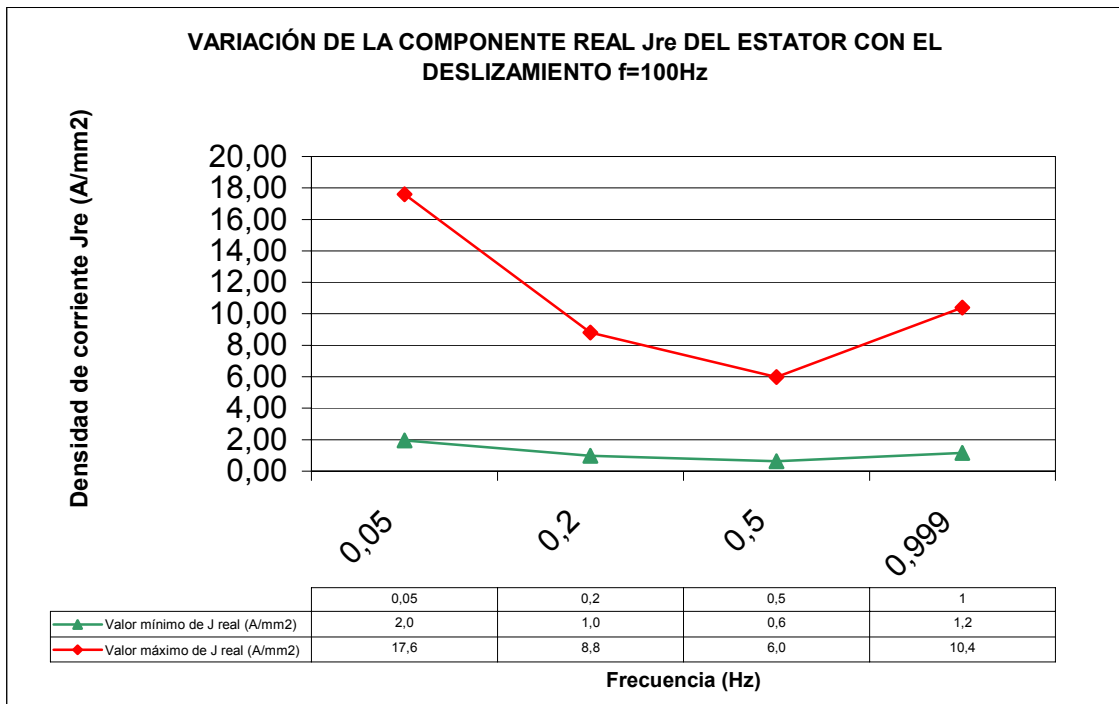


Figura 146. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=100\text{Hz}$ .

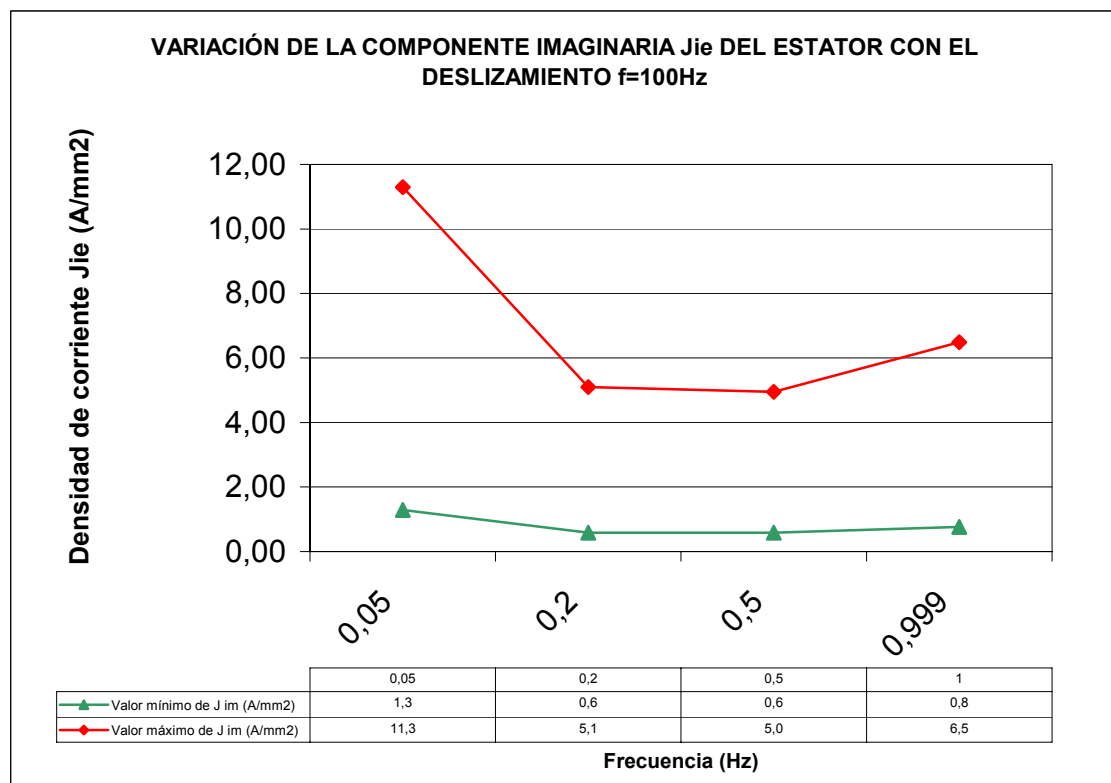


Figura 147. Densidad de corriente reactiva en el estator  $J_{ie}=f(s)$  para  $f=100\text{Hz}$ .

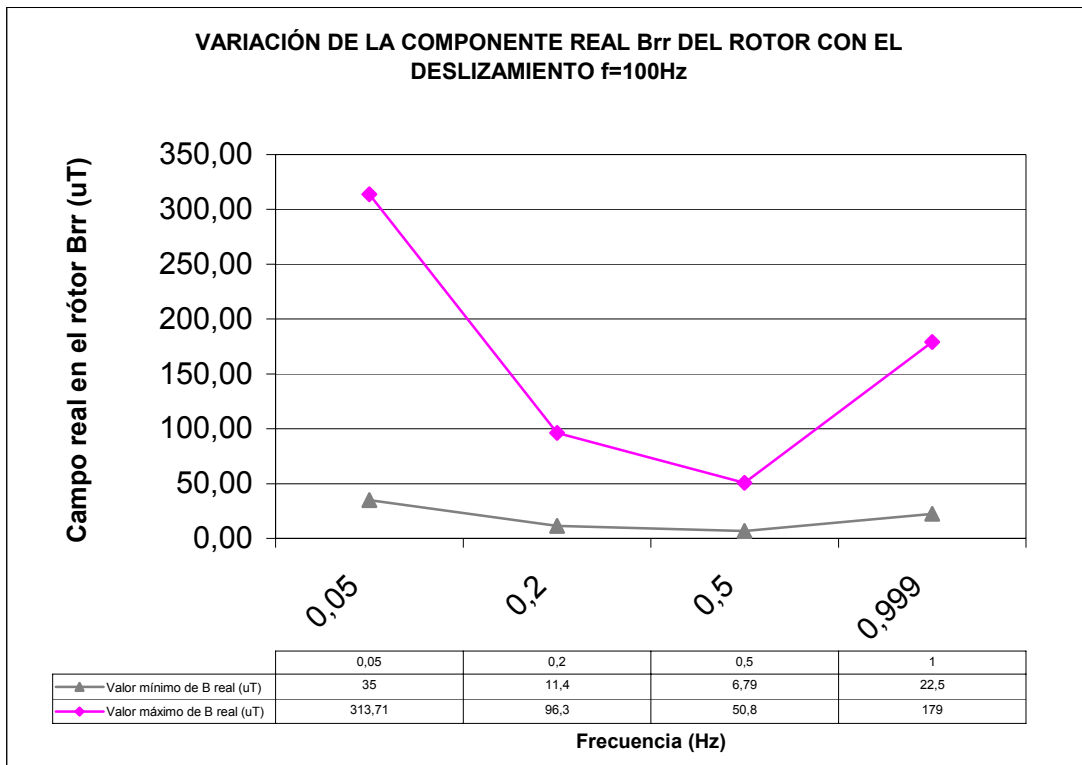


Figura 148. Campo real en el rotor  $B_{rr}=f(s)$  para  $f=100\text{Hz}$ .

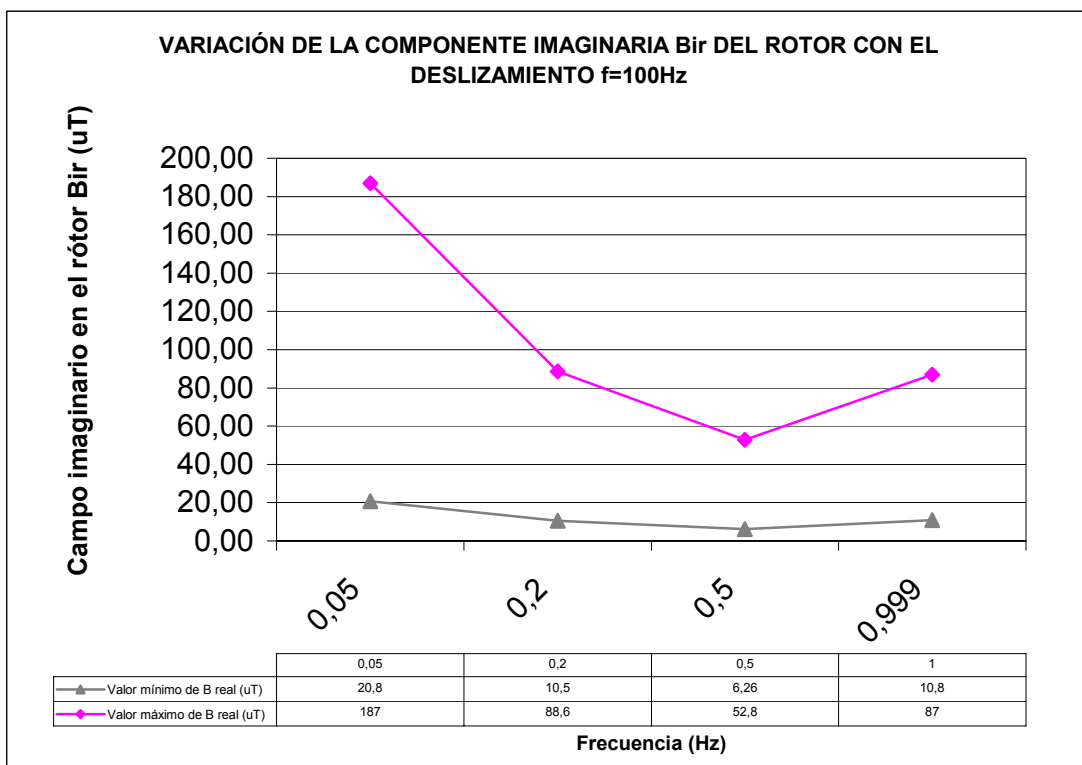


Figura 149. Campo imaginario en el rotor  $B_{ir}=f(s)$  para  $f=100\text{Hz}$ .

