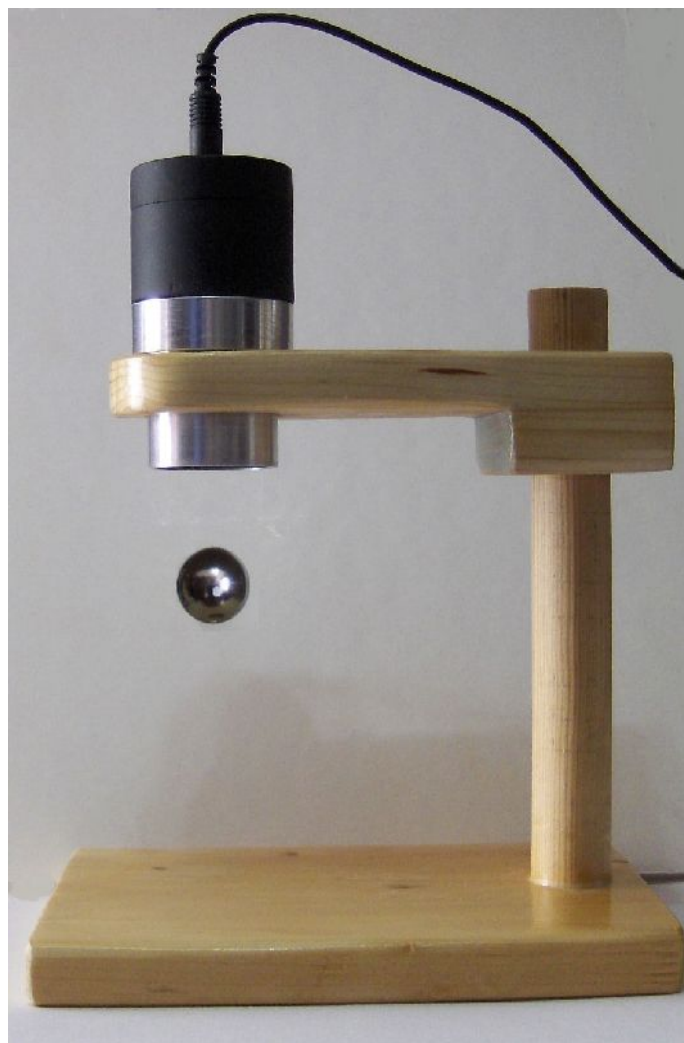


Projecte d'un Sistema de Levitacio Magnetica d'una Bola

per Francesc Novau i Molins



Dedicat als meus nets
Sophie, Eric, Etna, Alex, Amanda i Marc
amb l'esperança de poder despertar amb algun d'ells
aquella part del ADN que ens fa inclinar les aficions per la ciència

Contingut

	Pagina
1- El perquè d'algunes coses	3
2- Principi bàsic d'un levitador magnètic.	3
2.1-Teoria Bàsica	4
2.2-Calcul del nombre de voltes N de la bobina	5
Norma DIN 60317 Característiques dels fils de coure esmaltat	7
2.2.1-Nombre de voltes N versus separació entre voltes	8
2.3-Calcul de la resistència òhmica R de la bobina	9
2.4-Full de calcul que presenta els paràmetres de la bobina	11
2.5-Estudi previ de calcul del coeficient d'autoinducció L(D)	12
2.6-Calcul del coeficient d'autoinducció L(D) de la bobina	15
3- Influència del diàmetre del nucli amb la distància de levitació	19
4- Sistemes detectors de la posició de la bola	20
4.1.-Levitació amb bola / imant de terres rares	21
4.2-Com millorar la precisió del detector de la posició de la bola	23
5- Paràmetres bàsics per dissenyar un levitador	27
5.1.-Calibració del detector de distància	33
6- Estudi d'un circuit electrònic per fer levitar una bola	
6.1- Esquema electrònic teòric	
6.2- Detall de la placa de circuit imprès	
6.3- Font d'alimentació	
7- Càlculs i ajustos bàsics per establir el punt de levitació	
8- Fotos amb detalls d'aquest projecte de levitador	
10- Bibliografia	

1-El perquè d'algunes coses

El meu interès per la levitació va néixer amb l'ocasió d'una visita al Museu Escubedo-Garcia de Palol de Revardit, (localitzat a 42.038832,2.799841), aprop de Girona on vaig poder apreciar una baldufa girant i levitant per sobre d'una petita plataforma i que estava allí discretament ...però cridant l'atenció dels visitants. Posteriorment i al cap d'un temps l'amic Francesc Masclans em va tornar a despertar aquest interès al proposar-me la construcció d'un levitador de bola que havia vist per Internet ...i així va néixer aquest projecte que conste d'una mica d'electrònica i bastant de magnetostàtica.

2-Principi bàsic d'un levitador magnètic

Un sistema per fer levitar una bola consta, en primer lloc, d'un electroimant, que estableix, a una distància determinada D , una força magnètica (F_m) que compensa el pes (mg) de la bola. Una possibilitat, que circula per Internet, es la que es descriu a l'esquema de la figura 1 següent

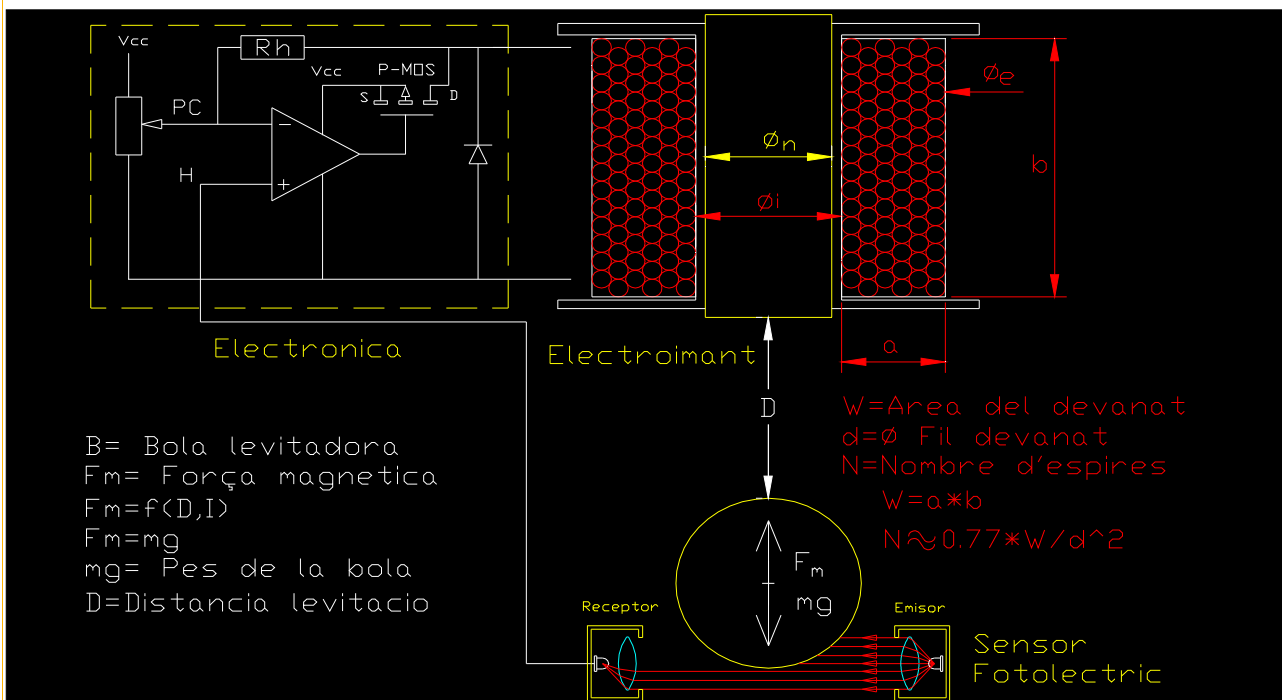


Fig 1 -Esquema bàsic per fer levitar una bola de ferro

La placa d'electrònica que forma part del conjunt subministra polsos de corrent modulats per temps, que son generats per la diferència entre un punt de consigna (PC) i un senyal (H) que rep d'un sensor extern de la posició de la bola.

Un amplificador operacional amplifica la diferència de senyals entre PC i H i la seva sortida activa un PMOS que deixa passar o talla el corrent de la bobina, segons la polaritat de la diferència $PC-H$. Una ret R_h realimenta la tensió de sortida sobre l'entrada inversora del operacional per donar una mica d'histèresis al punt de consigna de la commutació i garantir així la seva estabilitat. Quant el PMOS talla el corrent procedent de la font d'alimentació, un diode amb paral·lel amb la bobina evita el típic pols de retrocés i a la vegada continua deixant passar corrent, degut a la forta autoinducció de la bobina, retornant energia al sistema, fins que'l senyal H arriba al seu punt de disparo.

El corrent es una funció exponencial creixent, degut a l'autoinducció de la bobina durant el temps que la font subministra corrent i exponencial decreixent mentre la bobina retorna energia generant corrent. Aquest sistema electrònic de control es necessari degut a que la (F_m) que actua sobre la bola es una funció no lineal quadràtica inversa, que a petites disminucions de la distancia (D) impliquen un fort increment de la força.

El sensor fotoelèctric esta constituït per una font emissora de llum, situada al focus d'una lent que emet un feix paral·lel de llum contra el perfil de la bola, i un receptor que concentra i detecta la llum que la bola deixa passar. Quant s'utilitzen boles, amb imants interiors, es pot substituir tot el sensor fotoelèctric per un simple sensor lineal de Hall situat entre el nucli de la bobina i la bola.

2.1– Teoria Bàsica

A continuació anem a estudiar un sistema bàsic de levitació constituït per un electroimant i una bola de ferro segons l'esquema de la figura 1. La coenergia magnètica E del sistema es una funció del corrent I i l'autoinducció $L(D)$ segons la següent expressió:

$$E(I,D)=1/2*L(D)*I^2$$

La força magnètica que actua sobre la bola es la derivada respecte la distancia

$$F_m=\partial E(I,D)/\partial D=1/2*(\partial L(D)/\partial D)*I^2$$

Hi haurà equilibri estàtic quant la suma total de forces sigui nul·la :

$$F_m+m*g=0 \quad \text{i per tant queda}$$

$$m*g= -1/2*(\partial L(D)/\partial D)*I^2$$

d'on es pot deduir que'l corrent I de levitació serà

$$I^2 = -(2*m*g)/(\partial L(D)/\partial D)$$

De l'expressió anterior es veu clarament que per calcular el corrent I necessari per fer levitar una bola de pes $m*g$, a una distancia D , es necessita també conèixer la funció de l'autoinducció $L(D)$ de la bobina i també la seva derivada. Per altra banda un podria pensar que simplement per una distancia D no mes cal fer passar un corrent I , que compleixi l'equació anterior, i ja tenim una bola levitant !! Cal recordar la llei de Earnshaw que diu que una força magnètica i el seu entorn tenen tendència a produir equilibris estàtics inestables. Aquesta llei explica que per fer levitar amb èxit una bola es necessiti també un sensor de moviment o de situació a l'espai que, amb una electrònica adequada, corregeixi de forma continua els petits desplaçaments de la bola, deguts a qualsevol possible pertorbació externa.

Per calcular d'una forma practica la funció $L(D)$ utilitzarem el mètode dels elements finits aplicats a la magnetostàtica a través del programa **FEMM**, (1) que gracies a la generositat del seu autor **David Meeker** es de domini public i permet calcular per unes condicions predefinides del electroimant el flux W i la densitat de flux B per qualsevol punt de l'espai, la força magnètica F_m sobre la bola de ferro i l'autoinducció $L(D)$ de la bobina per cada posició de la bola i amb funció del corrent I que circula per la bobina.

A continuació anem a veure com podem calcular les característiques típiques d'una bobina: com per exemple el nombre de voltes possibles N per unes dimensions del seu carret, la resistència òhmica R amb aquestes voltes N i el coeficient d'autoinducció L com a funció de les dimensions de la bobina, del corrent i del material ferromagnètic del seu entorn.

2.2- Calcul del nombre de voltes N de la bobina

Suposem que l'espai del bobinat, segons la figura 1, es de dimensions a, b, Φ (mm), que l diàmetre extern del fil de coure esmaltat es d (mm) i que la bobinadora col·loca espires amb un pas axial p_a , segons s'indica a la figura 2, que presenta una secció ampliada, però a escala, de un bobinat real

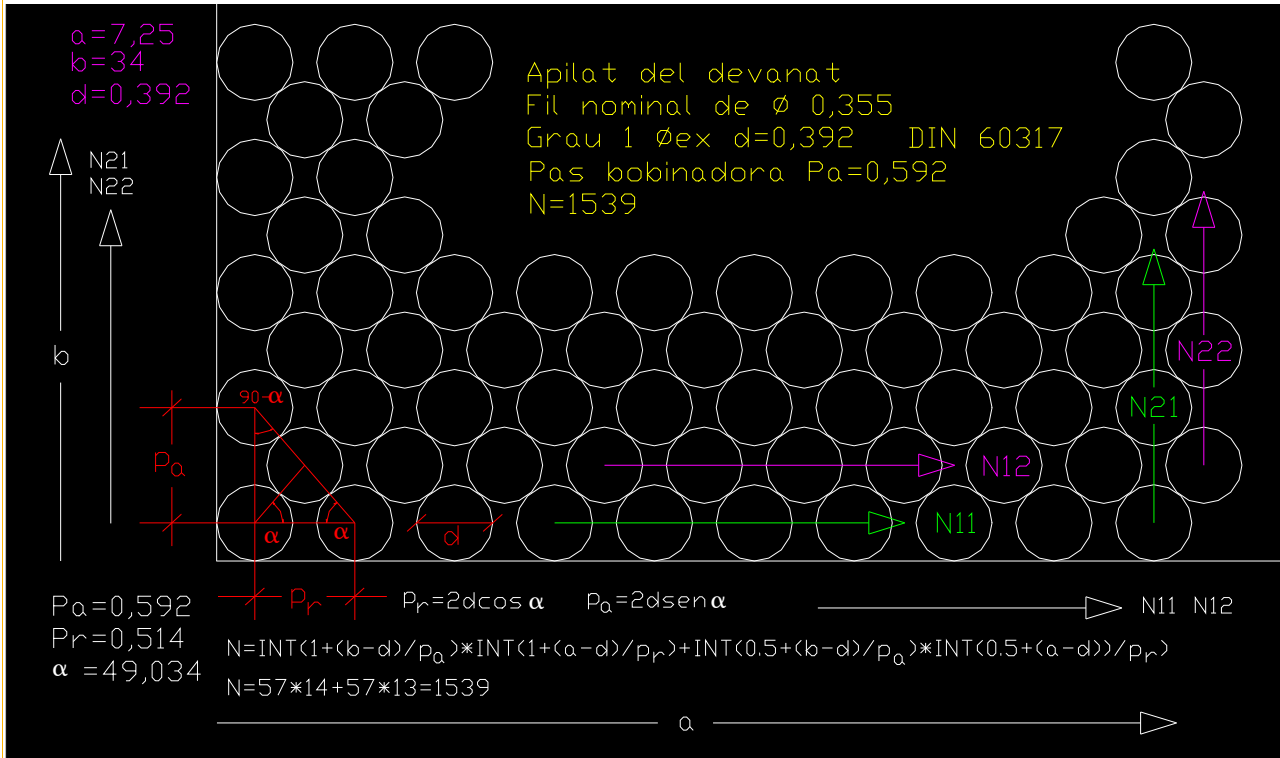


Figura 2 Secció d'un bobinat de pas axial $p_a = 0.592$ i fil nominal de 0.355 mm

El pas axial es per simple geometria segons es pot veure a la figura anterior:

$$p_a = 2d \sin \alpha \text{ i el pas radial}$$

$$p_r = 2d \cos \alpha$$

El nombre d'espores **N21** de la primera capa i similars repetitives es igual a:

$$N21 = \text{INT}(1 + (b-d)/p_a)$$

El nombre d'espores **N22** de la segona capa i similars repetitives es igual a:

$$N22 = \text{INT}(0.5 + (b-d)/p_a)$$

El nombre total de capes **N11** apilades al estil de la primera capa es igual a:

$$N11 = \text{INT}(1 + (a-d)/p_r)$$

El nombre total de capes **N12** apilades al estil de la segona capa es igual a:

$$N12 = \text{INT}(0.5 + (a-d)/p_r)$$

El nombre total d'espores **N** serà:

$$N = N21 * N11 + N22 * N12$$

$$N = \text{INT}(1 + (b-d)/p_a) * \text{INT}(1 + (a-d)/p_r) + \text{INT}(0.5 + (b-d)/p_a) * \text{INT}(0.5 + (a-d)/p_r)$$

en la que INT () significa la part numèrica entera de l'expressió entre parèntesis