**7.2.4. Valores para  $f=300$  Hz y variación de  $s$**

f=300Hz				
<b>Jr ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	642,79	5407,00	0,000643	0,005407
0,2	819,197	7157	0,000819	0,007157
0,5	680,25	5139,00	0,000680	0,005139
0,999	1397,00	11727,00	0,001397	0,011727

f=300Hz				
<b>Ji ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	765,89	6436,00	0,000766	0,006436
0,2	1982,00	16696,00	0,001982	0,016696
0,5	655,71	5392,00	0,000656	0,005392
0,999	655,71	5392,00	0,000656	0,005392

f=300Hz				
<b>Jr ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	3620000	32600000	3,6	32,6
0,2	2690000	23800000	2,7	23,8
0,5	1590000	14200000	1,6	14,2
0,999	4790000	43100000	4,8	43,1

f=300Hz				
<b>Ji ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	2420000	21100000	2,4	21,1
0,2				
0,5				
0,999	2770000	24500000	2,8	24,5

f=300Hz				
<b>Br ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00001	0,0001	7,42	60,7
0,2	0,00006	0,0005	60,7	520
0,5	0,00003	0,0002	27,3	238
0,999				

f=300Hz				
<b>Bi ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00001	0,00004	5,06	42,5
0,2	0,00004	0,00030	37,3	304
0,5	0,00003	0,00021	30,3	213
0,999				

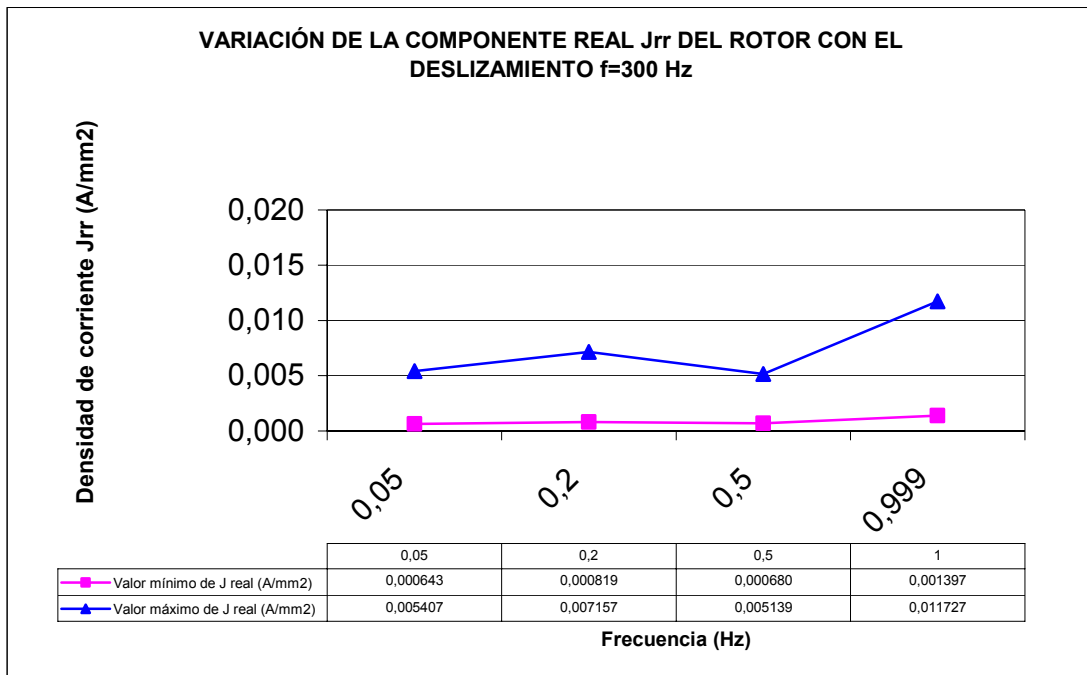


Figura 150. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=300$  Hz.

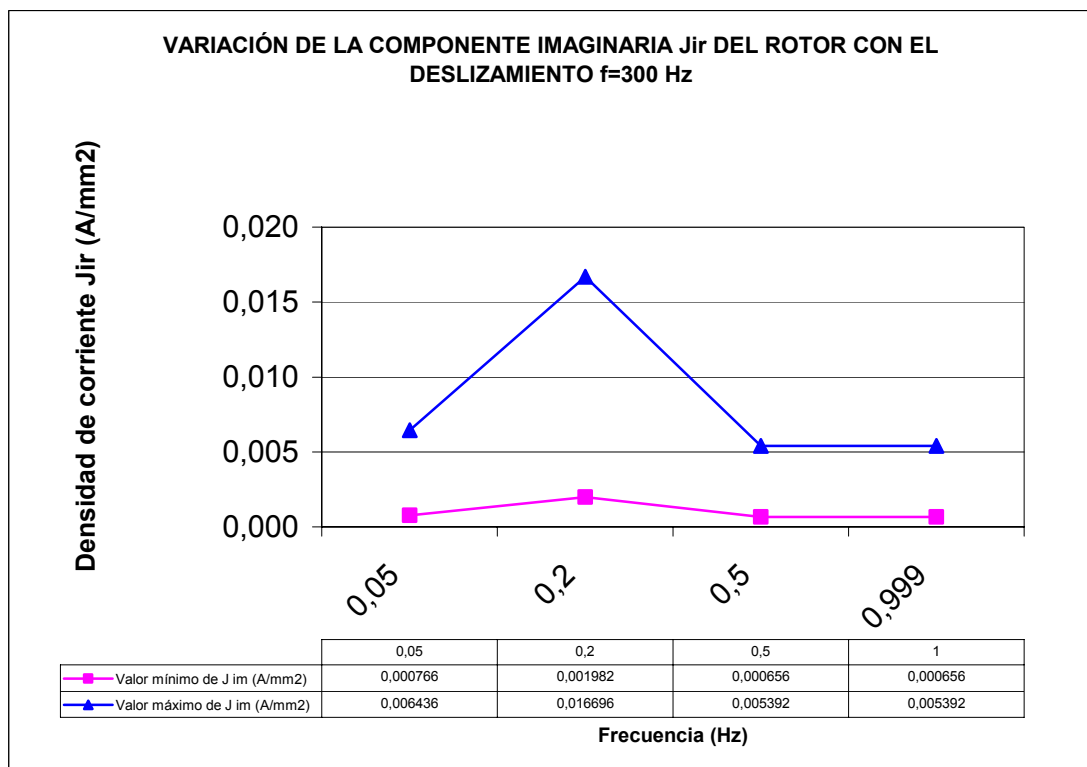


Figura 151. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=300$  Hz.

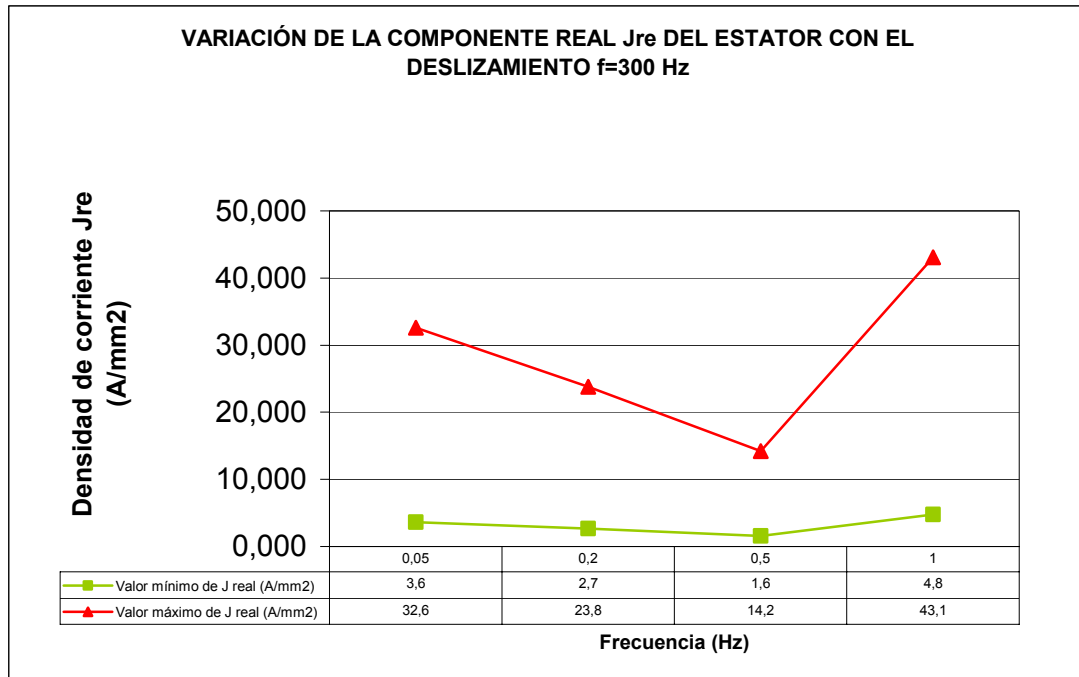


Figura 152. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=300$ Hz.