Anem a calcular quantes voltes podem posar a un carret axb de 7.25x34 mm, bobinat amb un fil de 0.355 mm de diàmetre nominal i un pas axial de 0.592 mm. Si consultem la taula 1 de la pagina 7 les dimensions dels fils esmaltats de coure, definits per la norma **DIN60317**, podem veure que el diàmetre exterior **d** del fil esmaltat Grau 1 es de 0.392 mm pel fil nominal de 0.355; per tant el total de voltes serà

$$N=57*14+57*13=1539$$

Si calculem per un pas axial del devanat de 0.679 pel mateix carret i fil nominal de 0.355 ens trobem amb un nombre de voltes N que es:

$$N=50*18+49*17=1733$$

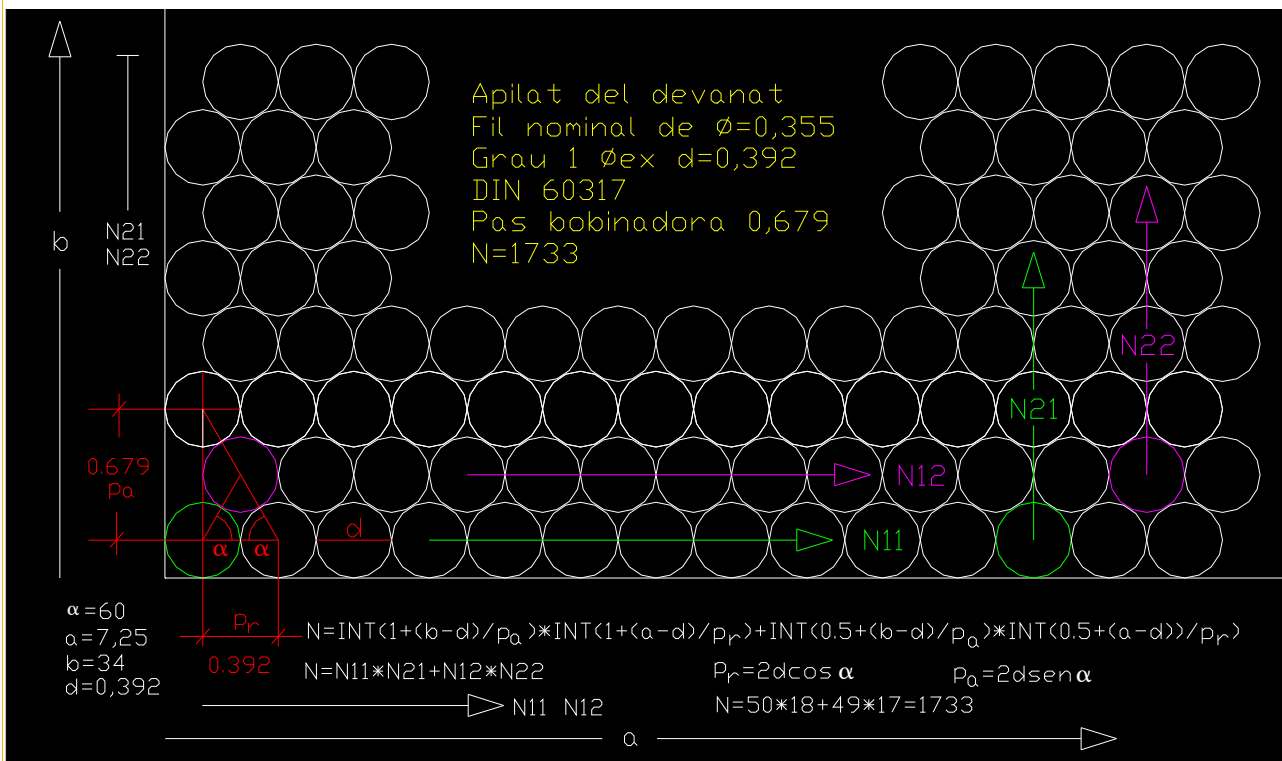


Figura 3 Bobinat de pas 0.679 i fil nominal de 0.355 mm

La figura 3 presenta la secció del mateix carret anterior però amb el pas axial de bobinat $p_a = 0.679$. Es pot observar que al augmentar el pas axial de bobinat, amb aquest cas, s'incrementa el nombre de voltes amb més d'un 12% respecte al cas anterior. Donada aquesta situació, que pot semblar sorprenent, anem a estudiar i representar gràficament el nombre de voltes N amb funció dels diferents passos del bobinat.

Prèviament amb aquestos gràfics, a la pagina següent, es presenta la Norma DIN 60317 que recull les dimensions i resistència òhmica del fils esmaltats que s'utilitzen per construir les bobines dels electroimants

Taula 1 -Dimensions i resistència dels fils de coure esmaltats

Norma DIN 60317

Nominal [mm]	(Coure nu)		(Diàmetre Exterior)						Resistència a 20°C		
	tolerancia [mm]	secció [mm ²]	Grau 1		Grau 2		Grau 3		nom [Ohm/m]	min [Ohm/m]	max [Ohm/m]
			min [mm]	max [mm]	min [mm]	max [mm]	min [mm]	max [mm]			
0.118	±0,003	0.010936	0.128	0.136	0.137	0.145	0.1460	0.1540	1.5630	1.4740	1.6600
0.120	±0,003	0.011310	0.130	0.138	0.139	0.148	0.1490	0.1570	1.5110	1.4260	1.6040
0.125	±0,003	0.012272	0.135	0.144	0.145	0.154	0.1550	0.1630	1.3930	1.3170	1.4750
0.130	±0,003	0.013273	0.141	0.15	0.151	0.160	0.1610	0.1690	1.2880	1.2200	1.3610
0.132	±0,003	0.013685	0.143	0.152	0.153	0.162	0.1630	0.1710	1.2490	1.1840	1.3190
0.140	±0,003	0.015394	0.151	0.16	0.161	0.171	0.1720	0.1810	1.1100	1.0550	1.1700
0.150	±0,003	0.017671	0.162	0.171	0.172	0.182	0.1830	0.1930	0.9673	0.9219	1.0159
0.160	±0,003	0.020106	0.172	0.182	0.183	0.194	0.1950	0.2050	0.8502	0.8122	0.8906
0.170	±0,003	0.022698	0.183	0.194	0.195	0.205	0.2060	0.2170	0.7531	0.7211	0.7871
0.180	±0,003	0.025447	0.193	0.204	0.205	0.217	0.2180	0.2290	0.6718	0.6444	0.7007
0.190	±0,003	0.028353	0.204	0.216	0.217	0.228	0.2290	0.2400	0.6029	0.5794	0.6278
0.200	±0,003	0.031416	0.214	0.226	0.227	0.239	0.2400	0.2520	0.5441	0.5237	0.5657
0.212	±0,003	0.035299	0.227	0.24	0.241	0.254	0.2550	0.2680	0.4843	0.4669	0.5026
0.224	±0,003	0.039408	0.239	0.252	0.253	0.266	0.2670	0.2800	0.4338	0.4188	0.4495
0.236	±0,004	0.043744	0.253	0.267	0.268	0.283	0.2840	0.2980	0.3908	0.3747	0.4079
0.250	±0,004	0.049087	0.267	0.281	0.282	0.297	0.2980	0.3120	0.3482	0.3345	0.3628
0.265	±0,004	0.055155	0.283	0.297	0.298	0.314	0.3150	0.3300	0.3099	0.2982	0.3223
0.280	±0,004	0.061575	0.298	0.312	0.313	0.329	0.3300	0.3450	0.2776	0.2676	0.2882
0.300	±0,004	0.070686	0.319	0.334	0.335	0.352	0.3530	0.3690	0.2418	0.2335	0.2506
0.315	±0,004	0.077931	0.334	0.349	0.35	0.367	0.3680	0.3840	0.2193	0.2121	0.2270
0.335	±0,004	0.088141	0.355	0.372	0.373	0.391	0.3920	0.4080	0.1939	0.1878	0.2004
0.355	±0,004	0.098980	0.375	0.392	0.393	0.411	0.4120	0.4280	0.1727	0.1674	0.1782
0.375	±0,005	0.110447	0.396	0.414	0.415	0.434	0.4350	0.4530	0.1548	0.1494	0.1604
0.400	±0,005	0.125664	0.421	0.439	0.44	0.459	0.4600	0.4780	0.1360	0.1316	0.1407
0.425	±0,005	0.141863	0.447	0.466	0.467	0.488	0.4890	0.5080	0.1205	0.1167	0.1244
0.450	±0,005	0.159403	0.472	0.491	0.492	0.513	0.5140	0.5330	0.1075	0.1042	0.1109
0.475	±0,005	0.177205	0.499	0.519	0.52	0.541	0.5420	0.5620	0.0965	0.0937	0.0993
0.500	±0,005	0.196350	0.524	0.544	0.545	0.566	0.5670	0.5870	0.0871	0.0846	0.0896
0.530	±0,006	0.220600	0.555	0.576	0.577	0.600	0.6010	0.6230	0.0775	0.0752	0.0798
0.560	±0,006	0.246300	0.585	0.606	0.607	0.630	0.6310	0.6530	0.0694	0.0673	0.0715
0.600	±0,006	0.282700	0.627	0.649	0.65	0.674	0.6750	0.6980	0.0605	0.0586	0.0623
0.630	±0,006	0.311700	0.657	0.679	0.68	0.704	0.7050	0.7280	0.0548	0.0532	0.0565
0.670	±0,007	0.352500	0.698	0.722	0.723	0.749	0.7500	0.7740	0.0485	0.0470	0.0499
0.710	±0,007	0.395900	0.738	0.762	0.763	0.789	0.7900	0.8140	0.0432	0.0419	0.0445
0.750	±0,008	0.441800	0.780	0.805	0.806	0.834	0.8350	0.8610	0.0387	0.0375	0.0399
0.800	±0,008	0.502600	0.830	0.855	0.856	0.884	0.8850	0.9110	0.0340	0.0330	0.0350
0.850	±0,009	0.567400	0.882	0.909	0.91	0.939	0.9400	0.9680	0.0301	0.0292	0.0310
0.900	±0,009	0.636200	0.932	0.959	0.96	0.989	0.9900	1.0180	0.0269	0.0261	0.0277
0.950	±0,010	0.708800	0.984	1.012	1.013	1.044	1.0450	1.0740	0.0241	0.0234	0.0248
1.000	±0,010	0.785400	1.034	1.062	1.063	1.094	1.0950	1.1240	0.0218	0.0211	0.0224
1.060	±0,010	0.882500	1.094	1.124	1.125	1.157	1.1580	1.1880	0.0194	0.0188	0.0200
1.120	±0,011	0.985200	1.154	1.184	1.185	1.217	1.2180	1.2480	0.0174	0.0168	0.0179

El fil de coure utilitzat per devanar les bobines dels electroimants es generalment del Grau 1

2.2.1 Nombre de voltes N versus separació (s) entre voltes

a	b	d	sen α	cos α	Pas axial 2dsen α	Pas radial 2dcos α	s=Pa-d s	voltes N
7,25	34,0	0,392	0,5000	0,8660	0,392	0,679	0	1806
7,25	34,0	0,392	0,5128	0,8585	0,402	0,673	0,01	1764
7,25	34,0	0,392	0,5255	0,8508	0,412	0,667	0,02	1722
7,25	34,0	0,392	0,5383	0,8428	0,422	0,661	0,03	1680
7,25	34,0	0,392	0,5510	0,8345	0,432	0,654	0,04	1638
7,25	34,0	0,392	0,5638	0,8259	0,442	0,648	0,05	1633
7,25	34,0	0,392	0,5765	0,8171	0,452	0,641	0,06	1639
7,25	34,0	0,392	0,5893	0,8079	0,462	0,633	0,07	1606
7,25	34,0	0,392	0,6020	0,7985	0,472	0,626	0,08	1573
7,25	34,0	0,392	0,6148	0,7887	0,482	0,618	0,09	1610
7,25	34,0	0,392	0,6276	0,7786	0,492	0,610	0,10	1576
7,25	34,0	0,392	0,6403	0,7681	0,502	0,602	0,11	1541
7,25	34,0	0,392	0,6531	0,7573	0,512	0,594	0,12	1584
7,25	34,0	0,392	0,6658	0,7461	0,522	0,585	0,13	1548
7,25	34,0	0,392	0,6786	0,7345	0,532	0,576	0,14	1524
7,25	34,0	0,392	0,6913	0,7225	0,542	0,566	0,15	1563
7,25	34,0	0,392	0,7041	0,7101	0,552	0,557	0,16	1525
7,25	34,0	0,392	0,7168	0,6972	0,562	0,547	0,17	1560
7,25	34,0	0,392	0,7296	0,6839	0,572	0,536	0,18	1534
7,25	34,0	0,392	0,7423	0,6700	0,582	0,525	0,19	1566
7,25	34,0	0,392	0,7551	0,6556	0,592	0,514	0,20	1539
7,25	34,0	0,392	0,7679	0,6406	0,602	0,502	0,21	1568
7,25	34,0	0,392	0,7806	0,6250	0,612	0,490	0,22	1540
7,25	34,0	0,392	0,7934	0,6087	0,622	0,477	0,23	1581
7,25	34,0	0,392	0,8061	0,5917	0,632	0,464	0,24	1605
7,25	34,0	0,392	0,8189	0,5740	0,642	0,450	0,25	1628
7,25	34,0	0,392	0,8316	0,5553	0,652	0,435	0,26	1664
7,25	34,0	0,392	0,8444	0,5357	0,662	0,420	0,27	1683
7,25	34,0	0,392	0,8571	0,5151	0,672	0,404	0,28	1717
7,25	34,0	0,392	0,8699	0,4932	0,682	0,387	0,29	1782

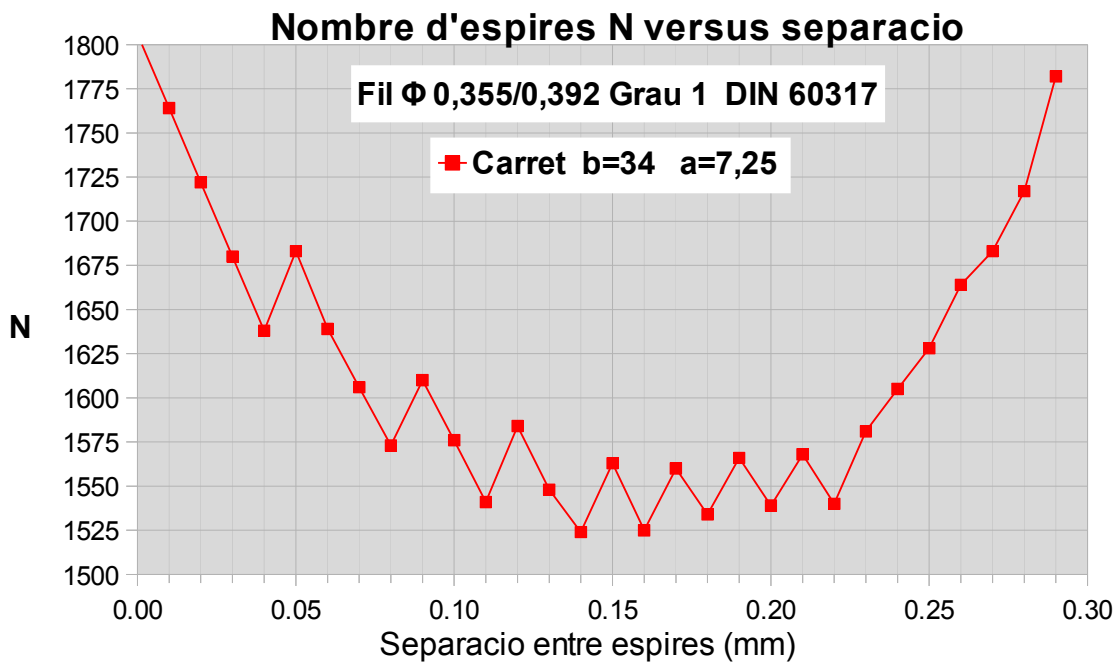


Figura 4 Nombre d'espises N vs separació

2.3- Calcul de la resistència òhmica R de la bobina

Anem ara a calcular la resistència òhmica de la bobina de dimensions $a \times b \times \Phi_i$.
Del paràgraf 2.3 recordem que: p_a es el pas axial i p_r es el pas radial
El nombre d'espores N_{21} de la primera capa i similars repetitives es igual a:

$$N_{21} = \text{INT}(1 + (b-d)/p_a)$$

El nombre d'espores N_{22} de la segona capa i similars repetitives es igual a:

$$N_{22} = \text{INT}(0.5 + (b-d)/p_a)$$

El nombre total de capes N_{11} apilades al estil de la primera capa es igual a:

$$N_{11} = \text{INT}(1 + (a-d)/p_r)$$

El nombre total de capes N_{12} apilades al estil de la segona capa es igual a:

$$N_{12} = \text{INT}(0.5 + (a-d)/p_r)$$

La longitud d'una espira de la primera capa l_{c11} serà:

$$l_{c11} = \pi(\Phi_i + d) \quad \text{longitud de la primera espira de la 1ª capa}$$

$$l_{c12} = \pi(\Phi_i + d + 2p_r) \quad \text{longitud similar de l'espira de la 3ª capa}$$

$$l_{c13} = \pi(\Phi_i + d + 4p_r) \quad \text{longitud similar de l'espira de la 5ª capa}$$

..... i així successivament s'incrementa $\pi * 2p_r$

$$l_{c1N_{11}} = \pi(\Phi_i + d + (N_{11}-1) * 2p_r) \quad \text{longitud de l'espira de l'ultima capa } N_{11}$$

$$\Sigma_1 = \pi(\Phi_i + d + (N_{11}-1) * p_r) N_{11} \quad \text{suma dels termes anteriors}$$

La longitud total parcial de totes aquestes espores serà:

$$\Sigma_1 * N_{21}$$

Igualment calcularem la longitud de les espores de l'altra serie de capes

$$l_{c21} = \pi(\Phi_i + d + p_r) \quad \text{longitud de la primera espira de la 2ª capa}$$

$$l_{c22} = \pi(\Phi_i + d + 3p_r) \quad \text{longitud similar de l'espira de la 4ª capa}$$

$$l_{c23} = \pi(\Phi_i + d + 5p_r) \quad \text{longitud similar de l'espira de la 6ª capa}$$

..... i així successivament incrementa $\pi * 2p_r$

$$l_{c2N_{12}} = \pi(\Phi_i + d + (2N_{12}-1) * p_r) \quad \text{longitud de l'espira de l'ultima capa } N_{12}$$

$$\Sigma_2 = \pi(\Phi_i + d + N_{12} * p_r) N_{12} \quad \text{suma dels termes anteriors}$$

La longitud total parcial de totes aquestes espores serà:

$$\Sigma_2 * N_{22}$$

Per tant la longitud total de fil l_t serà:

$$l_t = \Sigma_1 * N_{21} + \Sigma_2 * N_{22} \quad (\text{mm})$$

$$l_t = \pi((\Phi_i + d + (N_{11}-1) * p_r) N_{11} * N_{21} + (\Phi_i + d + (N_{12}-1) * p_r) N_{12} * N_{22}) \quad (\text{mm})$$

La resistència R del fil serà:

$$R = l_t * (\text{Ohm/m}) / 1000$$

La Taula 1, de la pagina 7, presenta els valors dels **Ohm/m** per cada fil esmaltat

a	b	d	Pas axial 2dsen α	Pas radial 2dcos α	s=Pa-d s	voltes N	Ltotal (mm)	R (Ohm)
7,25	34,0	0,392	0,392	0,679	0	1806	120179	20,75
7,25	34,0	0,392	0,402	0,673	0,01	1764	117058	20,22
7,25	34,0	0,392	0,412	0,667	0,02	1722	113943	19,68
7,25	34,0	0,392	0,422	0,661	0,03	1680	110832	19,14
7,25	34,0	0,392	0,432	0,654	0,04	1638	107727	18,60
7,25	34,0	0,392	0,442	0,648	0,05	1683	112032	19,35
7,25	34,0	0,392	0,452	0,641	0,06	1639	108728	18,78
7,25	34,0	0,392	0,462	0,633	0,07	1606	106169	18,34
7,25	34,0	0,392	0,472	0,626	0,08	1573	103592	17,89
7,25	34,0	0,392	0,482	0,618	0,09	1610	107197	18,51
7,25	34,0	0,392	0,492	0,610	0,10	1576	104501	18,05
7,25	34,0	0,392	0,502	0,602	0,11	1541	101744	17,57
7,25	34,0	0,392	0,512	0,594	0,12	1584	105596	18,24
7,25	34,0	0,392	0,522	0,585	0,13	1548	102694	17,74
7,25	34,0	0,392	0,532	0,576	0,14	1524	100602	17,37
7,25	34,0	0,392	0,542	0,566	0,15	1563	104048	17,97
7,25	34,0	0,392	0,552	0,557	0,16	1525	100958	17,44
7,25	34,0	0,392	0,562	0,547	0,17	1560	104021	17,96
7,25	34,0	0,392	0,572	0,536	0,18	1534	101657	17,56
7,25	34,0	0,392	0,582	0,525	0,19	1566	104401	18,03
7,25	34,0	0,392	0,592	0,514	0,20	1539	101891	17,60
7,25	34,0	0,392	0,602	0,502	0,21	1568	104295	18,01
7,25	34,0	0,392	0,612	0,490	0,22	1540	101634	17,55
7,25	34,0	0,392	0,622	0,477	0,23	1581	104669	18,08
7,25	34,0	0,392	0,632	0,464	0,24	1605	106476	18,39
7,25	34,0	0,392	0,642	0,450	0,25	1628	108130	18,67
7,25	34,0	0,392	0,652	0,435	0,26	1664	110513	19,09
7,25	34,0	0,392	0,662	0,420	0,27	1683	111627	19,28
7,25	34,0	0,392	0,672	0,404	0,28	1717	113563	19,61
7,25	34,0	0,392	0,682	0,387	0,29	1782	118445	20,46

Taula 3 Nombre de voltes N, Longitud Lt i Resistència R vs separació d'espires

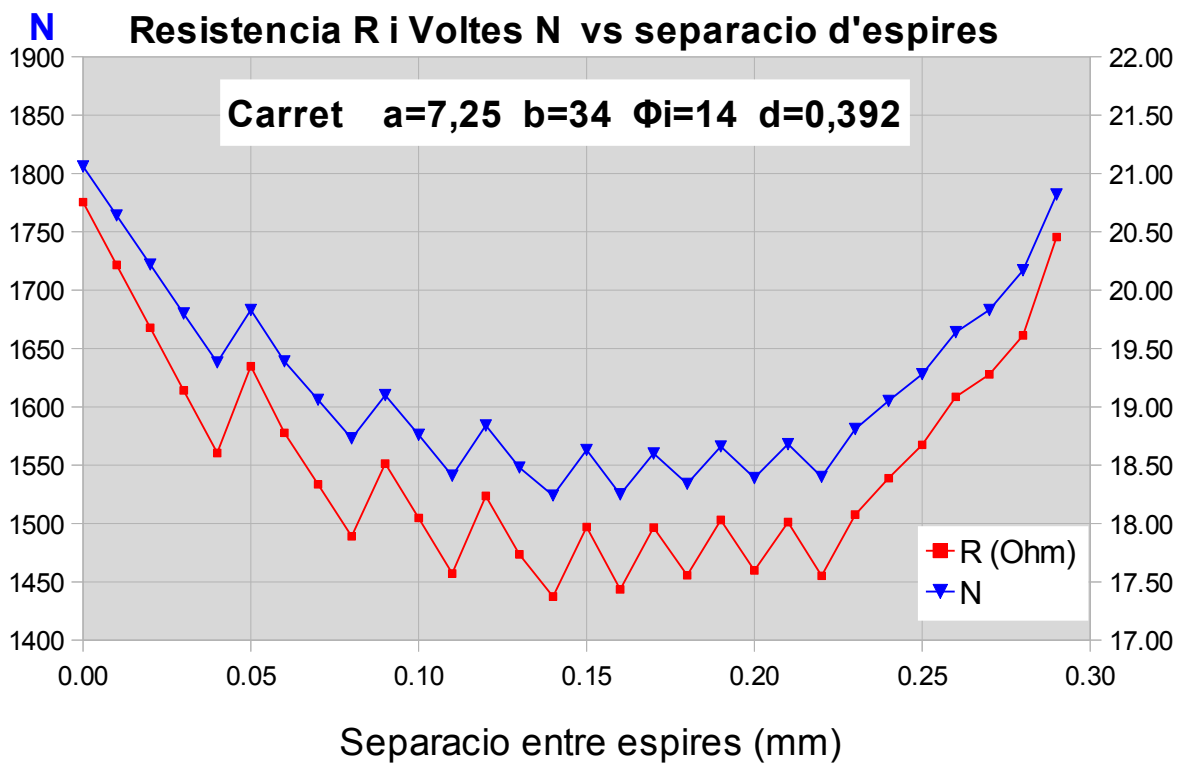


Figura 5 Resistència i Voltes versus separació d'espires

2.4- Full de calcul que presenta els parametres de la bobina

Anem a calcular ara, d'una forma practica, el nombre de voltes **N**, la resistència òhmica **R**, així com la longitud **Lt** i el **Pes** total del coure de la bobina, mitjançant un full de calcul, aplicant el conjunt de les formules abans deduïdes.

Partirem del diàmetre de fil **d**, de les dimensions físiques del carret **axbxΦi**, (veure figura 1) i del pas axial **Pa** del bobinat. El pas axial del bobinat es convenient que sigui major que'l diàmetre màxim del fil esmaltat. Consultar doncs la taula de la norma DIN 60317 per elegir-lo, procurant que sigui compatible amb la maquina de bobinar. Un full de calcul d'Open Office per aquesta aplicació es pot descarregar del web:

<http://personal.telefonica.terra.es/web/novau/Voltes>

Les dades es presenten de forma automàtica després d'omplir simplement els espais del diàmetre nominal del fil de coure, les mides del carret i el pas axial del bobinat. L'aspecte del full es de format similar a l'indicat a continuació

Φ Fil Cu (mm)	Mides del Carret			Pas Axial Pa (mm)	N voltes	Resistència segons DIN 60317			Longitud Lt (mm)	Pes Cu Bobina (gr)
	Φi (mm)	a (mm)	b (mm)			Rmin (Ohm)	Rnom (Ohm)	Rmax (Ohm)		
0.355	20	6.5	36.5	0.400	1720	23.96	24.72	25.50	143114	127
0.355	20	6.5	36.5	0.450	1530	21.08	21.75	22.44	125913	111
0.355	20	6.5	36.5	0.500	1523	21.19	21.87	22.56	126606	112
0.355	20	6.5	36.5	0.550	1452	20.08	20.72	21.37	119936	106
0.355	20	6.5	36.5	0.600	1513	21.08	21.75	22.44	125916	111
0.355	20	6.5	36.5	0.650	1568	21.74	22.44	23.14	129875	115
0.355	20	6.5	36.5	0.700	1820	25.34	26.16	26.98	151403	134

Per calcular la resistència nominal utilitzarem una resistivitat del coure a 20°C de $\rho=17.1 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ i farem servir l'expressió:

$$R_{nom} = (21.77239 \cdot Lt / d^2) \cdot 10^{-6}$$

Els valors de resistència mínima i màxima son calculats a traves de les següents funcions, **Rmin** i **Rmax** que han estat calculades i adaptades pel mètode dels mínims quadrats als valors numèrics que dona la norma DIN60317, i que son:

$$R_{min} = ((0.06017 + 2.477 \cdot \text{SQRT}(d))^{-4.171}) \cdot Lt / 1000$$

$$R_{max} = (0.02233 / (-0.00038 + d^{2.003})) \cdot Lt / 1000$$

2.5- Estudi previ de calcul del coeficient d'autoinducció L(D)

Per resoldre aquesta complicada funció estudiarem un cas amb dos sistemes de calcul diferents: un pel sistema tradicional com el que proposa Hurley al seu treball -veure bibliografia 1- i un altra pel sistema d'element finits, que calcularem a través del program FEMM abans mencionat, i així podrem contrastar els resultats i decidir pel sistema que ens pot reportar mes fiabilitat per la predicció d'aquesta funció.

Partirem del mateix model concret de W. Hurley que amb un corrent $I=1.7A$ fa levitar, segons ell, a 10 mm una bola de 60 mm de diàmetre, de 800 gr de massa, i amb una bobina de 1000 voltes. A continuació es pot veure un detall del postprocesador d'aquest model axisimètric

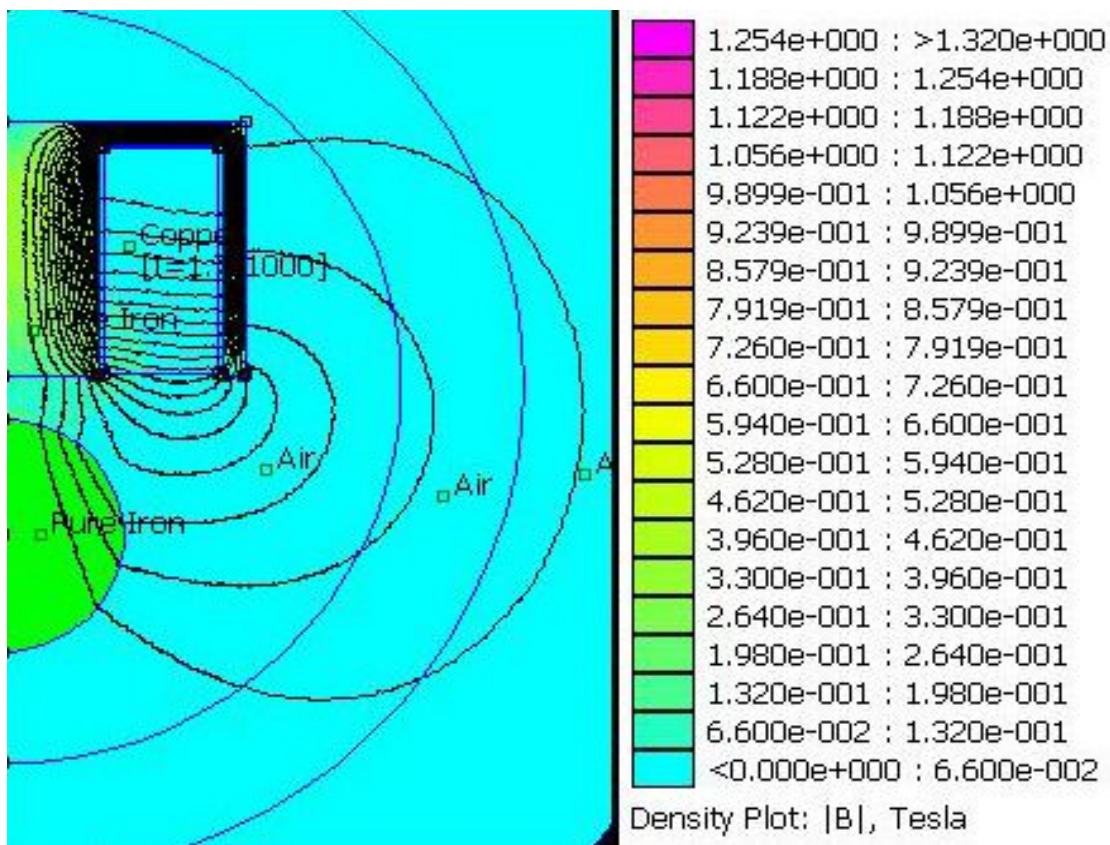


Figura 6 Postprocesador amb lines densitat de flux model de Hurley

El postprocesador calcula la força F sobre la bola i l'autoinducció L de la bobina amb funció de la distancia D de la bola al nucli. S'ha fet variar la distancia D entre 0 i 12 mm amb increments de 0.5 mm per poder elaborar adequadament la funció $L(D)$ i veure la força magnètica que s'aplica a la bola i per tant la distancia de levitació. Les dades han estat calculades amb un corrent $I=1.7A$ i un nombre de voltes $N=1000$ i es presenten a la pagina següent

Taula 4 Dades Postprocesador i Funcions L(D) i L'(D) calculades

D(mm)	FEM	FEM	Funcio	Potencial	Funcio	Exponencial
	F(N)	L(H)	FEM	FEM	Hurley	Hurley
			L(H) Fit	L' (H/m)	L(H) Fit	L' (H/m)
12.00	4.5137	0.3828	0.3824	3.4688	0.3877	1.2318
11.50	4.7978	0.3844	0.3841	3.6282	0.3884	1.4264
11.00	5.1059	0.3861	0.3860	3.8022	0.3891	1.6517
10.50	5.4409	0.3879	0.3879	3.9926	0.3900	1.9126
10.00	5.8060	0.3899	0.3900	4.2021	0.3911	2.2147
9.50	6.2047	0.3919	0.3922	4.4334	0.3922	2.5645
9.00	6.6430	0.3942	0.3944	4.6901	0.3936	2.9696
8.50	7.1259	0.3965	0.3968	4.9765	0.3952	3.4386
8.00	7.6602	0.3991	0.3994	5.2981	0.3971	3.9818
7.80	7.8915	0.4002	0.4002	5.4380	0.3979	4.2223
7.50	8.2569	0.4019	0.4022	5.6615	0.3992	4.6107
7.00	8.9231	0.4048	0.4051	6.0753	0.4017	5.3390
6.50	9.6748	0.4080	0.4082	6.5505	0.4046	6.1823
6.00	10.5321	0.4115	0.4116	7.1014	0.4079	7.1588
5.50	11.5152	0.4153	0.4154	7.7475	0.4118	8.2895
5.00	12.6576	0.4195	0.4194	8.5150	0.4162	9.5989
4.50	14.0039	0.4241	0.4239	9.4408	0.4214	11.1150
4.00	15.6184	0.4292	0.4289	10.5781	0.4274	12.8707
3.50	17.5976	0.4350	0.4345	12.0068	0.4343	14.9036
3.00	20.0924	0.4415	0.4410	13.8519	0.4423	17.2577
2.50	23.3666	0.4489	0.4485	16.3207	0.4516	19.9835
2.00	27.9001	0.4578	0.4575	19.7829	0.4624	23.1400
1.50	34.7537	0.4685	0.4685	24.9647	0.4749	26.7950
1.00	46.7574	0.4823	0.4830	33.5092	0.4893	31.0273
0.50	76.0257	0.5026	0.5033	50.0455	0.5060	35.9281
0.01	183.8440	0.5371	0.5367	93.4178	0.5256	41.6641

Les dades de les tres primeres columnes de groc son les calculades pel postprocesador amb el model de Hurley per un corrent de 1.7A i una bobina de 1000 voltes i segons l'electroimant indicat a la figura 6.

La columna quarta es una adaptació matemàtica de la funció potencial $L(H)Fit=(224.2+342.5*D)^{-0.1148}$ als valors de la columna tercera calculada pel mètode estadístic dels mínims quadrats

La columna sisena es també una adaptació matemàtica de la funció exponencial $L(H)Fit=0.3835+0.141842*EXP(-D/3.409416)$, segons el model de Hurley, adaptada als valors de la columna tres pel mètode dels mínims quadrats.

Les columnes cinquena i setena son les derivades de les funcions anteriors, multiplicades per 1000 per passar a unitats coherents de H/m

Es pot observar que la distancia de levitació es de **7.8 mm** ja que per aquesta distancia la força magnètica $F_m=7.8915$ es pràcticament igual al pes de la bola $P=m*g=0.8*9.81=7.848N$. Per altra banda per aquesta distancia podem calcular el corrent teòric I que varem deduir a la pagina 2

$$I = \sqrt{-(2*m*g)/(\partial L(D)/\partial D)} = \sqrt{2*7.848/5.4380} = 1.6989 \text{ A}$$

Aquest resultat demostra que els valors calculats pel FEMM de l'autoinducció estan totalment d'acord amb la teoria clasica i revaliden, crec, el seu us.