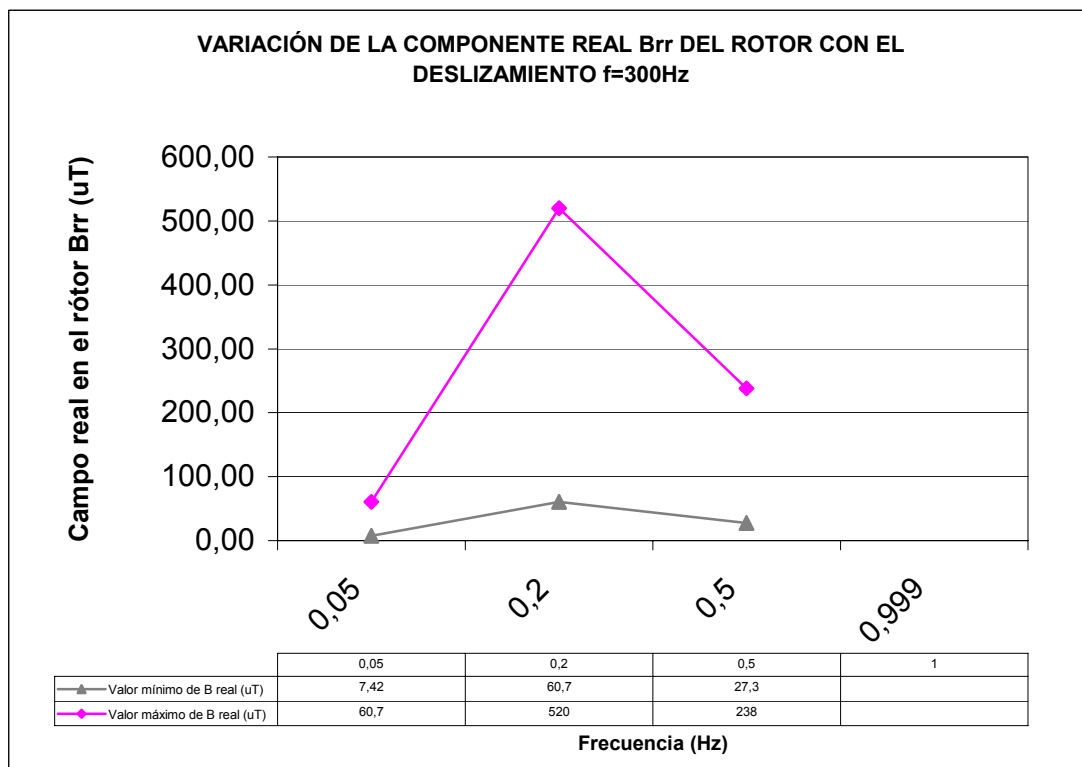
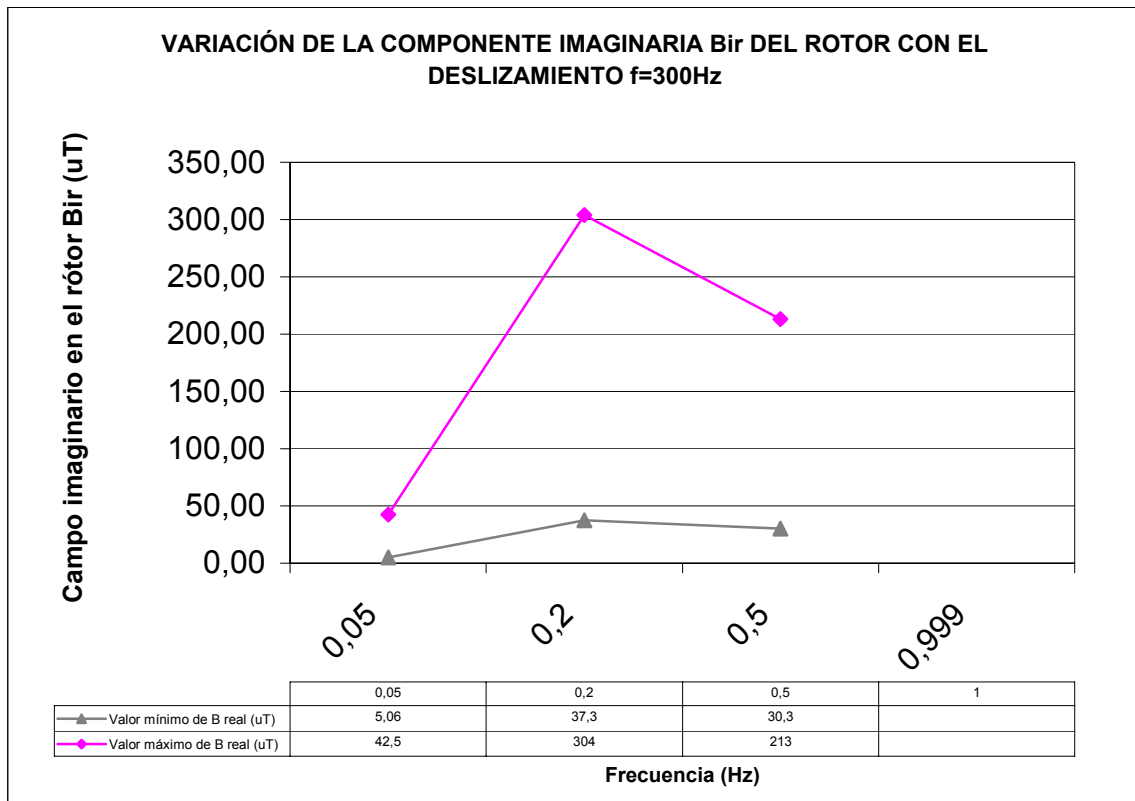


Figura 153. Campo real en el rotor  $B_{rr}=f(s)$  para  $f=300$ Hz.



**Figura 154. Campo imaginario en el rotor  $B_{ir}=f(s)$  para  $f=300\text{Hz}$ .**



7.2.5. Valores para  $f=500$  Hz y variación de  $s$

f=500Hz				
Jr ROTOR				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	13448,00	85740,00	0,013448	0,085740
0,2	3265	24545	0,003265	0,024545
0,5	2146,00	17068,00	0,002146	0,017068
0,999	575,94	4413,00	0,000576	0,004413

f=500Hz				
Ji ROTOR				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	6319,00	48338,00	0,006319	0,048338
0,2	5799,00	47330,00	0,005799	0,047330
0,5	4216,00	26573,00	0,004216	0,026573
0,999	211,87	1745,00	0,000212	0,001745

f=500Hz				
Jr ESTATOR				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05				
0,2	4950000	44500000	5,0	44,5
0,5	5750000	51800000	5,8	51,8
0,999	924126	8310000	0,9	8,3

f=500Hz				
Ji ESTATOR				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05				
0,2	5580000	49500000	5,6	49,5
0,5				
0,999	2610000	23100000	2,6	23,1

f=500Hz				
Br ROTOR				
s	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05				
0,2	0,00008	0,0007	83,2	663
0,5	0,00006	0,0004	58,3	396
0,999				

f=500Hz				
Bi ROTOR				
s	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05				
0,2	0,00019	0,00133	189	1329
0,5	0,00003	0,00023	30,3	229
0,999				

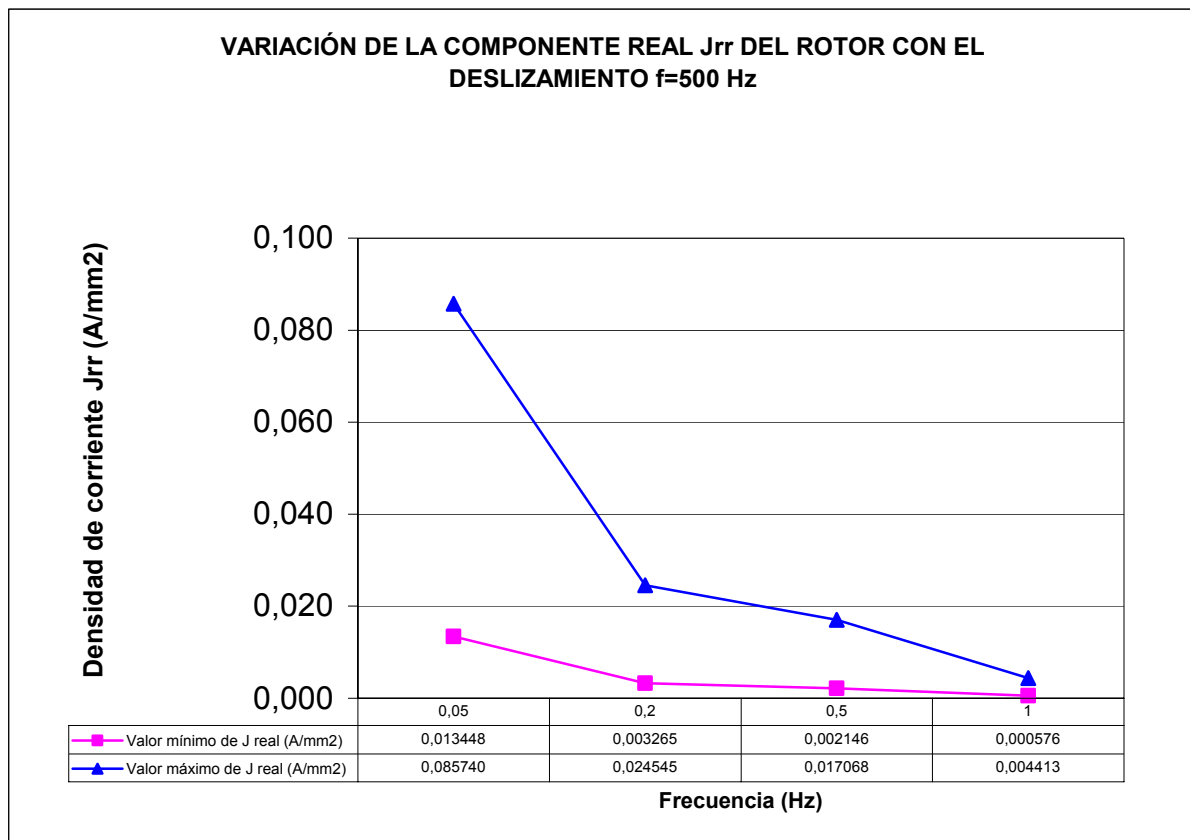


Figura 155. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=500$  Hz.

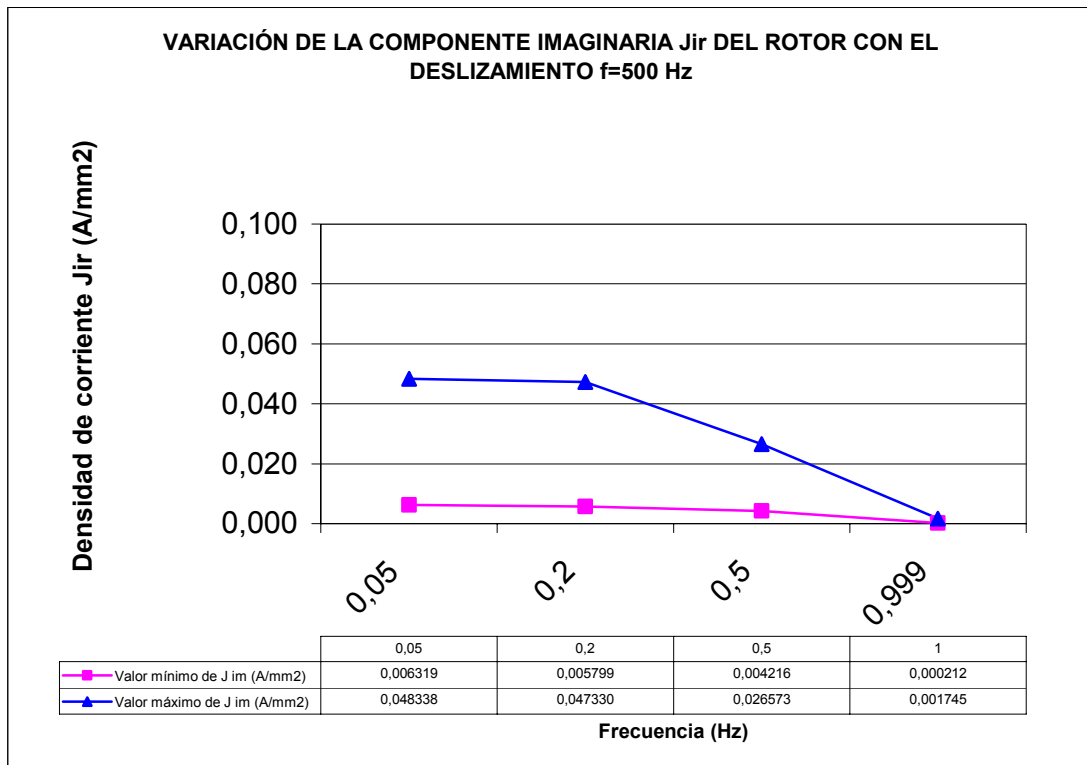


Figura 156. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=500$  Hz.

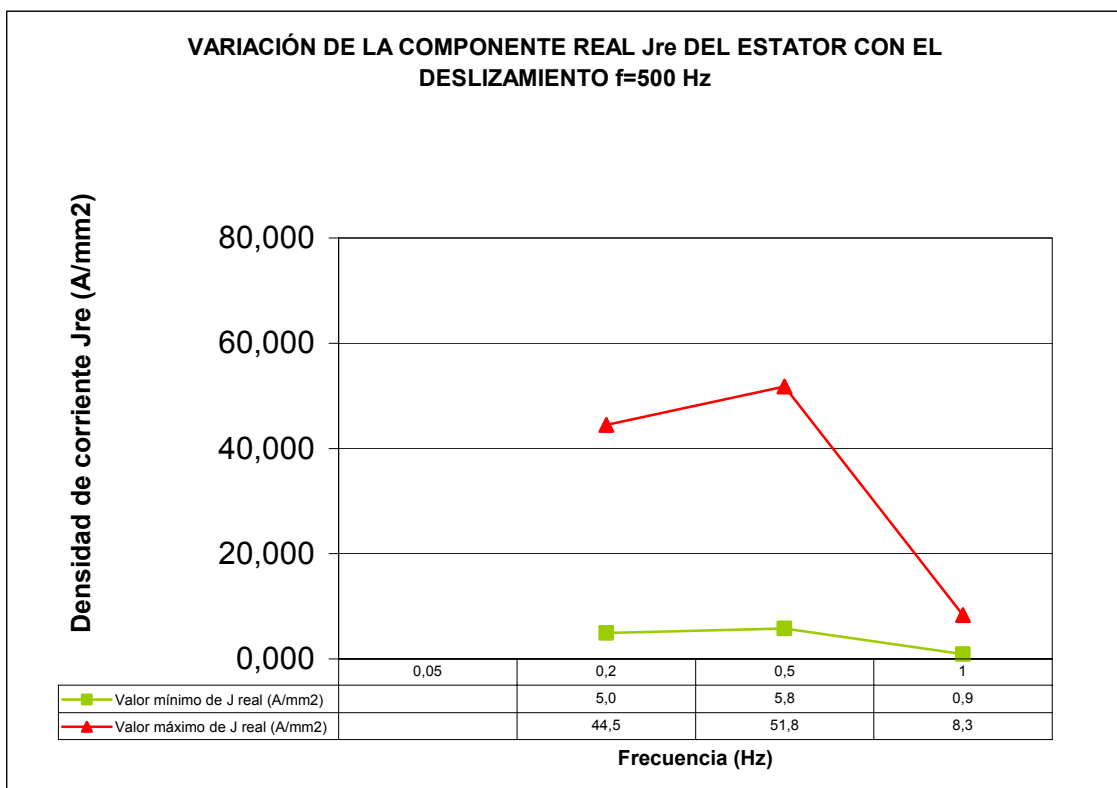


Figura 157. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=500$  Hz.

**7.2.6. Valores para  $f=1000$  Hz y variación de  $s$**

f=1000Hz				
Jr ROTOR				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	9092,00	68209,00	0,009092	0,068209
0,2	4171	34709	0,004171	0,034709
0,5	1031,00	8046,00	0,001031	0,008046
0,999	5875,00	38947,00	0,005875	0,038947

f=1000Hz				
Ji ROTOR				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	12106,00	82632,00	0,012106	0,082632
0,2	5768,00	49087,00	0,005768	0,049087
0,5	1352,00	11887,00	0,001352	0,011887
0,999	2421,00	17346,00	0,002421	0,017346

f=1000Hz				
Jr ESTATOR				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	7450000	67000000	7,5	67,0
0,2	840619	7450000	0,8	7,5
0,5	1380000	12300000	1,4	12,3
0,999	4060000	36500000	4,1	36,5

f=1000Hz				
Ji ESTATOR				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	4350000	38900000	4,4	38,9
0,2	7240000	64800000	7,2	64,8
0,5	1430000	12600000	1,4	12,6
0,999	2480000	21700000	2,5	21,7

f=1000Hz				
Br ROTOR				
s	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00012	0,0010	122	1003
0,2	0,00001	0,0001	8,79	73,5
0,5	0,00001	0,0001	13,5	114
0,999	0,00002	0,0002	24,1	179

f=1000Hz				
Bi ROTOR				
s	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00010	0,00083	95,2	834
0,2	0,00012	0,00099	118	988
0,5	0,00002	0,00013	15,7	129
0,999	0,00006	0,00036	62,7	362

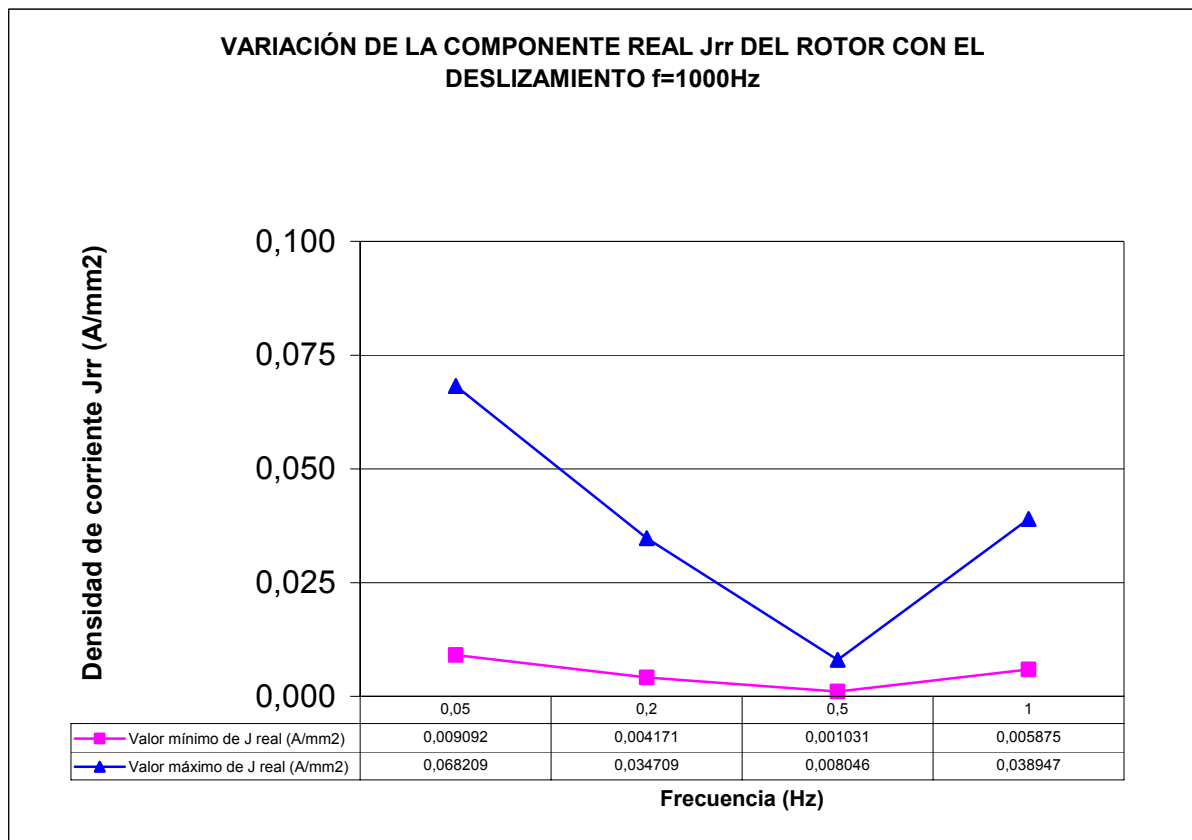


Figura 158. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=1000\text{ Hz}$ .

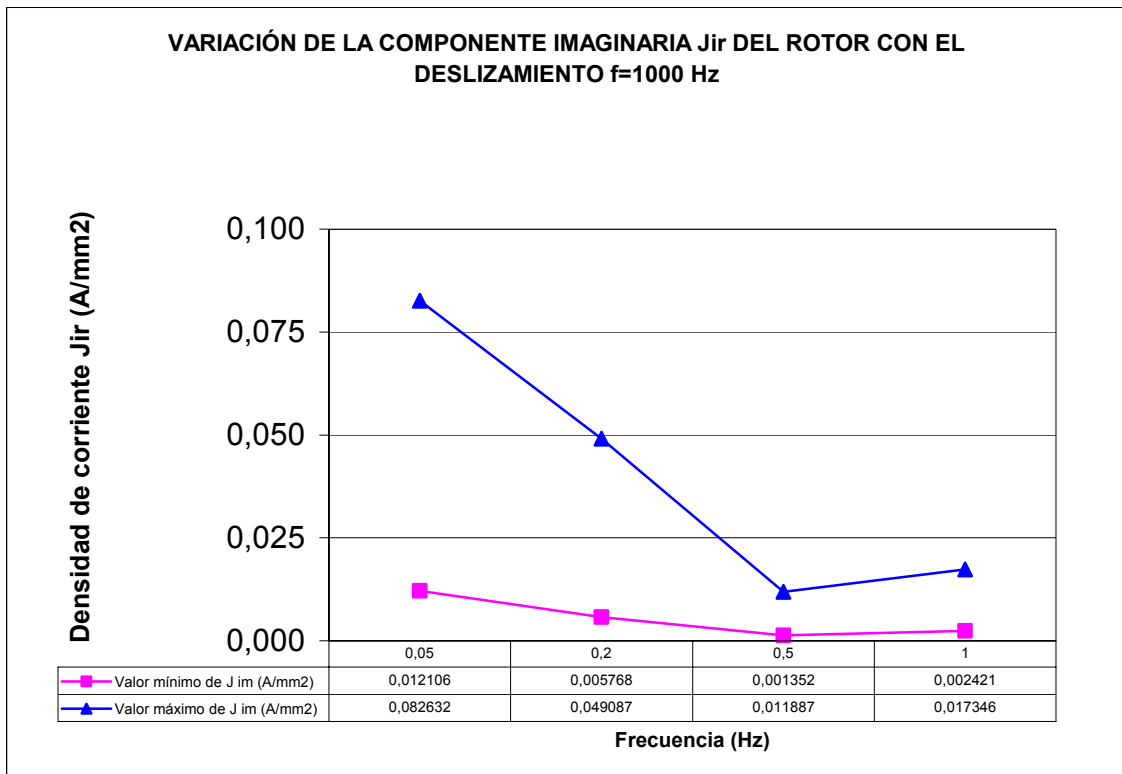


Figura 159. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=1000$  Hz.