A continuació anem a representar una gràfica en la que constin les columnes des de la 5 fins a la 7 a fi de veure les diferències entre els dos models de L(H) i L'(H)

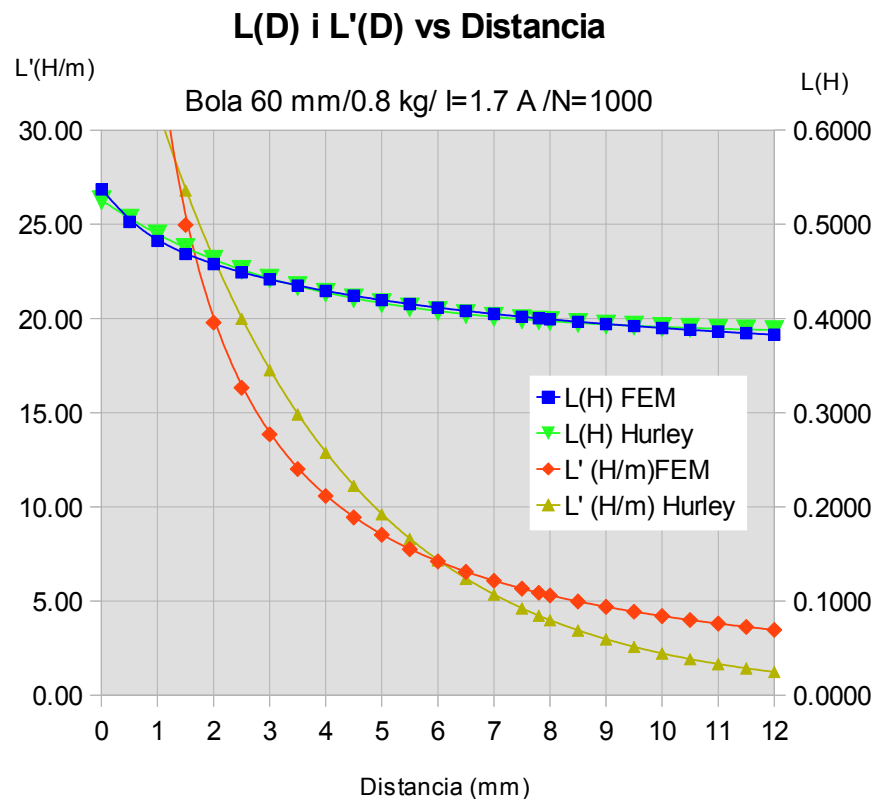


Figura 7 Funcions de l'Autoinducció L(H) i la seva derivada L'(H)

Es pot veure que les dues funcions d'autoinducció L(H)FEM i L(H)Hurley derivades de les dades calculades pel program FEM de la columna 3 a través d'una funció potencial i un altra d'exponencial son pràcticament equivalents en quant al seus valors numèrics, però no en les seves pendents. Això implica, al meu entendre, que el model de Hurley no es gaire adient per calcular el corrent teòric de levitació a partir de la funció d'autoinducció Per exemple, per una distància de levitació $D=7.8$ mm el valor de la força magnètica F_m seria de $0.5 \cdot 4.2223 \cdot 1.7^2 = 6.10\text{N}$ en lloc dels 7.848N

Com a resum d'aquest apartat arribo a la conclusió que'l **sistema mes adequat per calcular l'autoinducció de la bobina i la força magnètica derivada es a través del sistema d'anàlisis per elements finits.**

2.6- Calcul del coeficient d'autoinducció L(D) de la bobina

Com acabem de dir usarem el Sistema d'Elements Finitos a través del program FEMM per a fer aquestos càlculs. Com a punt de partida començarem a dibuixar un model concret amb un electroimant, amb una bobina, per exemple, de 1000 a 1500 voltes que pugui admetre corrents fins a 5A i nucli de ferro de 6 fins a 20 mm de diàmetre i com a complement una bola de ferro de 3/4 de polzada que es pugui desplaçar entre 0 i 30 mm del nucli. El carret de la bobina serà de 7,25x34x21, ja que'l tenim amb existència, i ja hem fet càlculs previs amb ell. El model d'inici podria ser doncs el que es mostra a continuació a la figura 7 en el que el nucli es de ferro pur de 20mm de diàmetre i la bobina es de 1500 voltes, utilitzant el carret abans mencionat. Per la simulació farem passar corrents de 0-2A .La bola es de ferro pur i al inici de la simulació esta situada a 0 mm del nucli i es va desplaçant fins a 30 i la seva massa es de **28.6 gr**, es a dir de $28.6 \cdot 9.81 / 1000 = 0.28 \text{ N}$. En el cas del model aquí dibuixat la bola esta situada a 27 mm del nucli. Es pot veure que el mallat del model utilitza triangles de 1 mm – als llocs que mes ens interessa- i també de 2,3 i 4 mm per tal d'alleugerar el nombre total d'elements del model, que es de 16919. Pels càlculs utilitzem un model axisimètric que ens permet calcular la força d'atracció de la bola a les diferents distancies, així com les densitats de flux B per diferents punts del nucli, puguen constatar si treballem amb regim lineal o amb saturació i, també com he dit abans, el coeficient d'autoinducció de la bobina per les diferents posicions de la bola

Per simplificar la feina de calcul es confecciona un script amb llenguatge Lua que ens permet obtindre i traslladar les dades a un full de calcul pel seu posterior tractament

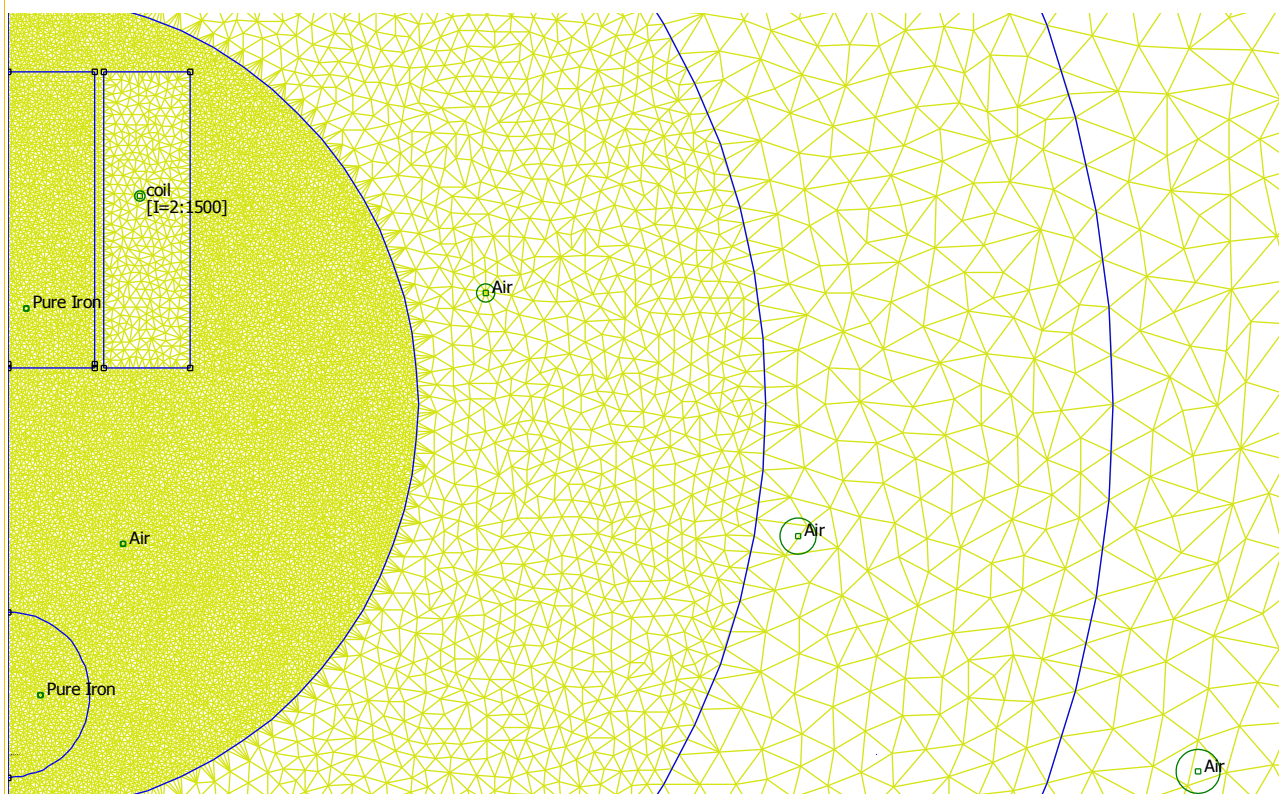


Figura 7 Model amb mallat pel simulador bola levitadora

A continuació es presenta a la figura 8 una imatge de la pantalla del post processador del model anterior que mostra la densitat de flux per un corrent de 2A i la bola situada a 27 mm del nucli de 20 mm de diàmetre

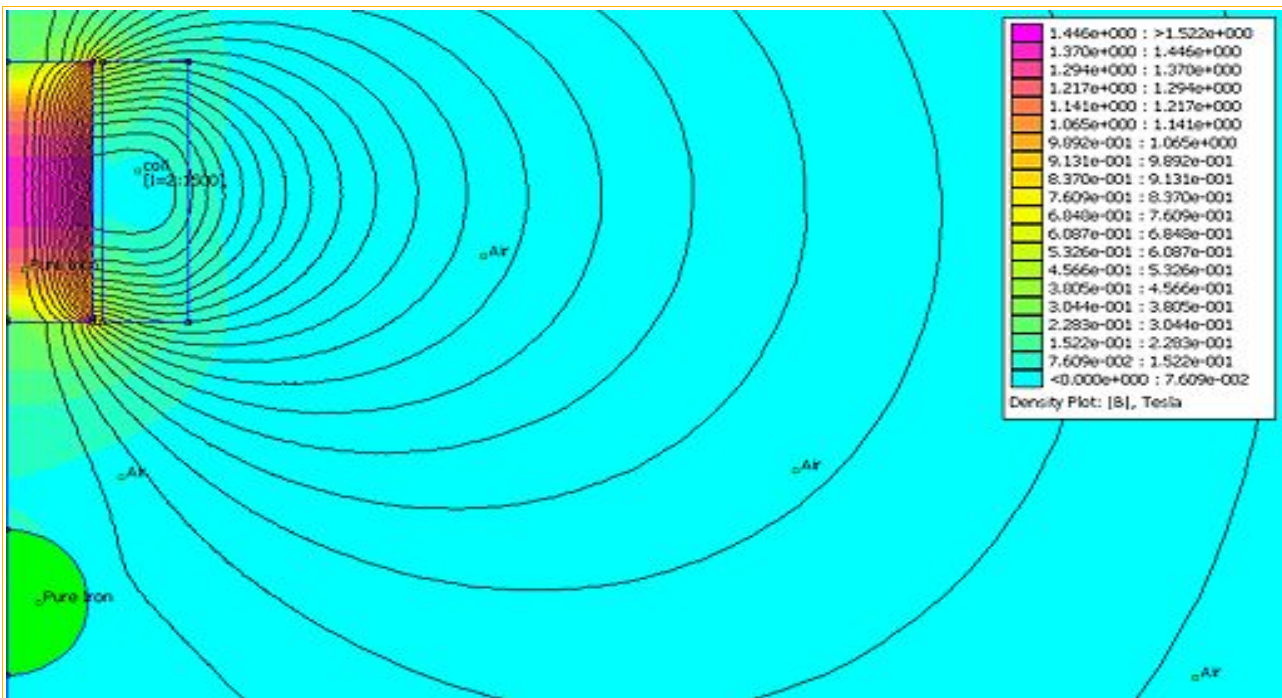


Figura 8 Postprocesador presentant la densitat de flux B i dades numèriques

D (mm)	I=1A			I=1.5A			I=2A		
	Força (N)	B (Tesla)	L (Henry)	Força (N)	B (Tesla)	L (Henry)	Força (N)	B (Tesla)	L (Henry)
0	17.3148	2.8218	0.1333	28.4432	2.8976	0.1326	118.9690	3.2209	0.1290
1	2.0744	0.3381	0.1245	4.6673	0.5071	0.1245	51.5338	1.6788	0.1242
2	1.2265	0.2007	0.1214	2.7596	0.3011	0.1214	30.5492	1.0017	0.1211
3	0.8630	0.1453	0.1193	1.9417	0.2180	0.1193	21.5091	0.7257	0.1191
4	0.6478	0.1160	0.1178	1.4575	0.1740	0.1178	16.1512	0.5793	0.1176
5	0.5029	0.0981	0.1167	1.1315	0.1472	0.1167	12.5422	0.4901	0.1165
6	0.3974	0.0870	0.1158	0.8940	0.1304	0.1158	9.9121	0.4343	0.1156
7	0.3180	0.0794	0.1150	0.7155	0.1190	0.1150	7.9340	0.3964	0.1149
8	0.2566	0.0742	0.1145	0.5773	0.1113	0.1145	6.4018	0.3706	0.1143
9	0.2085	0.0706	0.1140	0.4692	0.1058	0.1140	5.2039	0.3524	0.1139
10	0.1705	0.0679	0.1137	0.3837	0.1019	0.1137	4.2554	0.3394	0.1135
11	0.1399	0.0661	0.1133	0.3148	0.0991	0.1133	3.4913	0.3300	0.1132
12	0.1155	0.0647	0.1131	0.2599	0.0970	0.1131	2.8829	0.3231	0.1130
13	0.0958	0.0636	0.1129	0.2155	0.0954	0.1129	2.3902	0.3179	0.1127
14	0.0797	0.0628	0.1127	0.1792	0.0942	0.1127	1.9880	0.3137	0.1126
15	0.0666	0.0622	0.1126	0.1499	0.0933	0.1126	1.6633	0.3107	0.1125
16	0.0559	0.0617	0.1124	0.1258	0.0926	0.1124	1.3950	0.3083	0.1123
17	0.0471	0.0613	0.1123	0.1059	0.0920	0.1123	1.1751	0.3065	0.1122
18	0.0398	0.0610	0.1122	0.0896	0.0916	0.1122	0.9937	0.3050	0.1121
19	0.0338	0.0608	0.1122	0.0760	0.0912	0.1122	0.8435	0.3038	0.1121
20	0.0287	0.0606	0.1121	0.0647	0.0909	0.1121	0.7175	0.3029	0.1120
21	0.0246	0.0604	0.1121	0.0553	0.0907	0.1121	0.6133	0.3020	0.1119
22	0.0210	0.0603	0.1120	0.0473	0.0905	0.1120	0.5252	0.3014	0.1119
23	0.0181	0.0602	0.1120	0.0407	0.0903	0.1120	0.4517	0.3008	0.1119
24	0.0156	0.0601	0.1119	0.0351	0.0902	0.1119	0.3895	0.3005	0.1118
25	0.0135	0.0601	0.1119	0.0303	0.0901	0.1119	0.3365	0.3001	0.1118
26	0.0117	0.0600	0.1119	0.0263	0.0900	0.1119	0.2921	0.2999	0.1118
27	0.0102	0.0600	0.1119	0.0229	0.0899	0.1119	0.2538	0.2996	0.1118
28	0.0089	0.0599	0.1118	0.0199	0.0899	0.1118	0.2211	0.2994	0.1117
29	0.0077	0.0599	0.1118	0.0174	0.0898	0.1118	0.1932	0.2992	0.1117
30	0.0068	0.0598	0.1118	0.0152	0.0898	0.1118	0.1688	0.2990	0.1117

Utilitzant les dades de la taula anterior que han estat calculades pel post processador amb un script Lua, podem representar l'autoinducció amb funció de la distància D de la bola al nucli del electroimant

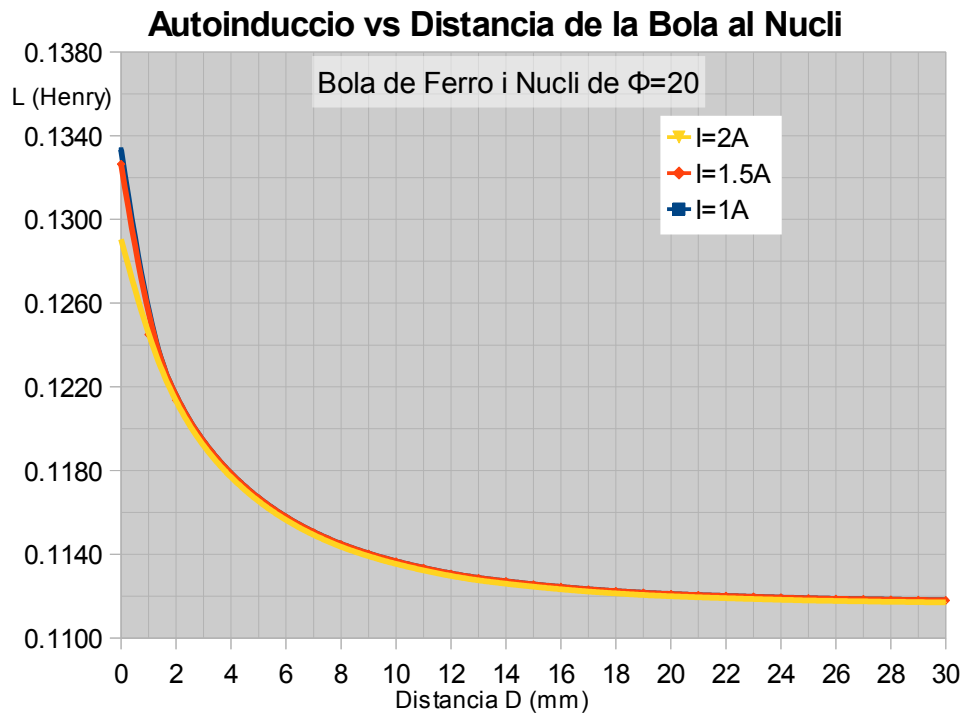


Figura 9- Autoinducció versus Distància Bola Nucli

A continuació a la figura 10 anem a representar els valors de la força magnètica sobre la bola amb funció de les distàncies al nucli, amb gràfiques agrupades pel valor del corrent de la bobina