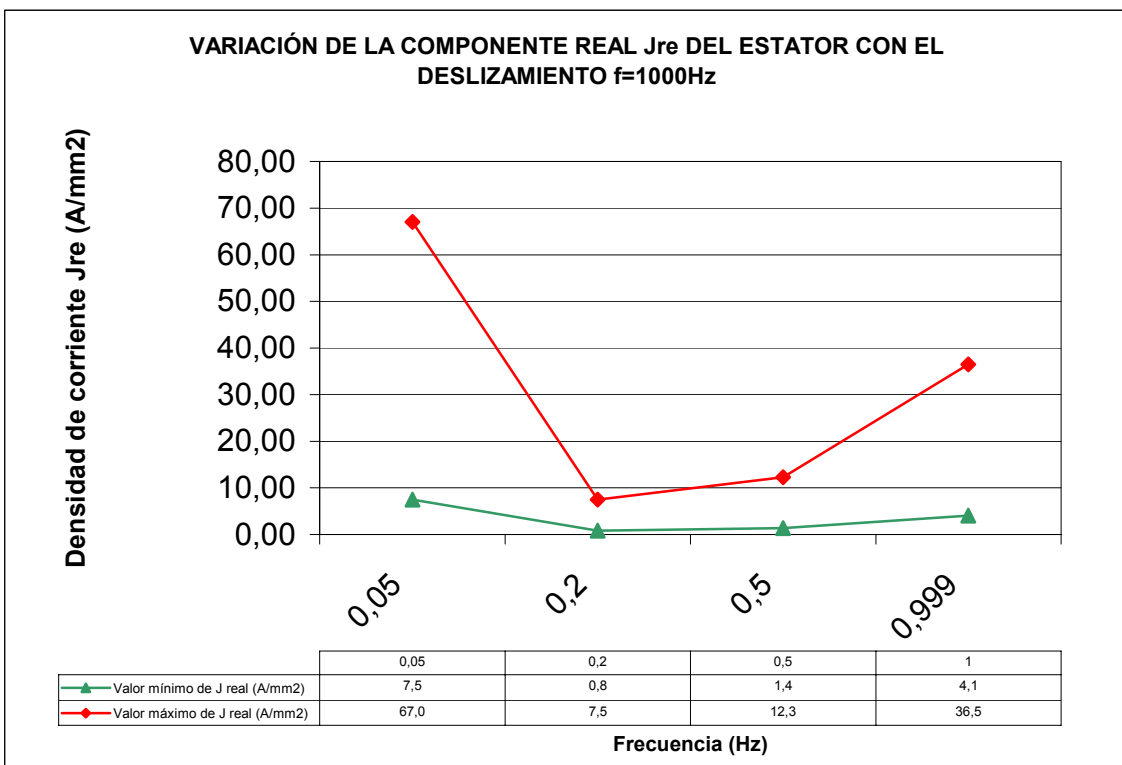


Figura 160. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=1000$ Hz.

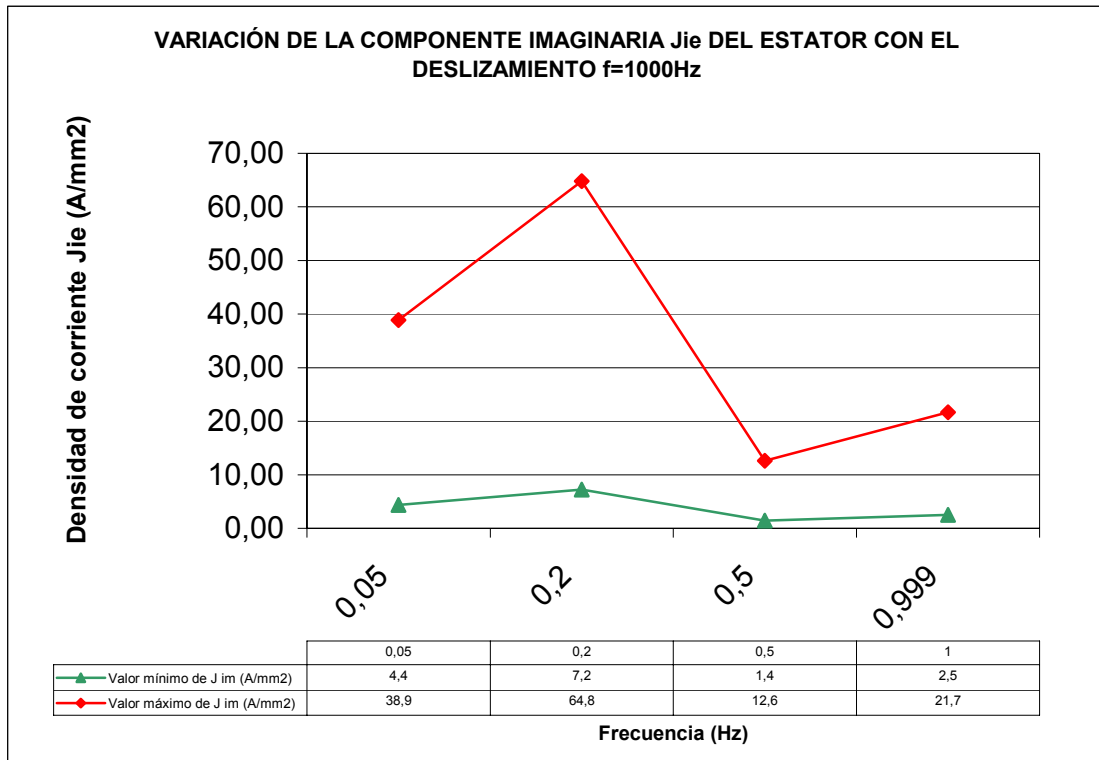


Figura 161. Densidad de corriente reactiva en el estator  $J_{ie}=f(s)$  para  $f=1000\text{Hz}$ .

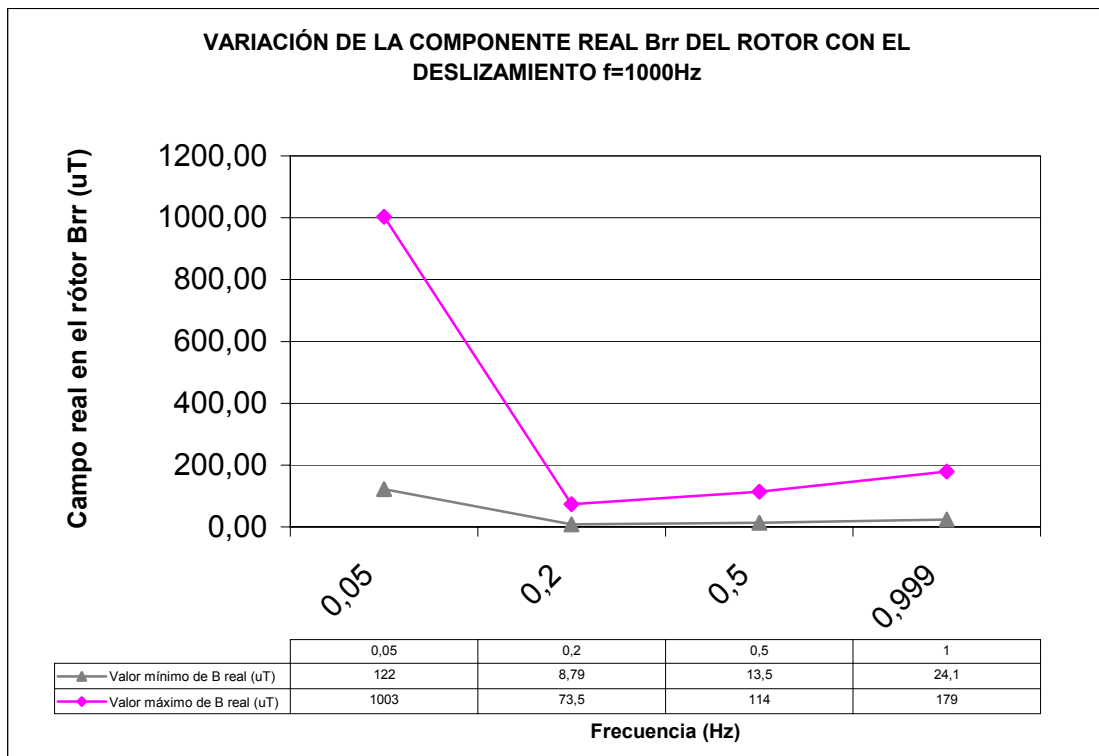
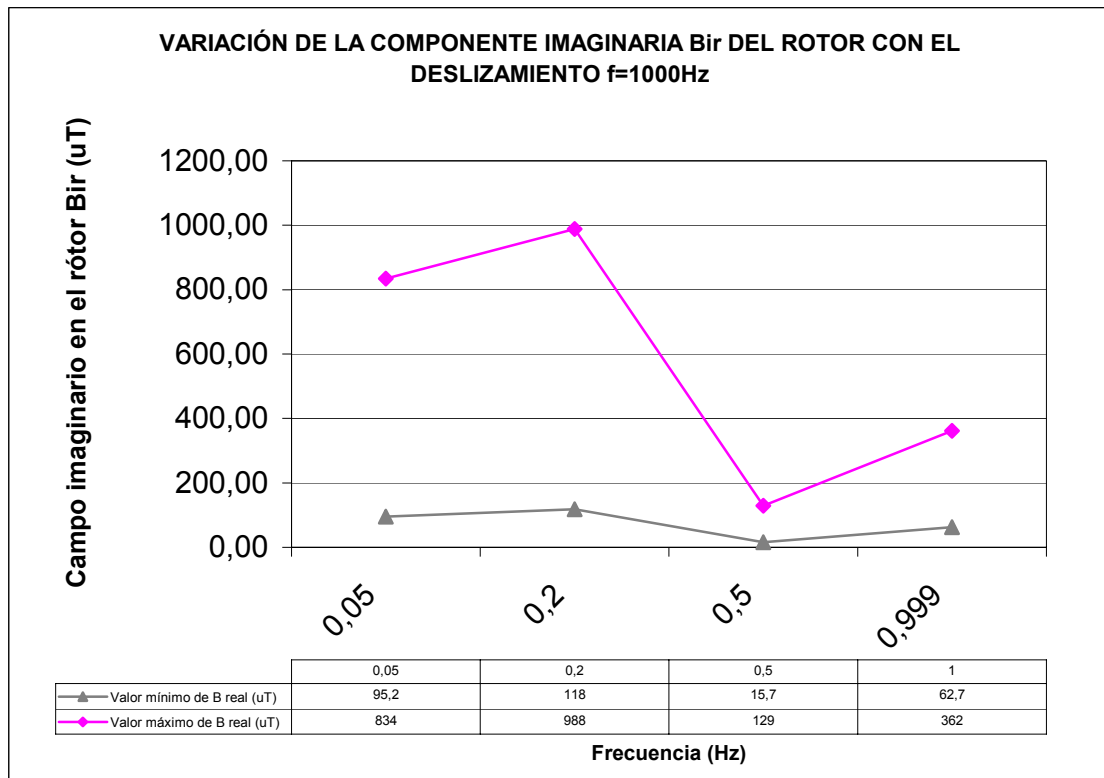


Figura 162. Campo real en el rotor  $B_{rr}=f(s)$  para  $f=1000\text{Hz}$ .