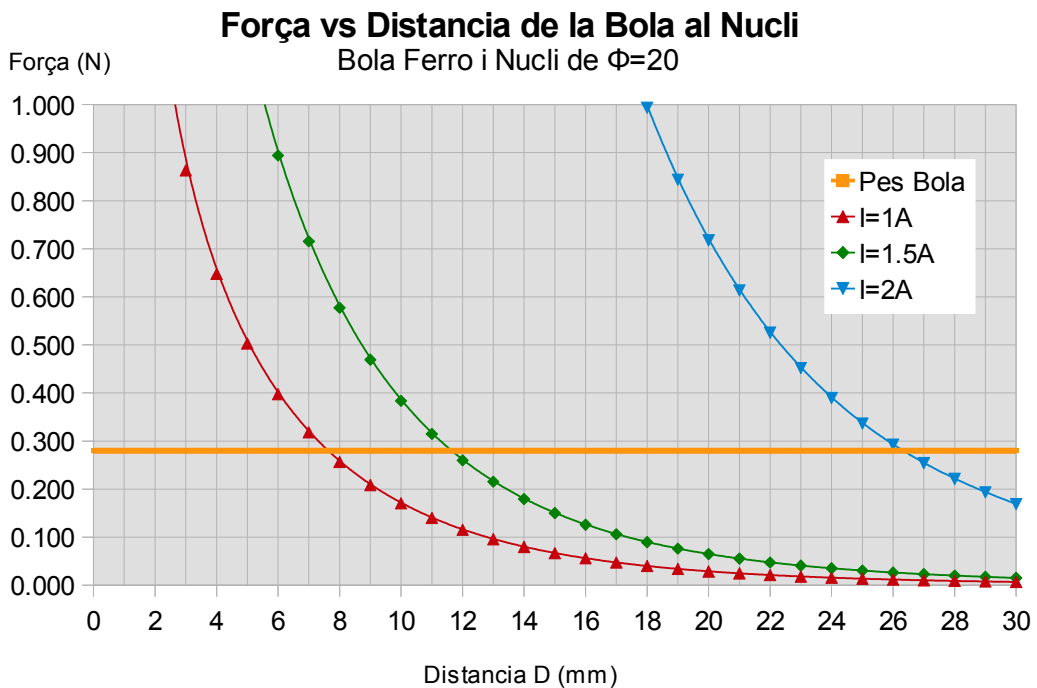


Figura 10- Força versus Distància de la Bola al nucli

Aquestes gràfiques ens indiquen que per petits desplaçaments de la bola cap al nucli hi ha un fort increment de la força d'atracció, lo que fa que, una vegada s'ha superat la distancia de levitació, la bola acceleri i acabi impactant contra el nucli. Per una distancia mes petita que la de levitació la bola acabara enganxada al nucli i per una mes gran la bola caurà; això ens indica que la levitació esta en un punt critic d'equilibri totalment inestable i per tant es necessita una electrònica que solventi aquesta situació.

La linea horitzontal groga representa el pes de la bola de 0.28 N i l'intersec-cio amb cada una de les gràfiques dona possibles punts de levitació. Per tant la bola pot levitar,;

per un corrent de 1A, a uns 7.5 mm
per un corrent de 1.5 A a uns 11.5 mm i
per un corrent de 2A , a uns 26 mm

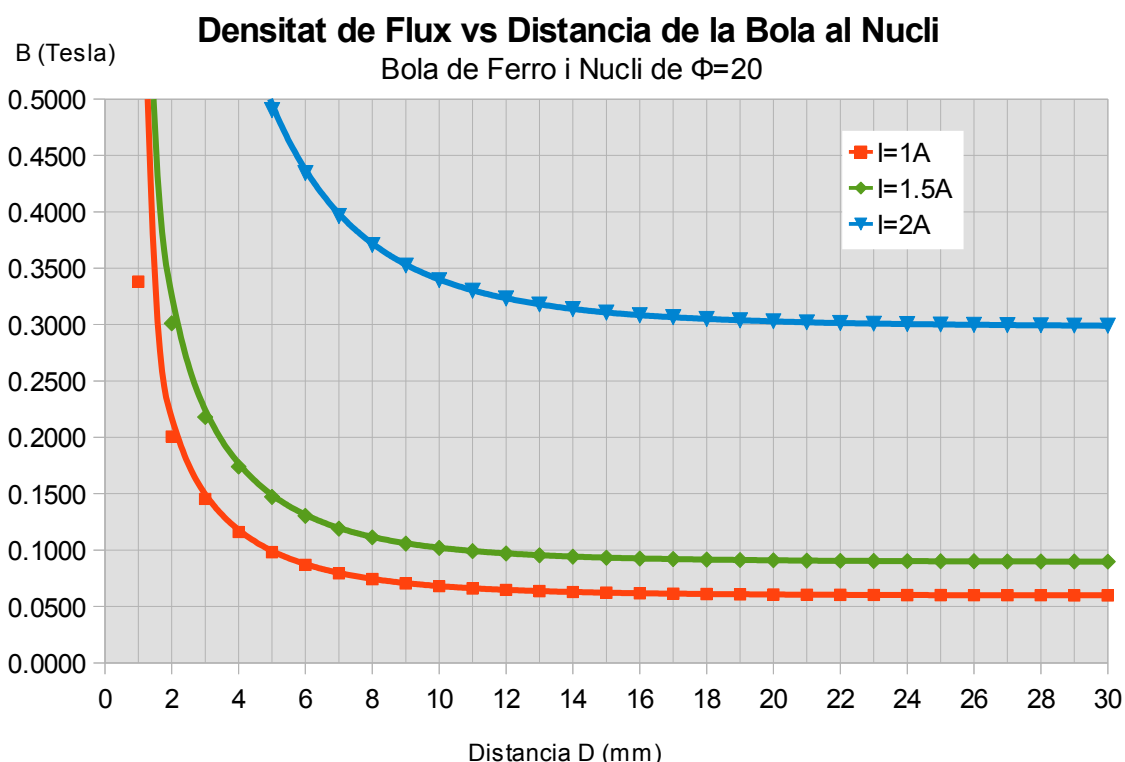


Figura 11- Densitat de Flux B versus distancia D de la bola al nucli

La figura 11 presenta els valors de la densitat de flux B al centre de la superfície del nucli, situada lo mes aprop de la bola, amb funció dels corrents de la bobina. Es pot observar que als punts de levitació per I=1A i 1.5A la densitat de flux B esta pràcticament entre 500 i 1000 Gauss i a 2A esta aprop dels 3000 Gauss i que la derivada als punts de levitació es pràcticament plana..Aquest ultim detall fa que no sigui recomanable utilitzar sensors Hall situats amb aquesta superfície del nucli per detectar la posició de la bola, a través del camp magnètic., degut a la poca sensibilitat que tendrien per detectar petits canvis de la posició de la bola. Per altra part hi ha un inconvenient afegit, ja que la gama de treball dels sensors Hall de resposta lineal, que es troben al mercat , esta normalment per sota dels 1000/2000 Gauss. Per tot això, per aquest tipus de levitació amb bola de ferro s'acostuma a utilitzar un sensor fotoelèctric per poder detectar adequadament el moviment de la bola.

3- Influència del diàmetre del nucli amb la distància de levitació

Anem ara a calcular, amb el model d'element finits, la força d'atracció amb funció de la distància de la bola al nucli, fent variar només el diàmetre del nucli i deixant constants tots els altres paràmetres del model com són: diàmetre de la bola, qualitat del imant, nombre de voltes de la bobina i el corrent. Utilitzarem nuclis amb diàmetres que van des de 6 fins a 20 mm i amb increments de 2 mm. La bola és de 19 mm de diàmetre amb imant N37. El nombre de voltes és de 1500 i el corrent és de 0.2A. Es poden veure els resultats a la figura 15

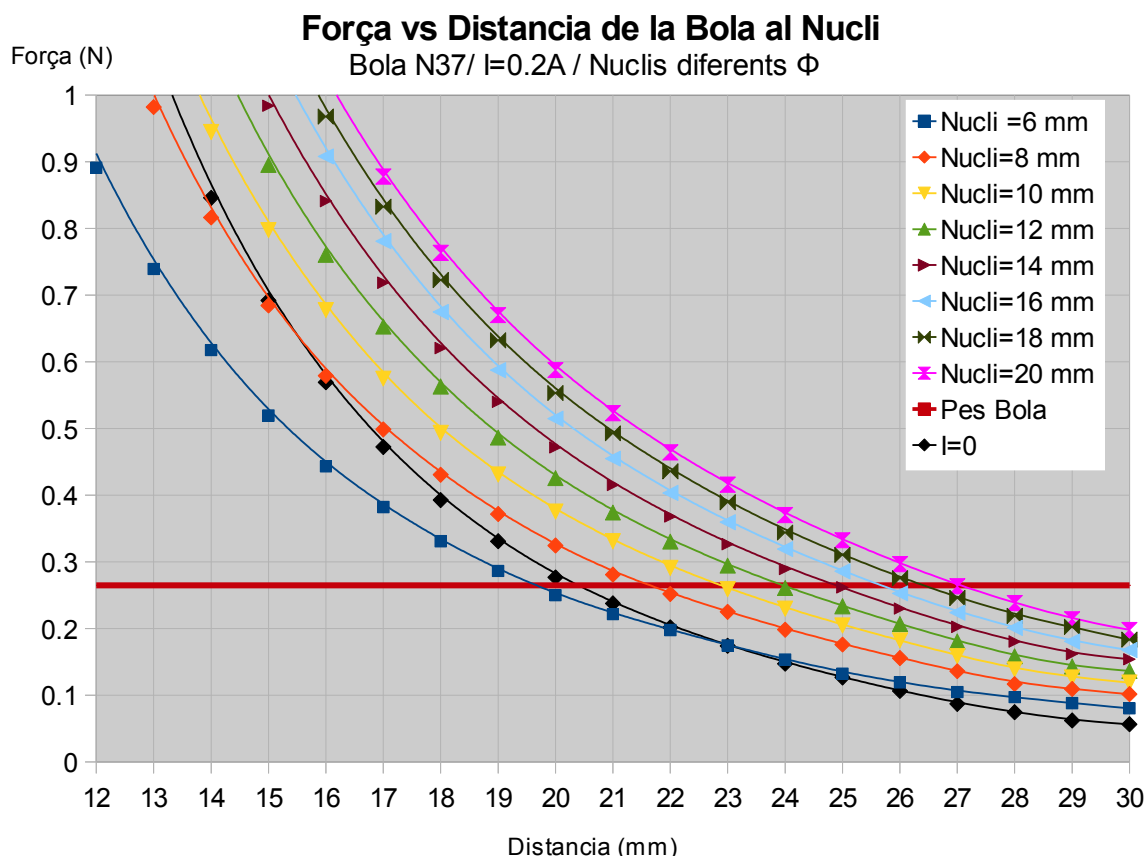


Figura 15- Força versus distància per diferents diàmetres

La primera cosa que es pot fàcilment observar és que a mida que el diàmetre va creixent també ho fa la distància de levitació, encara que el ritme de creixement es cada vegada més petit.

La corba de color negre representa la força versus la distància quan el corrent de la bobina és zero i mostra que la força és més gran que 0.265 N per sota dels 20 mm. Per tant la levitació amb un nucli de 6 mm és totalment impossible, doncs la bola sempre estarà enganxada al nucli.

Si es pretén fer levitar una bola carregada amb un objecte afegit, és a dir amb un pes total posem per exemple de 0.6 N, les distàncies de levitació quedarien reduïdes entre 16 i 20 mm i els diàmetres de 6 i de 8 tendrien que quedar exclosos.

Com a norma general utilitzar el diàmetre de 20 mm, o el màxim permès.

4 – Sistemes detectors de la posició de la bola

Si tornem a l'idea bàsica de funcionament que es descriu a la figura 1 veiem que necessitem un senyal H, generat per un sensor fotoelèctric, que subministra informació de la posició i moviment de la bola al circuit electrònic.

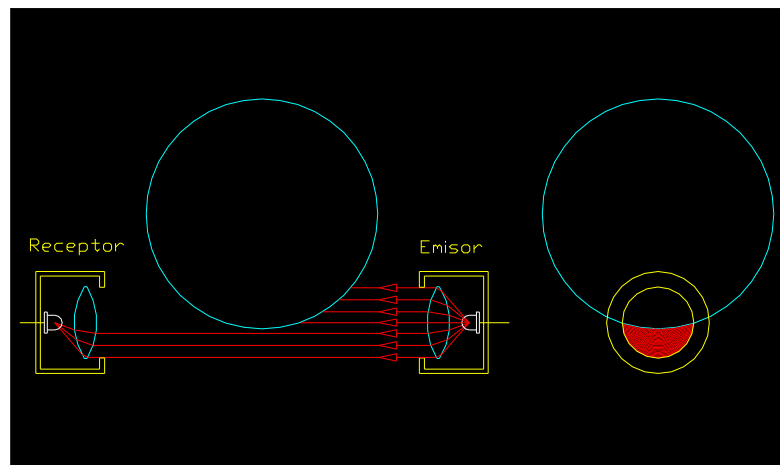


Figura 12-Sensor Fotoelèctric

El sensor fotoelèctric està constituït per un emissor en el que un led o laser, situat en el focus d'una lent, transmet un feix de llum uniforme que arriba a un receptor constituït també per un altra lent idèntica condensadora i un fotodiode que detecta la llum que arriba. La bola eclipsa part del feix de llum i, segons la seva posició, deixa passar més o menys llum. Uns diaframes tant a l'emissor com al receptor seleccionen la llum emesa i la rebuda. Aquest tipus de sensor pot ser molt sensible i detecta petites variacions de la posició de la bola.

Un altra forma de detectar la posició de la bola es a traves d'un sensor lineal d'efecte Hall, estratègicament situat, que detecti la densitat de flux B , sempre i quant aquesta B indiqui directament la distancia de la bola al nucli. Si tornem a la figura 10 podem veure que a les distancies curtes fins a uns 8 mm la B es una bona resposta per identificar distancies, però a mida que anem progressant cap a la dreta la sensibilitat d'aquest tipus de sensor es va degradant. Per quantificar aquesta situació anem a calcular la sensibilitat d'aquest sensor utilitzant un Hall A1301 que te una resposta de 2.5mV/Gauss, Amb les dades numèriques de la figura 7 per les possibles distancies de levitació de 8,12 i 27 mm tenim les sensibilitats que s'indiquen a la taula següent. Hi ha que tenir present que la densitat de flux B depèn no solament de la distancia de la bola sinó també del corrent de la bobina

D(mm)	I (A)	B(Tesla)	mV/mm	D(mm)	I (A)	B(Tesla)	mV/mm	D(mm)	I (A)	B(Tesla)	mV/mm
7	1	0.0794	129.1	11	1.5	0.0991	51.8	26	2	0.2999	7.0
8	1	0.0742	91.0	12	1.5	0.0970	39.6	27	2	0.2996	4.8
9	1	0.0706	65.2	13	1.5	0.0954	31.1	28	2	0.2994	4.9

Es pot apreciar, una vegada més, que per la gama alta de levitació a 27 mm aquest tipus de sensor no es gaire recomanable, ja que te una sensibilitat de 4.8 mV/mm, però en canvi per la gama baixa de 8 mm aquesta es de 91 mV/mm . Recordem que tot l'anterior es valid quan utilitzem boles de ferro pur, però aquesta situació pot canviar una mica quant s'utilitzen boles de imants permanents.

4.1- Levitació amb bola imant de terres rares

Hem vist al gràfic de la figura 10 que per fer levitar una bola de ferro a uns 26 mm es necessita un corrent de 2A. Per fer levitar, a la mateixa distancia, però amb menys corrent, podríem substituir la bola de ferro per un altra a base de un imant de terres rares, per exemple de Nd Fe B, de forma que aquest crea una força magnètica suplementaria que pot reforçar a la generada per la bobina. Anem a estudiar aquesta possibilitat amb una bola imant de Nd de massa 27gr i per tant de $27 \times 9.81 = 0.265$ N de pes. Aplicant el sistema d'element finits com hem fet abans, després de varies passades, arribem als següents resultats de la figura 13.