**Figura 163. Campo imaginario en el rotor  $B_{ir}=f(s)$  para  $f=1000\text{Hz}$ .**



**7.2.7. Valores para f=3000 Hz y variación de s**

f=3000Hz				
<b>Jr ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	17752,00	154304,00	0,017752	0,154304
0,2	3893	32950	0,003893	0,032950
0,5	1887,00	16028,00	0,001887	0,016028
0,999	10576,00	79576,00	0,010576	0,079576

f=3000Hz				
<b>Ji ROTOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	28253,00	209703,00	0,028253	0,209703
0,2	2152,00	17468,00	0,002152	0,017468
0,5	2359,00	21052,00	0,002359	0,021052
0,999	3240,00	23544,00	0,003240	0,023544

f=3000Hz				
<b>Jr ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J real (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J real (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	5770000	51900000	5,8	51,9
0,2	1070000	9590000	1,1	9,6
0,5	776454	6890000	0,8	6,9
0,999				

f=3000Hz				
<b>Ji ESTATOR</b>				
s	Valor mínimo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/m <sup>2</sup> )	Valor mínimo de J im (A/mm <sup>2</sup> )	Valor máximo de J im (A/mm <sup>2</sup> )
0,05	6080000	53300000	6,1	53,3
0,2	1220000	10000000	1,2	10,0
0,5	1430000	12000000	1,4	12,0
0,999				

f=3000Hz				
Br ROTOR				
s	Valor mínimo de B real (T)	Valor máximo de B real (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00006	0,0005	62,7	540
0,2	0,00001	0,0001	12,3	86,3
0,5	0,00002	0,0001	17	140
0,999				

f=3000Hz				
Bi ROTOR				
s	Valor mínimo de B im (T)	Valor máximo de B im (T)	Valor mínimo de B real (uT)	Valor máximo de B real (uT)
0,05	0,00005	0,00036	51,1	362
0,2	0,00002	0,00014	16,8	140
0,5	0,00001	0,00007	10,3	74,4
0,999				

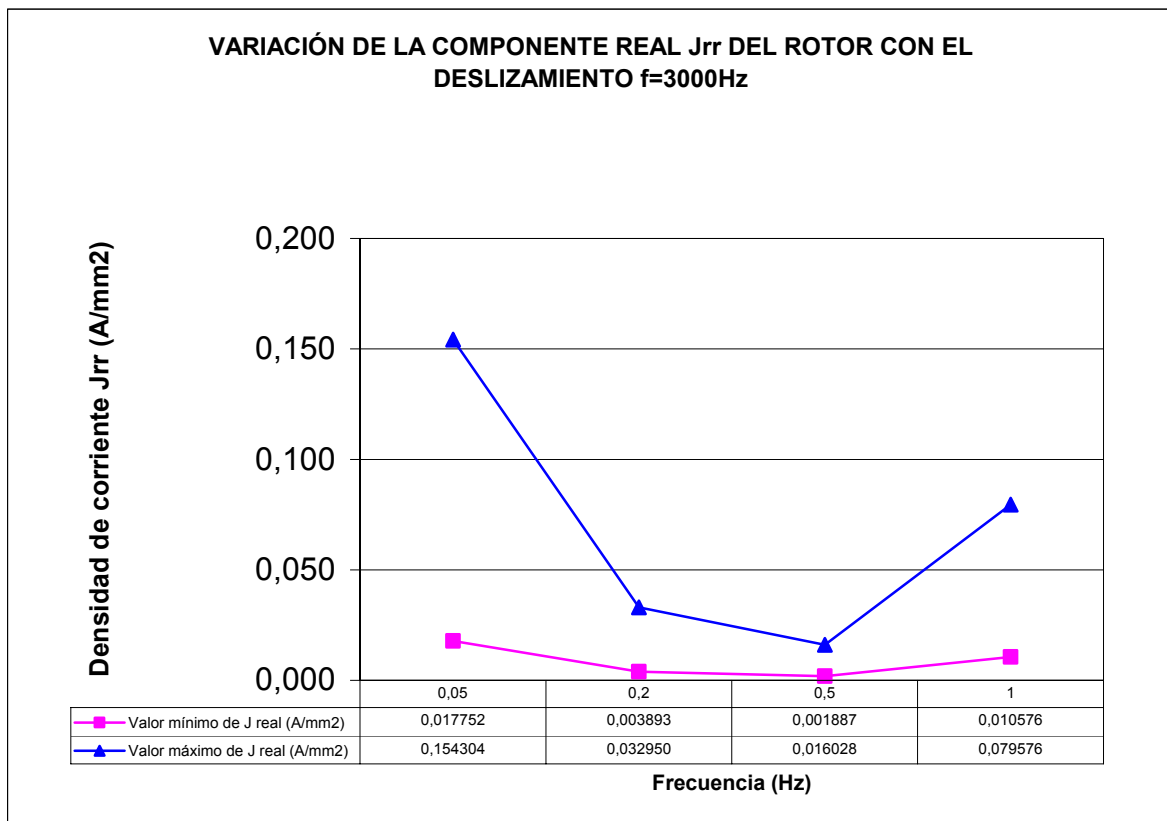


Figura 164. Densidad de corriente activa en el rotor  $J_{rr}=f(s)$  para  $f=3000\text{ Hz}$ .

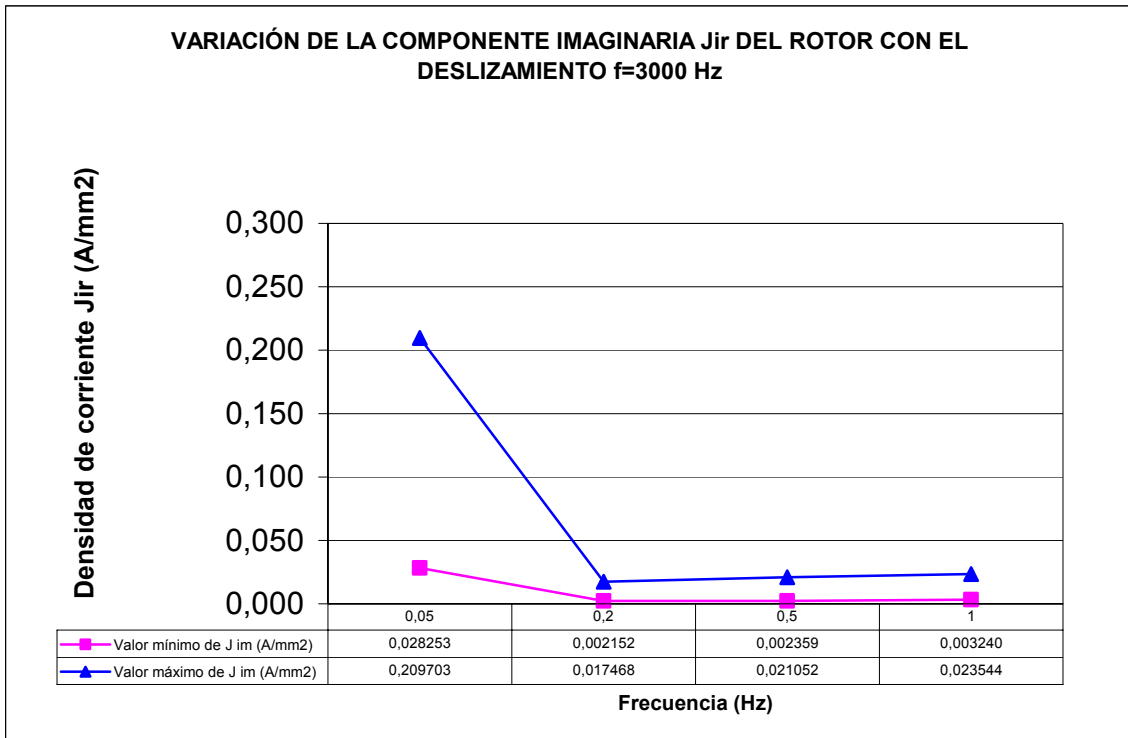


Figura 165. Densidad de corriente reactiva en el rotor  $J_{ir}=f(s)$  para  $f=3000$  Hz.

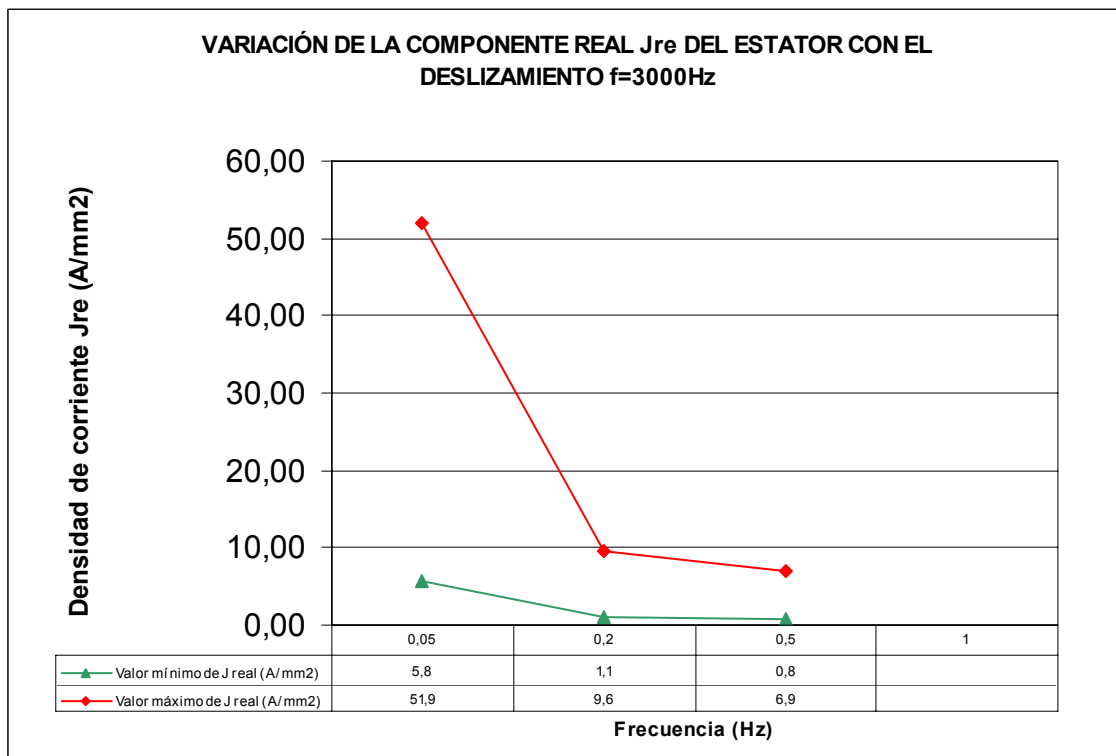


Figura 166. Densidad de corriente activa en el estator  $J_{re}=f(s)$  para  $f=3000$  Hz.