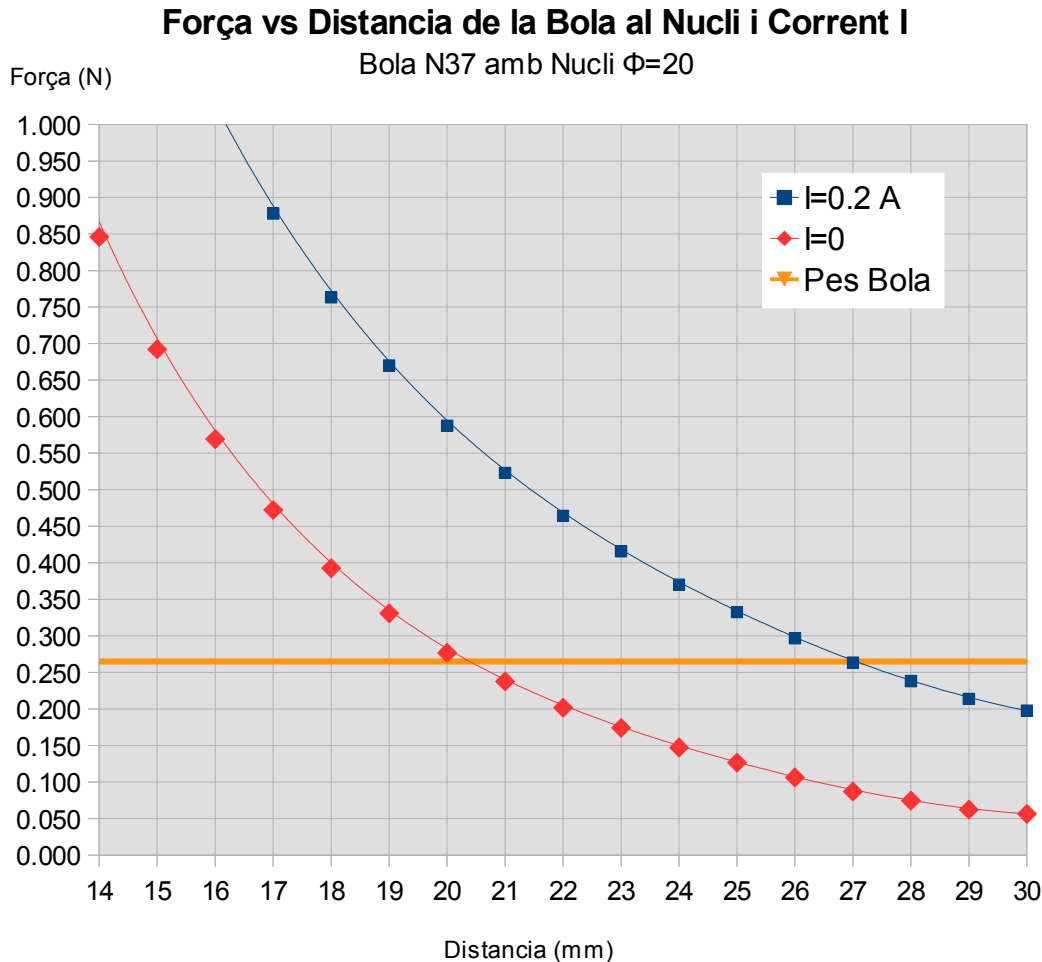


Figura 13- Força versus Distancia al Nucli i diverses corrents

A través d'aquest gràfic podem observar que la bola N37, amb electroimant de 1500 voltes i nucli de $\Phi 20$, necessita només 0.2A per levitar a 27 mm. Recordem que abans la bola de ferro necessitava 2A per levitar a la mateixa distancia: es a dir que hem reduït el corrent 10 vegades.

El gràfic presenta -a través de la corba vermella- el cas en que no circula corrent per la bobina i ens indica que a 27 mm la bola contribueix amb 0.087 N a la força de levitació i que quant la distancia de la bola al nucli sigui més petita de 20 mm no hi haurà possibilitat de levitar ja que la bola sortirà disparada cap al nucli on quedara enganxada

A continuació anem a estudiar la possibilitat d'utilitzar un sensor Hall, situat al centre del nucli de la superfície més aprop de la bola, per detectar la posició d'aquesta. Utilitzant les dades facilitades pel postprocesador del programa abans esmentat d'element finits podem construir la gràfica següent de la figura 14

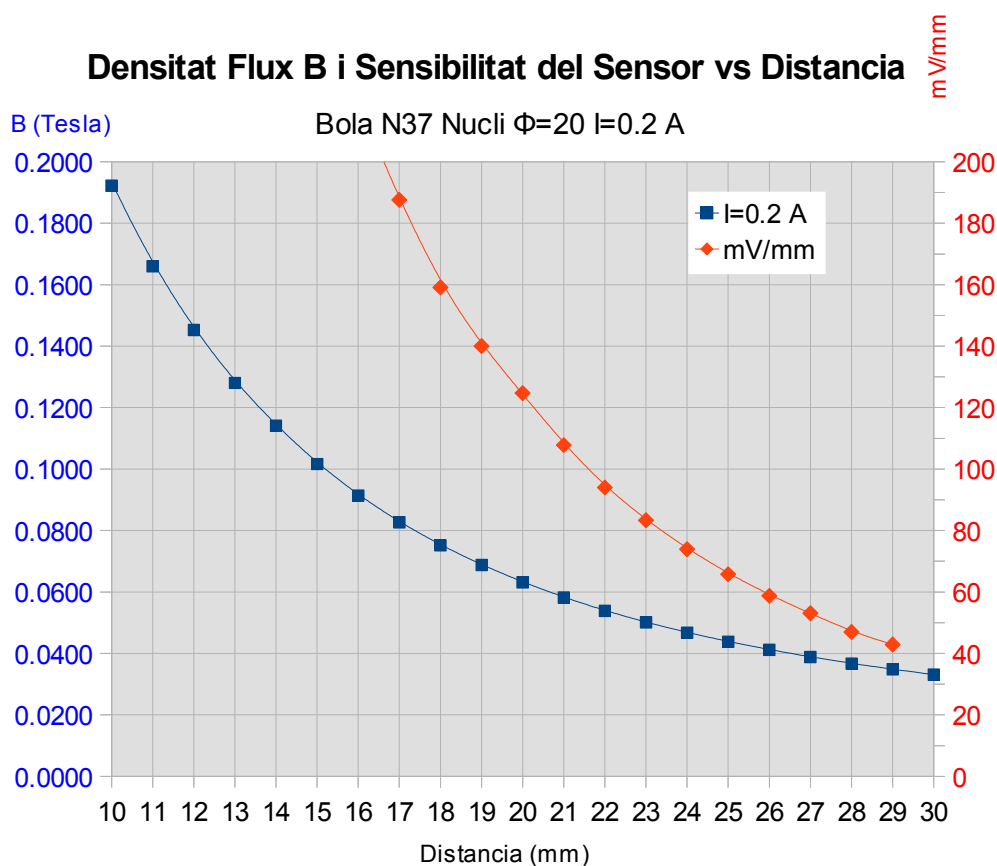


Figura 14- Densitat de Flux i Sensibilitat del sensor de Hall

A la distància de 27 mm es pot veure que el sensor detectaria uns 400 Gauss, que amb un Hall A1301 que genera 2.5 mV/Gauss donaria una sortida de 1V, i amb una sensibilitat de detecció d'uns 53 mV/mm a l'entorn dels 27 mm de levitació.

Es pot veure que a partir d'una distància més gran de 15 mm la densitat de flux queda per sota dels 1000 Gauss i per tant el sensor Hall sortirà de saturació i tindrà una resposta no lineal però que es podrà utilitzar sense gaires problemes. No obstant cal recordar que la resposta del Hall és la suma del camp creat per la bola més el creat pel corrent de la pròpia bobina i per tant no és un fidel reflex de la posició de la bola. Posteriorment més endavant estudiarem una forma electrònica de solucionar aquest inconvenient.

La bola imant aquí mencionada està constituïda per una esfera d'imant N37 de Nd Fe B en la que la N significa que aquest tipus d'imant pot utilitzar-se fins a 80° i el 37 és el producte energètic del imant expressat amb MegaGaussxOersted. Com més alt és aquest número més força d'atracció té l'imant. Aquests tipus d'imants de terres rares acostumen a estar recoberts per una capa brillant de crom sobre una base de coure niquel.

4.2- Com millorar la precisió del detector de posició de la bola

Sabem que quant s'utilitza un sensor de Hall, per detectar la posició de la bola, aquest es limita a donar una tensió elèctrica que reflexa el flux magnètic total que li arriba, sense poder discriminar si aquest camp es creat per la bola magnètica o pel corrent de la bobina del electroimant. Anem a continuació a estudiar la distribució de la densitat de flux que crea la bola sola a mida que s'atansa al nucli, amb quatre punts determinats, fent que'l corrent de la bobina sigui constant igual a zero. Utilitzarem quatre punts del nucli, del nostre model que ja hem fet servir, i que son els definits per les coordenades situades en la perifèria del perfil del nucli del model axisimètric

R1=0 R2=8.5 R3=8.5 R4=0
Z1=44.3757 Z2=44.3757 Z3=78.3707 Z4=78.3707

Els punts 1 i 4 estan situats al eix de simetria i el 2 i el 3 son els situats amb un radi R=8.5 Les dades del postprocesador son les següents:

D(mm)	F(N)	Bz1(T)	Bz2(T)	Bz3(T)	Bz4(T)
0	50.0731	1.7523	0.1515	0.0643	0.0372
1	32.2702	1.1908	0.1721	0.0590	0.0341
2	21.6538	0.8987	0.1795	0.0541	0.0313
3	15.0534	0.7025	0.1768	0.0496	0.0288
4	10.7312	0.5498	0.1692	0.0456	0.0265
5	7.8281	0.4412	0.1593	0.0420	0.0244
6	5.8154	0.3624	0.1483	0.0387	0.0225
7	4.3991	0.2973	0.1371	0.0357	0.0208
8	3.3759	0.2501	0.1260	0.0330	0.0193
9	2.6168	0.2099	0.1155	0.0306	0.0179
10	2.0490	0.1788	0.1058	0.0284	0.0166
11	1.6265	0.1538	0.0967	0.0264	0.0154
12	1.2949	0.1335	0.0884	0.0245	0.0144
13	1.0485	0.1160	0.0809	0.0229	0.0134
14	0.8491	0.1017	0.0741	0.0213	0.0125
15	0.6938	0.0896	0.0680	0.0200	0.0117
16	0.5690	0.0795	0.0624	0.0187	0.0110
17	0.4734	0.0707	0.0574	0.0175	0.0103
18	0.3956	0.0633	0.0529	0.0165	0.0097
19	0.3275	0.0569	0.0488	0.0155	0.0091
20	0.2771	0.0513	0.0451	0.0146	0.0086
21	0.2322	0.0463	0.0417	0.0137	0.0081
22	0.1995	0.0421	0.0386	0.0129	0.0077
23	0.1698	0.0383	0.0358	0.0122	0.0073
24	0.1439	0.0350	0.0333	0.0116	0.0069
25	0.1238	0.0320	0.0310	0.0109	0.0065
26	0.1060	0.0294	0.0289	0.0104	0.0062
27	0.0925	0.0270	0.0270	0.0098	0.0058
28	0.0807	0.0249	0.0252	0.0093	0.0056
29	0.0710	0.0230	0.0236	0.0089	0.0053
30	0.0614	0.0213	0.0221	0.0084	0.0050

Densitat de Flux Bz vs Distancia

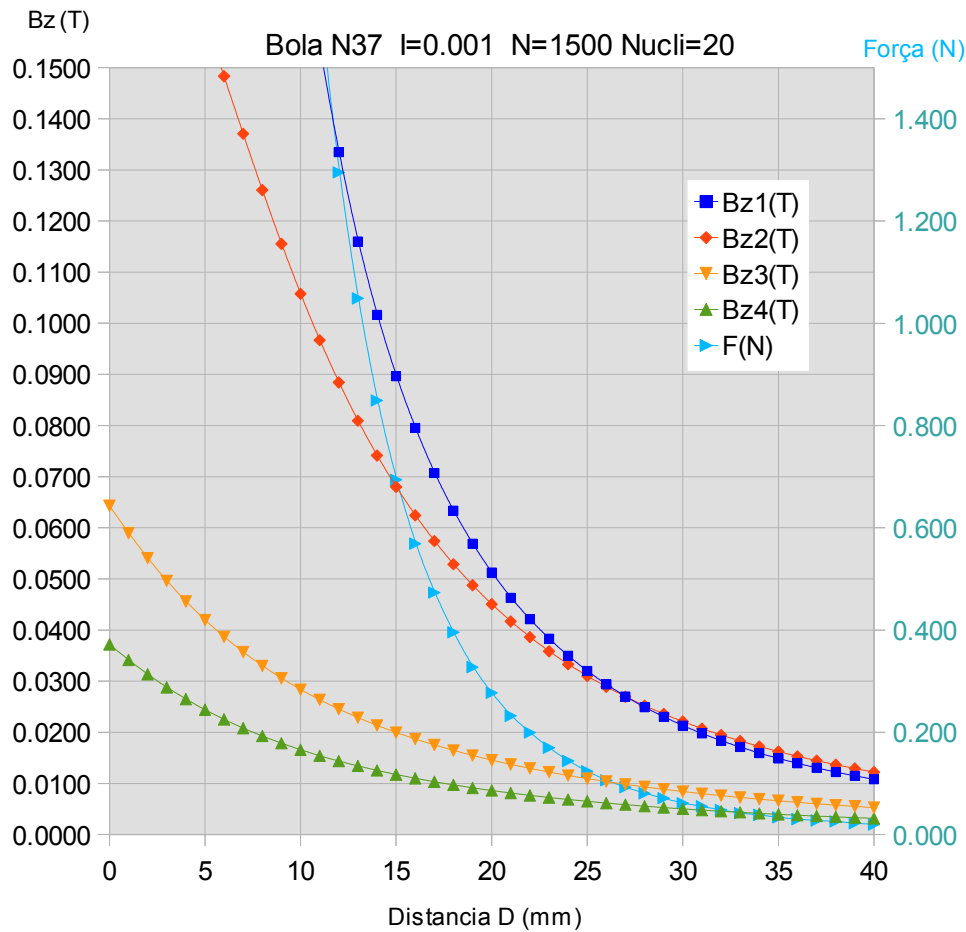


Figura 16- Densitat de Flux vs Distancia de la Bola

Es pot observar que a la distància de levitació -que es a uns 27 mm per un pes de 0.275N- les respostes del Hall pel punt 1 i pel punt 2 son pràcticament molt similars i les dels punts 3 i 4 son molt baixes degut a la seva distància molt mes allunyada de la bola

Recordem que aquesta gràfica representa exclusivament la densitat de flux creat pel imant de la bola per a cada distància al nucli i que'l corrent de la bobina es zero pràcticament

Ara anem a veure que passa deixant la bola a una distància fixa, per exemple a 25 mm, i fem variar el corrent des de 0.02 fins a 0.3A pels mateixos quatre punts anteriors.

A continuació , a la pagina següent, presentem els resultats de les densitats de flux B_z del postprocesador pels quatre punts mencionat abans fent variar el corrent amb increments de 0.02A

D=25 mm N=1500		R1=0 Z1=44.3757	R2=8.5 Z2=44.3757	R3=8.5 Z3=78.3707	R4=0 Z4=78.3707	
I(A)	F(N)	Bz1(T)	Bz2(T)	Bz3(T)	Bz4(T)	Bz1-Bz4
0.02	0.1434	0.0331	0.0330	0.0130	0.0076	0.0255
0.04	0.1641	0.0343	0.0352	0.0151	0.0088	0.0255
0.06	0.1847	0.0355	0.0373	0.0172	0.0100	0.0255
0.08	0.2054	0.0367	0.0394	0.0193	0.0112	0.0255
0.10	0.2260	0.0379	0.0415	0.0214	0.0124	0.0255
0.12	0.2466	0.0391	0.0437	0.0236	0.0136	0.0255
0.14	0.2673	0.0403	0.0458	0.0257	0.0148	0.0255
0.16	0.2879	0.0415	0.0479	0.0278	0.0160	0.0255
0.18	0.3085	0.0427	0.0500	0.0299	0.0172	0.0255
0.20	0.3292	0.0439	0.0522	0.0320	0.0184	0.0255
0.22	0.3498	0.0451	0.0543	0.0342	0.0196	0.0255
0.24	0.3705	0.0463	0.0564	0.0363	0.0208	0.0255
0.26	0.3911	0.0475	0.0586	0.0384	0.0220	0.0255
0.28	0.4117	0.0487	0.0607	0.0405	0.0232	0.0255
0.30	0.4324	0.0499	0.0628	0.0426	0.0244	0.0255

Densitat de Flux Bz vs Corrent

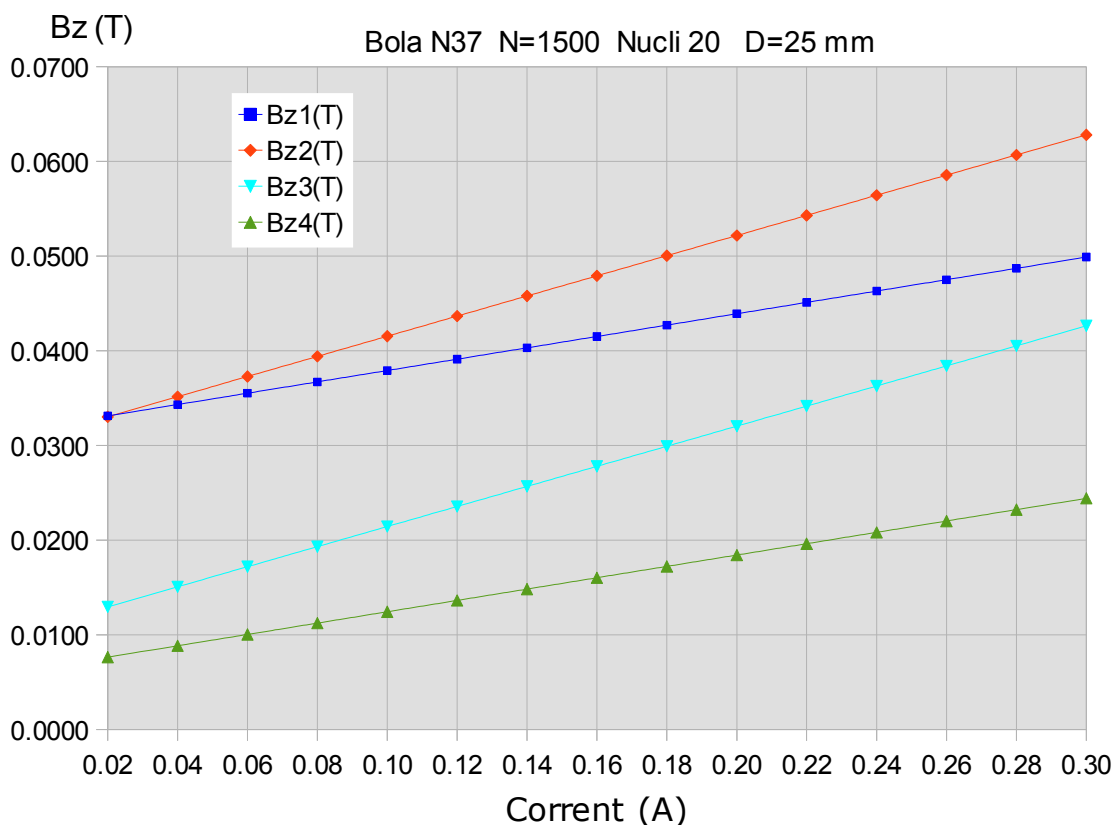


Figura 17 Densitat de Flux vs Corrent amb bola a distancia fixa de 25 mm

Podem observar que els punts 1 i 4 i els 2 i 3 presenten per parells la mateixa pendent i que la densitat de flux es una funció lineal del corrent. Es pot veure que la diferencia Bz1-Bz4 -columna 7- es constant i independent del corrent de la bobina i precisament igual a la densitat de flux creat per la bola als 25 mm de distancia.