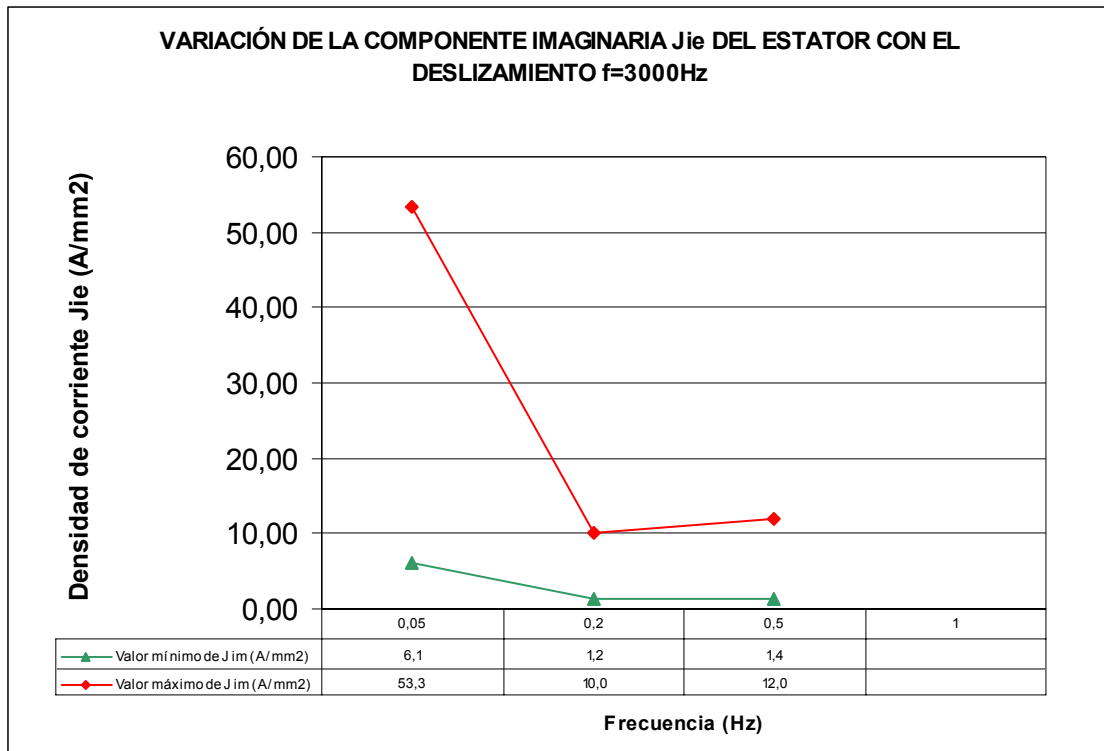


Figura 167. Densidad de corriente reactiva en el estator  $J_{ie}=f(s)$  para  $f=3000\text{Hz}$ .

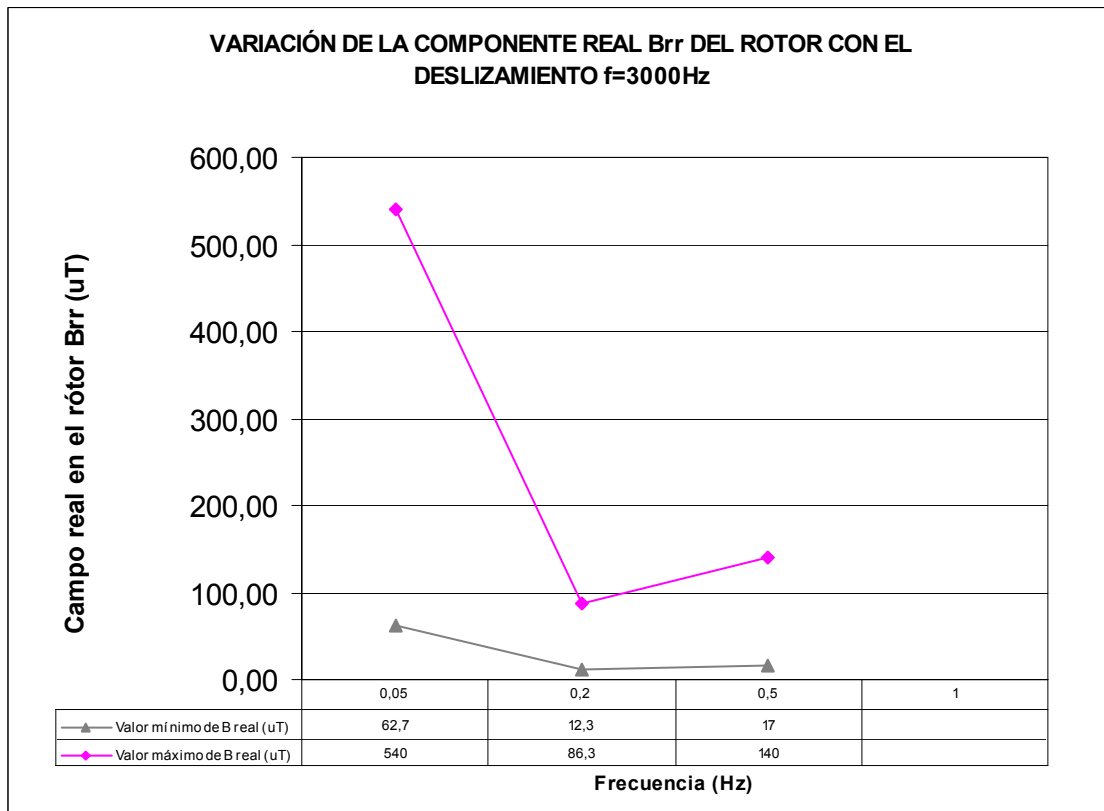


Figura 168. Campo real en el rotor  $B_{rr}=f(s)$  para  $f=3000\text{Hz}$ .

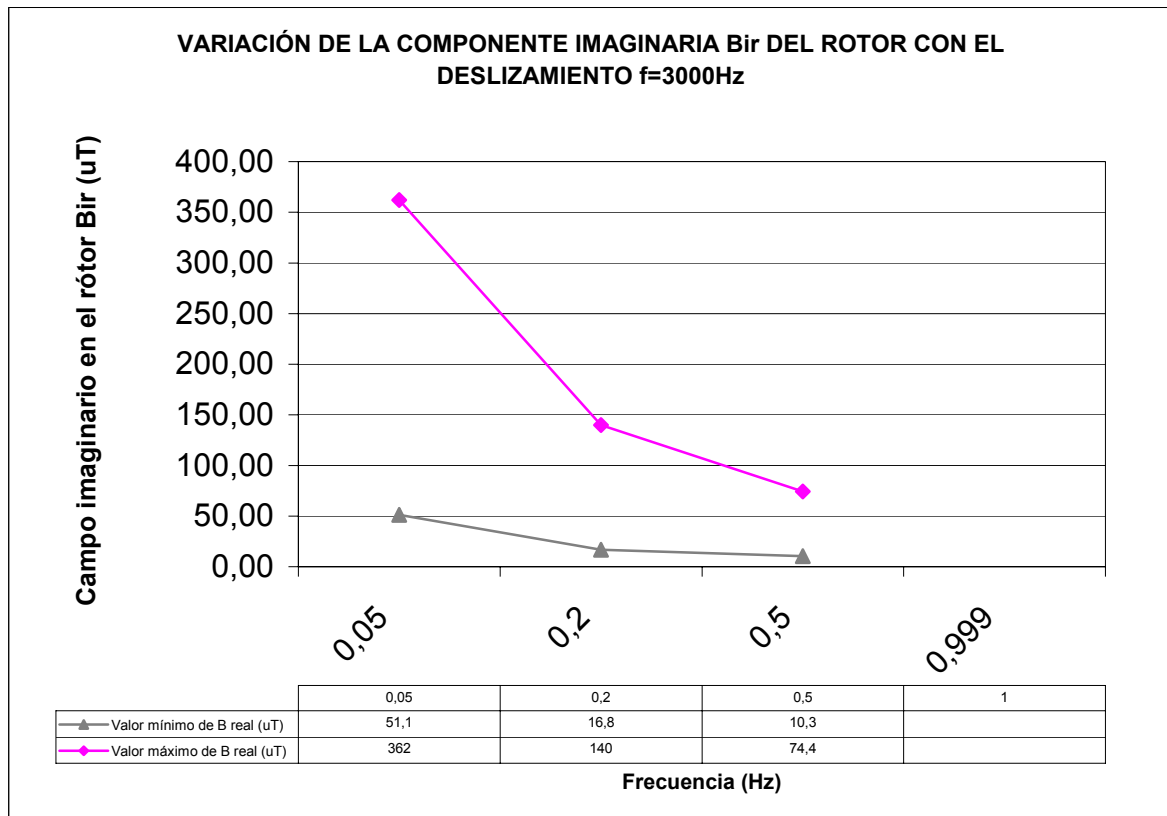


Figura 169. Campo imaginario en el rotor  $B_{ir}=f(s)$  para  $f=3000\text{Hz}$ .

### **7.3. Comentario y Análisis de los resultados.**

En este apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos, describiendo con detalle la aparición de bucles de corriente en forma de 8 y otras formas no abordables intuitivamente. Se concluye que es recomendable la implementación de ranuras en el rotor de este tipo de máquinas con el fin de evitar la formación de estos bucles, se analiza así mismo los valores de frecuencia más recomendables para el tipo de geometría analizada, que estaría entre los 100-500 Hz, llegando hasta los 1000 Hz.

Para un correcto análisis de los resultados, es imprescindible alternar las tablas y gráficos anteriores con los resultados mostrados en el apéndice de la tesis, puesto que es tan importante el valor, como la forma que adquieren las diferentes magnitudes magnéticas representadas. No se puede olvidar en ningún momento que el problema es tridimensional.

#### **7.3.1. Variación de $f$ manteniendo el deslizamiento del rotor $s=0.05$ .**

Como se puede observar de los resultados, las mayores corrientes, para la geometría estudiada, se inducen en el rotor para valores de frecuencia de 500 y 3000 Hz (figuras 134 a 139), que son, a su vez, las frecuencias para las que se presentan las mayores líneas de corriente, así como un único bucle de corriente bien definido (ver figuras 198-199 y 218-219).

Para la frecuencia industrial de 50Hz, se observa una clara separación entre la parte inferior y superior del rotor, donde aparecen bucles de sentido opuesto, efecto que se verá modificado al aumentar el deslizamiento (ver figuras 172-173).

Para  $f=1000$  Hz, se presenta también un único bucle de corriente bien definido, pero de valores máximos menores (ver figuras 202-203).