Així doncs, si això es compleix per a cada distància de la bola, podrem implementar un sistema, amb un segon sensor Hall situat al punt 4, que a través d'un amplificador diferencial proporcionari un senyal Bz1-Bz4 només de la posició de la bola amb independència del corrent de la bobina.

A continuació presentem les gràfiques del punt Bz1 fent variar el corrent entre 0 i 0.2A per les diferents posicions de la bola que demostren que és factible aquest tipus de correcció, ja que totes les corbes tenen exactament la mateixa pendent i per tant la diferència Bz1-Bz4 és aplicable per a qualsevol distància D de la bola

Aquesta millora es desenvoluparà amb més detall, però més endavant, quant ens fiquem amb el disseny del circuit electrònic. **Podem indicar que amb aquesta mesura el sistema de detecció del moviment de la bola amb doble sensor Hall pot ser equivalent al sistema fotoelèctric abans mencionat.**

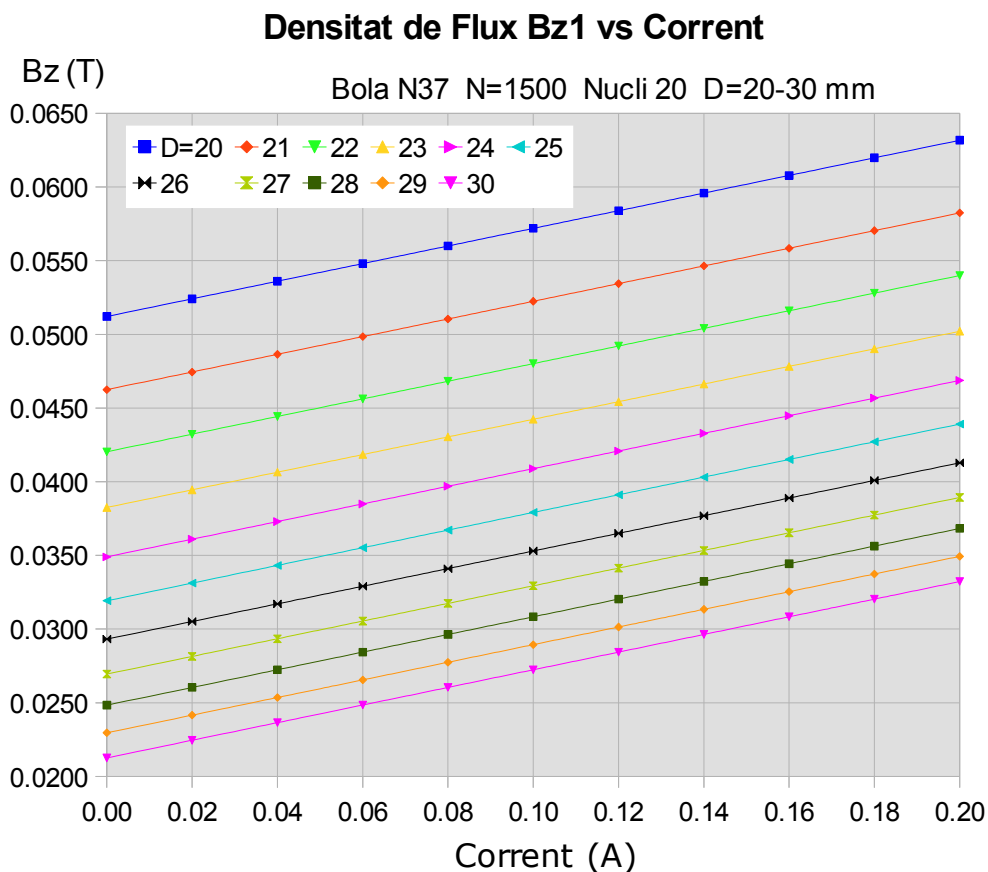


Figura 18- Densitat de Flux vs Corrent per diferents distàncies D de la bola

5- Paràmetres bàsics per dissenyar un levitador

Anem a veure quins son els paràmetres bàsics per poder dissenyar un sistema levitador. Com a punt de partida suposem que tenim un electroimant constituït per una bobina $a * b = 6 * 36.8$ mm de dimensions, amb 1512 espires i un nucli de ferro dolç de 18 mm de diàmetre i 40 mm de llarg i que volem fer levitar una bola imant N37 de 3/4" entre 22 i 30 mm de distancia. Suposem també que utilitzarem un parell de sensors lineals de Hall, situats als punts Z1 i Z4 per mesurar elèctricament les distàncies entre la bola i el nucli. Amb aquestes dades dibuixarem un model -com el que es presenta a la figura 19 següent- que ens servirà com a entrada pel programa d'element finits FEMM que ens permetrà calcular la força magnètica $F(N)$, l'autoinducció de la bobina $L(D)$, i les densitats de flux BZ1 i BZ4 amb funció de cada distància D entre la bola i el nucli i per cada corrent I de la bobina.

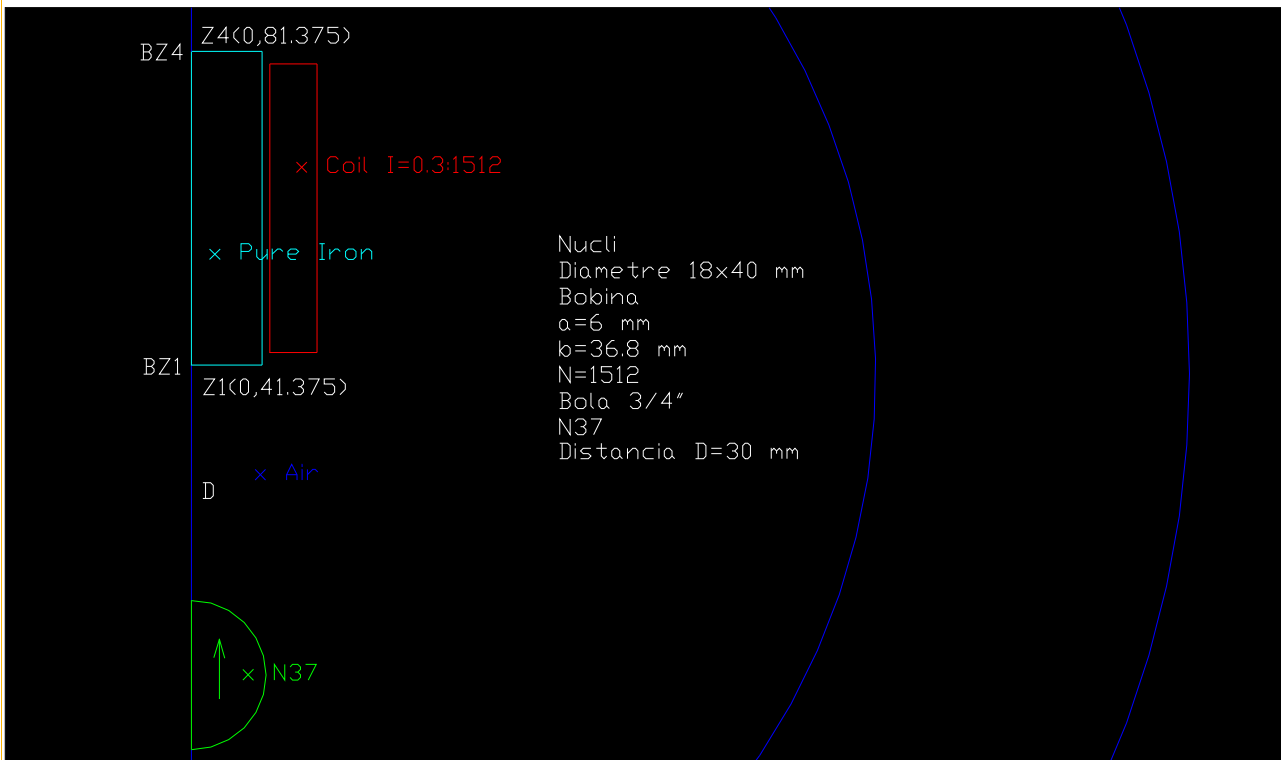


Fig 19 Model axisimètric del sistema levitador

Començarem amb una distància $D=30$ fixa i farem variar el corrent amb increments de 10 mA. Quant trobem valors de la força pròxims al pes de la bola – 0.264N- farem variar el corrent amb increments més petits de 1 mA a fi d'afinar més els resultats del corrent de levitació per aquella distància D . El pas següent serà incrementar la distància en 1 mm i així successivament anirem trobant els corrents de levitació per cada distància.

Les dades que'l programa FEMM ens ha calculat son les següents:

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
30	0.300	0.2588	0.160	0.0418	0.0247	0.0171
30	0.301	0.2595	0.160	0.0418	0.0248	0.0171
30	0.302	0.2601	0.160	0.0419	0.0249	0.0171
30	0.303	0.2608	0.160	0.0420	0.0249	0.0171
30	0.304	0.2614	0.160	0.0420	0.0250	0.0171
30	0.305	0.2621	0.160	0.0421	0.0251	0.0171
30	0.306	0.2627	0.159	0.0422	0.0251	0.0171
30	0.307	0.2634	0.159	0.0422	0.0252	0.0171
30	0.308	0.2640	0.159	0.0423	0.0253	0.0171
30	0.309	0.2647	0.159	0.0424	0.0253	0.0171
30	0.310	0.2654	0.159	0.0424	0.0254	0.0171

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
29	0.270	0.2605	0.167	0.0415	0.0230	0.0185
29	0.271	0.2612	0.167	0.0416	0.0231	0.0185
29	0.272	0.2619	0.167	0.0417	0.0231	0.0185
29	0.273	0.2626	0.167	0.0417	0.0232	0.0185
29	0.274	0.2633	0.166	0.0418	0.0233	0.0185
29	0.275	0.2640	0.166	0.0419	0.0233	0.0185
29	0.276	0.2647	0.166	0.0419	0.0234	0.0185
29	0.277	0.2654	0.166	0.0420	0.0235	0.0185
29	0.278	0.2661	0.166	0.0421	0.0235	0.0185
29	0.279	0.2668	0.166	0.0421	0.0236	0.0185
29	0.280	0.2675	0.165	0.0422	0.0237	0.0185

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
28	0.240	0.2638	0.176	0.0415	0.0213	0.0202
28	0.241	0.2646	0.176	0.0416	0.0214	0.0202
28	0.242	0.2653	0.175	0.0416	0.0214	0.0202
28	0.243	0.2661	0.175	0.0417	0.0215	0.0202
28	0.244	0.2668	0.175	0.0418	0.0216	0.0202
28	0.245	0.2676	0.175	0.0418	0.0216	0.0202
28	0.246	0.2683	0.175	0.0419	0.0217	0.0202
28	0.247	0.2691	0.174	0.0420	0.0218	0.0202
28	0.248	0.2699	0.174	0.0420	0.0218	0.0202
28	0.249	0.2706	0.174	0.0421	0.0219	0.0202
28	0.250	0.2714	0.174	0.0422	0.0220	0.0202

Es pot observar que els valors Bz1-Bz4 son constants per cada distancia fixa D amb independència dels valors del corrent com es va demostrar al apartat 4.2

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
27	0.200	0.2570	0.191	0.0410	0.0190	0.0221
27	0.201	0.2578	0.190	0.0411	0.0190	0.0221
27	0.202	0.2586	0.190	0.0412	0.0191	0.0221
27	0.203	0.2594	0.190	0.0412	0.0192	0.0221
27	0.204	0.2602	0.189	0.0413	0.0192	0.0221
27	0.205	0.2611	0.189	0.0414	0.0193	0.0221
27	0.206	0.2619	0.189	0.0414	0.0194	0.0221
27	0.207	0.2627	0.188	0.0415	0.0194	0.0221
27	0.208	0.2635	0.188	0.0416	0.0195	0.0221
27	0.209	0.2643	0.188	0.0416	0.0196	0.0221
27	0.210	0.2652	0.187	0.0417	0.0196	0.0221

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
26	0.170	0.2597	0.208	0.0414	0.0173	0.0241
26	0.171	0.2606	0.208	0.0415	0.0174	0.0241
26	0.172	0.2614	0.207	0.0416	0.0174	0.0241
26	0.173	0.2623	0.207	0.0416	0.0175	0.0241
26	0.174	0.2632	0.206	0.0417	0.0176	0.0241
26	0.175	0.2641	0.206	0.0418	0.0176	0.0241
26	0.176	0.2650	0.205	0.0418	0.0177	0.0241
26	0.177	0.2659	0.205	0.0419	0.0178	0.0241
26	0.178	0.2667	0.204	0.0420	0.0178	0.0241
26	0.179	0.2676	0.204	0.0420	0.0179	0.0241
26	0.180	0.2685	0.203	0.0421	0.0180	0.0241

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
25	0.140	0.2601	0.233	0.0422	0.0157	0.0265
25	0.141	0.2611	0.232	0.0422	0.0158	0.0265
25	0.142	0.2620	0.232	0.0423	0.0158	0.0265
25	0.143	0.2630	0.231	0.0424	0.0159	0.0265
25	0.144	0.2639	0.230	0.0424	0.0160	0.0265
25	0.145	0.2649	0.229	0.0425	0.0160	0.0265
25	0.146	0.2658	0.229	0.0426	0.0161	0.0265
25	0.147	0.2668	0.228	0.0426	0.0162	0.0265
25	0.148	0.2678	0.227	0.0427	0.0162	0.0265
25	0.149	0.2687	0.226	0.0428	0.0163	0.0265
25	0.150	0.2697	0.226	0.0428	0.0164	0.0265

Les línies grogues corresponen als valors de levitació per cada distancia ja que el valor de la força es pràcticament igual al pes de la bola 0.264N

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
24	0.110	0.2597	0.273	0.0432	0.0141	0.0291
24	0.111	0.2607	0.272	0.0433	0.0141	0.0291
24	0.112	0.2617	0.270	0.0433	0.0142	0.0291
24	0.113	0.2628	0.269	0.0434	0.0143	0.0291
24	0.114	0.2638	0.268	0.0435	0.0143	0.0291
24	0.115	0.2649	0.266	0.0435	0.0144	0.0291
24	0.116	0.2659	0.265	0.0436	0.0145	0.0291
24	0.117	0.2669	0.264	0.0437	0.0145	0.0291
24	0.118	0.2680	0.263	0.0437	0.0146	0.0291
24	0.119	0.2690	0.261	0.0438	0.0147	0.0291
24	0.120	0.2700	0.260	0.0439	0.0147	0.0291

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
23	0.080	0.2605	0.343	0.0446	0.0125	0.0321
23	0.081	0.2616	0.341	0.0447	0.0126	0.0321
23	0.082	0.2627	0.338	0.0447	0.0126	0.0321
23	0.083	0.2639	0.335	0.0448	0.0127	0.0321
23	0.084	0.2650	0.333	0.0449	0.0128	0.0321
23	0.085	0.2661	0.330	0.0449	0.0128	0.0321
23	0.086	0.2672	0.328	0.0450	0.0129	0.0321
23	0.087	0.2684	0.326	0.0451	0.0130	0.0321
23	0.088	0.2695	0.323	0.0451	0.0130	0.0321
23	0.089	0.2706	0.321	0.0452	0.0131	0.0321
23	0.090	0.2717	0.319	0.0453	0.0131	0.0321