Para el resto de frecuencias se puede observar cómo se forman bucles de corrientes que giran en sentidos opuestos, que es signo de menores pares de giro de la máquina (figuras 177-178, 185-186, 191-192, 210-211).

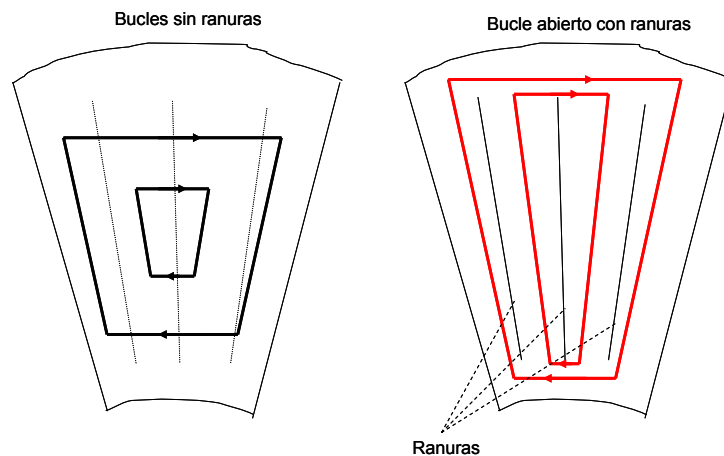
Para un valor de  $f$  de 100Hz se presentan claramente un bucle interior y otro exterior, que generan pares de signo opuesto, por lo que se debería evitar (figura 175-176). Para 200 Hz aparece un tercer bucle (figura 183-184) que se representa claramente a los 300 Hz (figura 191-192), pasándose a los 500 Hz a una situación de orden y bucle único (figura 198-199).

Aumentando la frecuencia se observa que a 2000 Hz (figura 208-209) se vuelven a presentar hasta tres bucles de signos opuestos, pasándose a un elevado desorden a los 4000 Hz (figura 224-225).

A partir de este valor se observó inestabilidad en el cálculo, por lo que se desecharon los resultados por encima de 3000 Hz.

Es significativo observar cómo se presentan zonas de elevada densidad de corriente en los conductores del estator fruto de las corrientes parásitas que aparecen al estar el conductor directamente al aire, sometido a la reacción de inducido.

Una primera conclusión que se extrae de este análisis es la necesidad de romper los bucles, o de hacerlos lo más largos posibles. El motivo fundamental radica en que el par rotórico lo proporciona la componente activa de la corriente en la dirección radial, la aparición de bucles sean ordenados o no, implica necesariamente la pérdida de par. Si se fija un camino para la corriente mediante ranuras practicadas en el rotor, que impidan a la línea de corriente cerrarse por el camino "natural" y la alarguen para cerrarse siguiendo la ranura, provocará un alargamiento de la línea de corriente, con el consiguiente aumento de par.



### 7.3.2. Variación de deslizamiento a la frecuencia de 50 Hz.

La presencia de los dos bucles de corriente rotórica de signos opuestos (figura 170-171) se modifica al variar el deslizamiento. A medida que éste aumenta el bucle inferior va disminuyendo hasta llegar a un valor de  $s=0.5$  en el que hay un único bucle, con par máximo (ver secuencia de figuras 240-241, 246-247, 254-255, 260-261). Al superar de nuevo este valor el bucle interior vuelve a aumentar hasta llegar a tener prácticamente la misma dimensión con  $s=1$  (ver secuencia de figuras 266-267, 272).

De las gráficas 140 a 143 se ve que los valores de pico de la densidad de corriente y resto de magnitudes, son máximos para  $s=0,4$ , pero el mayor efecto sobre el par se obtiene para  $s=0,5$ , ya que es cuando aparece un único sentido de giro de las corrientes rotóricas.

Como se verá posteriormente, este valor de deslizamiento de par máximo es el que se obtiene experimentalmente para este tipo de máquinas alimentadas a  $f=50\text{Hz}$ , máquinas de flujo axial de 20 pares de polos con una relación  $K_r$  de 0.65.

### **7.3.3. Variación de deslizamiento a la frecuencia de 500 y 3000 Hz.**

Para un valor de  $f$  de 500 Hz, se ha observado que los valores de densidades de corrientes inducidas y de campos en el entrehierro son mayores, cuanto menor es el deslizamiento (figuras 155 a 157). Pero analizando las formas de las corrientes inducidas (ver figuras apéndice A.1.5) se comprueba de nuevo que se presentan bucles de signo opuesto para valores de deslizamiento inferiores a 0.5 (ver figuras 320-323 y 328-331), siendo este valor, de nuevo, el que presenta un único bucle de corriente, siendo el que proporcionaría el par máximo.

Para valores de deslizamiento superiores, vuelven a aparecer los bucles de corriente de signos opuestos, llegando a bucles similares de signos opuestos para un valor  $s=1$  (ver figuras 335-338).

Para valores de 3000 Hz el comportamiento es diferente al obtenido para 500 Hz, puesto que aparecen bucles de signo opuesto para valores en cualquier rango superior a  $s=0.05$  (bajo deslizamiento). A diferencia de la  $f$  de 500 Hz, para  $s=0.5$  aparecen bucles de signo opuesto, aunque predomina uno de ellos (ver figuras 365-368, 373-374, 370-380).

El comportamiento de los valores máximos de las magnitudes analizadas (ver figuras 164 a 169) es similar al obtenido a 500 Hz, con la diferencia que se obtienen valores máximos superiores a  $s=1$  que en valores inferiores.

De lo analizado hasta este punto, se deduce que la frecuencia de trabajo que presentaría mejores resultados sería a 500 Hz, ya que se obtienen valores similares a lo obtenido para la frecuencia de 50 Hz.



Es de esperar que a este valor de frecuencia se obtengan valores de par muy superiores, ya que el aumento de  $f$  es equivalente a un aumento de la permeancia del medio (entrehierro), reduciendo la reluctancia del circuito magnético, y aumentando por tanto el factor de calidad de la máquina.

#### **7.3.4. Variación de deslizamiento a la frecuencia de 1000 Hz.**

Analizando los resultados obtenidos para 1000 Hz, se observa que los valores de la densidad de corriente rotórica (figura 158) siguen un comportamiento similar al obtenido a 3000 Hz, presentando un aumento de valor a  $s=1$ , respecto a los valores intermedios de  $s$ .

El resto de componentes reales (corriente estator – fig 160 y campo real en rotor-fig 162) siguen un comportamiento similar al obtenido a 3000 Hz pero las componentes imaginarias son diferentes, presentando un incremento para bajos deslizamientos (hasta  $s=0.2$ ).

Analizando las formas de las líneas de corriente (figuras 341-344, 349-352, 357-360), se observa cómo, partiendo de un único bucle a deslizamientos bajos (figuras 202-203) va apareciendo un segundo bucle que aumenta hasta llegar a  $s=0.5$  con la máxima longitud de giro en sentidos opuestos, hasta alcanzar de nuevo un único bucle a deslizamientos  $s=1$ .

Para este valor de frecuencia hay que tener presente que la máquina puede presentar un bajo par para cargas elevadas, siendo aparentemente, adecuada para cargas bajas en el eje del motor.

#### **7.3.5. Variación de deslizamiento para frecuencias de 50 a 1000 Hz.**

Para valores de  $f$  de 100 Hz la presencia de bucles de signos opuestos se atenúa hasta el valor de  $s=0.5$ , donde aparece un único bucle (ver figuras 277-280, 285-288, 293-295). A partir de este valor vuelven a aparecer bucles de sentidos opuestos.

Para 300 Hz la presencia de bucles de signos opuestos se mantiene, aunque se reduce igualmente por  $s=0.5$ . Los valores máximos de densidad de corriente son inferiores en el rango medio de los deslizamientos y máximos en los extremos (bajos y altos).

De lo analizado hasta este momento sería recomendable, al tiempo que practicar ranuras a las máquinas emplear frecuencias de trabajo hasta 1000 Hz, puesto que por encima de este valor los resultados parecen empeorar.

Las frecuencias preferidas serían 100, 500 y 1000 Hz.

### **7.3.6. Análisis de conjunto.**

Los resultados obtenidos muestran la existencia de bucles de corriente en formas tipo 8 que no son deducibles por la intuición del diseñador de máquinas eléctricas ni el cálculo clásico. Cualquiera que haya probado este tipo de geometrías habrá obtenido probablemente resultados experimentales decepcionantes y sin explicación aparente. La aparición y desaparición de estos bucles depende de la frecuencia de trabajo y del deslizamiento con el que trabaje la máquina.

No se tiene referencia alguna de cálculos similares realizados, es decir cálculos por elementos finitos, electrodinámicos y en 3 dimensiones. Los cálculos realizados son posibles desde hace relativamente poco tiempo, ya que el elemento de análisis empleado con el software ANSYS, el solid117, está disponible desde la versión 5.6, que el autor conoce únicamente desde el año 1.999-2.000, cuando la empezó a emplear. La versión anterior, la 5.5 disponible hasta 1.998-1999 no disponía de este tipo de elementos.

## 7.4. Resultados experimentales.

### 7.4.1. Máquina RB-3.

De los resultados obtenidos por la simulación se deduce que las máquinas tipo RB presentan un mayor densidad de corriente en el rotor para valores de deslizamiento  $s=0.5$  para  $f=50$  Hz.

De los datos obtenidos en el laboratorio con la máquina RB se obtuvieron los siguientes resultados:

$V_F$	20 V
$I_F$	8 A
s	0.4
f	50 Hz
Nreal	60 rpm
Nnominal	150 rpm

La máquina giraba en vacío, es decir sin carga mecánica alguna en su eje, por lo que tiene que vencer únicamente los rozamientos mecánicos.

Probado posteriormente a una frecuencia de 300 Hz, los resultados fueron, para una corriente de fase de 8 A y  $v$  de fase de 22 V, con un entrehierro de 8 mm.

s	0.55
Nreal	512 rpm
Nnominal	900 rpm

El calentamiento de la máquina llegaba a alcanzar los 50°C.

Las características constructivas de la máquina, a nivel de comparación con la DASER son,

p	20
$K_R$	0.65
Inductores	2
Inducidos	1
Longitud máquina	30 mm
D exterior estator	220 mm
Longitud del estator	15 mm
Fases	3

#### 7.4.2. Máquina DASER.

Las características constructivas fundamentales de la máquina son,

p	20
$K_R$	0.65
Inductores	1
Inducidos	1
Longitud máquina	30 mm
D exterior estator	220 mm
Longitud del estator	15 mm
Fases	2

Aunque esta máquina está actualmente en fase de inicio de pruebas, dado su reciente finalización, las primeras pruebas han dado como resultado.

$I_F$	18 A
s	0.4
f	50 Hz
$N_{real}$	60 rpm
$N_{nominal}$	150 rpm

Sorprendentemente una máquina de un sólo inductor pero de iguales valores en lo que a  $K_R$  y tamaño de máquina se refiere, da exactamente el mismo deslizamiento que la máquina RB.