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4
22	0.050	0.2605	0.500	0.0465	0.0109	0.0356
22	0.051	0.2617	0.493	0.0466	0.0110	0.0356
22	0.052	0.2629	0.486	0.0466	0.0111	0.0356
22	0.053	0.2642	0.479	0.0467	0.0111	0.0356
22	0.054	0.2654	0.472	0.0468	0.0112	0.0356
22	0.055	0.2666	0.466	0.0468	0.0113	0.0356
22	0.056	0.2678	0.460	0.0469	0.0113	0.0356
22	0.057	0.2691	0.454	0.0470	0.0114	0.0356
22	0.058	0.2703	0.448	0.0470	0.0115	0.0356
22	0.059	0.2715	0.442	0.0471	0.0115	0.0356
22	0.060	0.2728	0.437	0.0472	0.0116	0.0356

A continuació seleccionarem cada linea groga de resultats i els presentarem amb un quadre resum de valors de levitació

Taula 5 -Variables per un electroimant de 1512 espires, carret de 36.8x6 mm, nucli de Φ18x40, bola imant N37 de 19 mm i dos sensors Hall A1301

D (mm)	I(A)	F(N)	L(H)	Bz1 (T)	BZ4 (T)	Bz1-Bz4 ΔB (Gauss)
30	0.308	0.2640	0.159	0.0423	0.0253	171
29	0.275	0.2640	0.166	0.0419	0.0233	185
28	0.241	0.2646	0.176	0.0416	0.0214	202
27	0.209	0.2643	0.188	0.0416	0.0196	221
26	0.175	0.2641	0.206	0.0418	0.0176	241
25	0.144	0.2639	0.230	0.0424	0.0160	265
24	0.114	0.2638	0.268	0.0435	0.0143	291
23	0.083	0.2639	0.335	0.0448	0.0127	321
22	0.053	0.2642	0.479	0.0467	0.0111	356
21	0.022	0.2646	1.041	0.0490	0.0096	394

Si representem amb una gràfica -veure figura 20- els valors del corrent (I) amb funció de la distancia de levitació (D) es pot apreciar que el corrent incrementa de forma lineal i l'autoinducció es una funció hiperbòlica .Es poden definir aquestes variables L i I segons les següents funcions, ajustades pel mètode dels mínims quadrats, als valors teòrics

$$L=(D-13.05)/(11.06*D-224.5)$$

$$I=0.6465+0.03172*D$$

$$dI/dD=0.03172 \text{ (A/mm)}$$

Corrent i Densitat de Flux vs Distancia Levitació

Bola N37 Nucli 18 Espires 1512

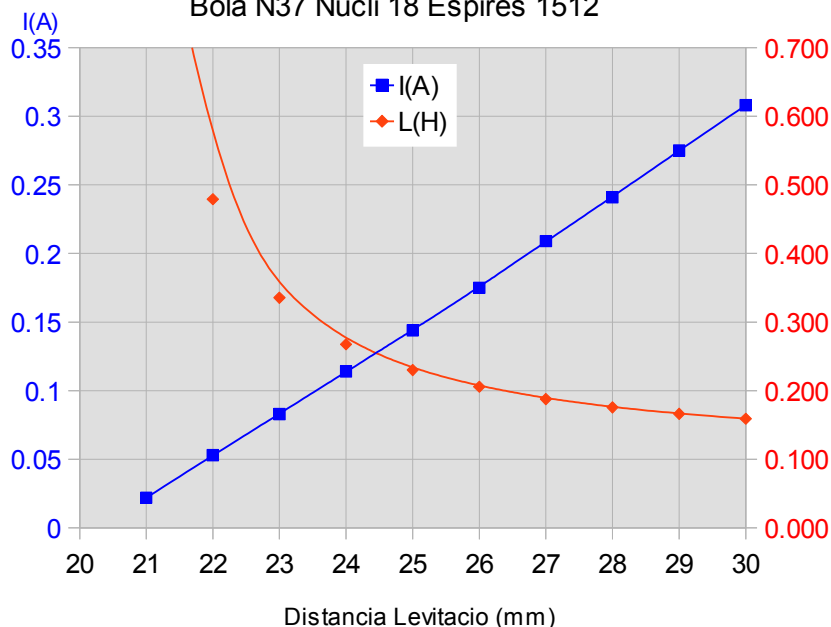


Fig 20- Corrent i Densitat de Flux vs Distancia de levitació

Anem ara a representar el diferencial de la densitat de flux Bz1-Bz4 amb funcio de la distancia D i a la vegada calcularem la sensibilitat del detector diferencial de distancia. Utilitzarem Gauss en lloc de Tesla – 1Tesla=10000 Gauss-

D (mm)	Bz1-Bz4 ΔB (Gauss)	Gauss/mm
30	171	13.8
29	185	14.8
28	202	16.7
27	221	18.7
26	241	20.7
25	265	23.2
24	291	26.4
23	321	30.1
22	356	34.5
21	394	38.5

Es pot observar que el sistema de detecció va perdent sensibilitat a mesura que la distancia augmenta -a 30 mm es un 40% del de 22mm- Aquest factor hi haurà que tindre'l amb conte pel disseny de la placa d'electrònica. Es poden calcular els valors de ΔB i la Sensibilitat G/mm a traves de les funcions següents, ajustades per mínims quadrats

$$\Delta B = (0.06066 + 0.005365 \cdot D)^{-3.411}$$

$$G/mm = D / (21.78 + 1.1796 \cdot D - 10.04 \cdot D^{0.5})$$

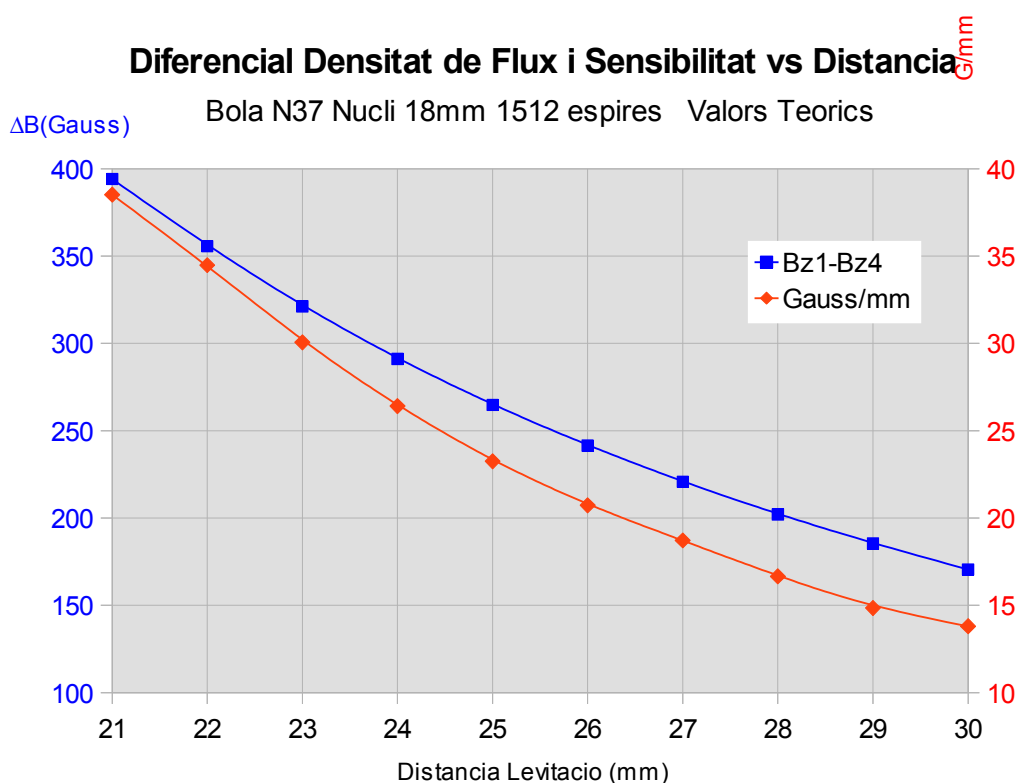


Fig 21 Diferencial Densitat de Flux i Sensibilitat vs Distancia

5.1- Calibratge del detector de distancia

Es pot veure a l'apartat anterior que a cada distancia D li correspon un valor diferencial Bz1-Bz4 expressat amb Gauss. Els sensors de Hall transformen el camp magnètic a magnitud elèctrica a raó de 2-3 mV/Gauss, amb un valor típic de 2.5 mV/G. Per tant si es vol una mica de precisió hi haurà que calibrar el detector diferencial amb valors experimentals amb distancies conegudes. Per una gama de distancies compreses entre 40 i 22 mm es fa l'experiència i es registren les dades següents:

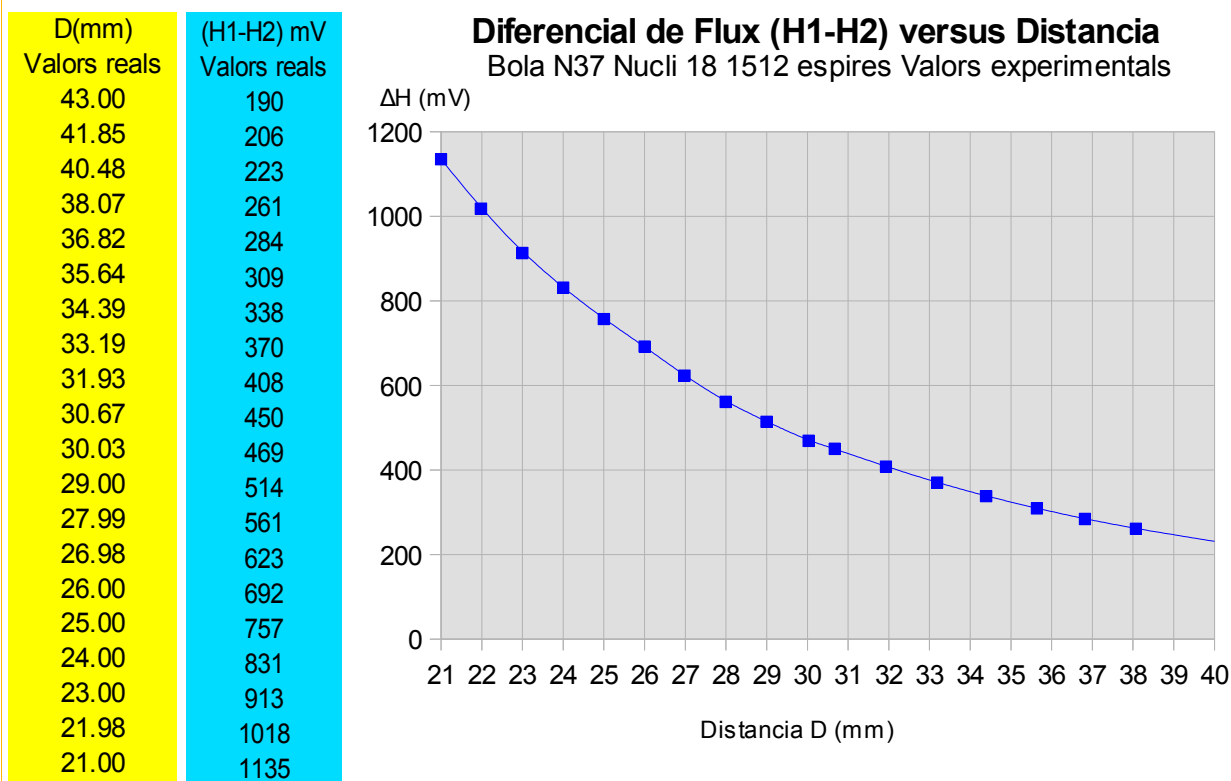


Fig 22- Valors experimentals H1-H2 vs Distancia

A continuació anem a calcular el factor de conversió aplicable als sensors Hall per passar la densitat de flux $\Delta B = Bz1 - Bz4$ amb Gauss al seu equivalent $\Delta H = \Delta(H1 - H2)$ amb mV i també el coeficient de sensibilitat del detector amb mV/m

D (mm)	Valors Reals (H1-H2) mV	Bz1-Bz4 ΔB (Gauss)	Factor Hall mV/Gauss	Sensibilitat Gauss/mm	Sensibilitat mV/mm
30	469	171	2.75	13.8	38.0
29	514	185	2.77	14.8	41.2
28	561	202	2.78	16.7	46.3
27	623	221	2.82	18.7	52.8
26	692	241	2.87	20.7	59.4
25	757	265	2.86	23.2	66.5
24	831	291	2.85	26.4	75.4
23	913	321	2.84	30.1	85.5
22	1018	356	2.86	34.5	98.7

5.2-Resum variables bàsiques per electroimant amb Nucli de $\Phi 18 \times 40$ mm, N=1512 voltes, axb=6x36.8 mm, Bola N37 de 19 mm i 2 Hall A1301

D (mm)	I(A)	Sensibilitat I/D mA/mm	L(H)	Valors Reals (H1-H2) mV	Sensibilitat mV/mm
30	0.308	31.7	0.159	469	31
29	0.275	31.7	0.166	514	45
28	0.241	31.7	0.176	561	47
27	0.209	31.7	0.188	623	62
26	0.175	31.7	0.206	692	69
25	0.144	31.7	0.230	757	65
24	0.114	31.7	0.268	831	74
23	0.083	31.7	0.335	913	82
22	0.053	31.7	0.479	1018	105

6- Electrònica. Esquema de blocs

A continuació presentem, a la figura 23, l'esquema de blocs d'un sistema electrònic que proporciona un control **PD** -Proporcional Derivatiu que intenta mantenir la distància de levitació de la bola- i està constituït per les següents etapes bàsiques:

- un acondicionador/amplificador diferencial A1 dels senyals **H1** i **H4** procedents dels sensors lineals de Hall que entren cada un per les seves entrades. La sortida és la diferència **H1-H4=ΔH** multiplicada pel guany **G1** del amplificador: ho sigui **G1*ΔH**. Una etapa RC filtre finalment aquest senyal.

- un amplificador diferencial A2 amb una entrada per on s'aplica un punt de consigna **SP1** i per l'altra entra el senyal diferència dels sensors Hall **G1*ΔH** La sortida d'aquest amplificador alimenta el resistor R7, a través del R5, i estableix el senyal d'error per una correcció d'acció proporcional. Una ret R15 C4 estableix una altra acció correctora complementària de tipus derivatiu

- un amplificador A4 que genera un punt de consigna **SP** i és el que estableix el corrent principal de levitació del controlador sobre el resistor R7 a través de R6. El corrent total que circula per R7 genera una tensió de referència **VREF** que s'aplica a l'entrada inversora del amplificador A3 i aquest genera polsos de corrent per la bobina fins que **Vs** és igual a **VREF**. D'aquesta manera el corrent **I** de la bobina és controlat i obligat a seguir fidelment les variacions de la tensió de referència **VREF**.

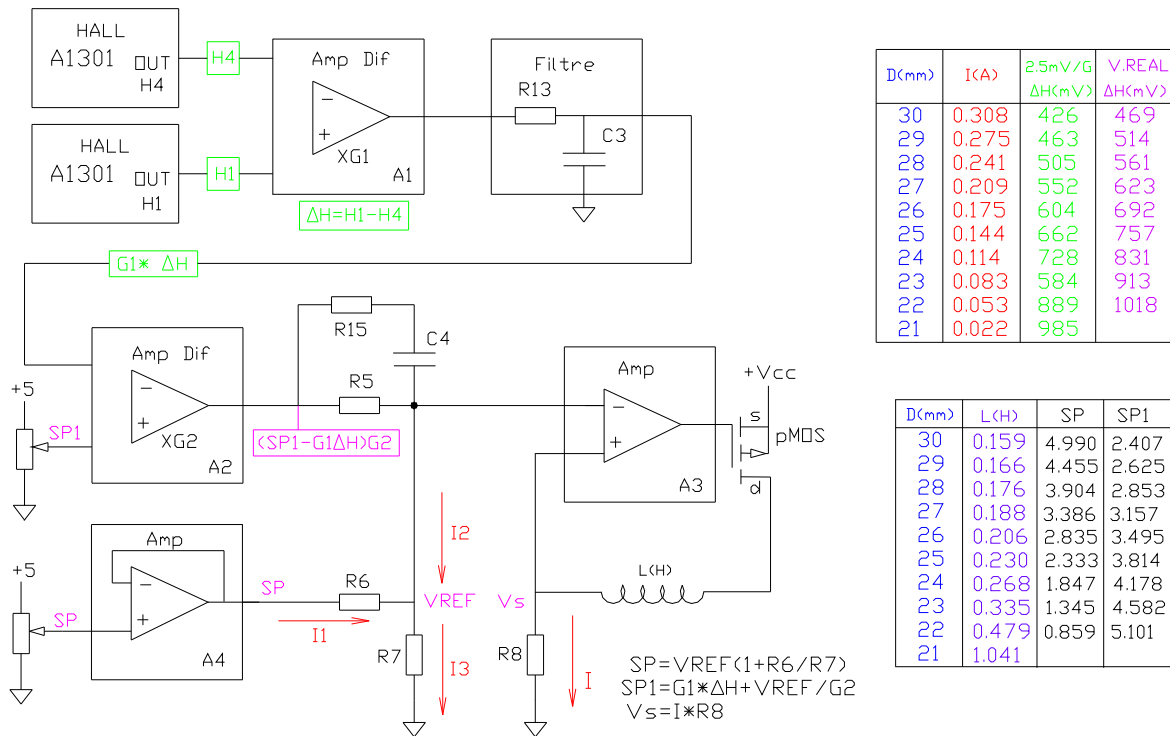


Figura 23- Esquema de blocs del controlador del corrent

Anem ara a fer un estudi quantitatiu per deduir una formula practica per establir els punts de consigna **SP** i **SP1** amb funció de la distancia de levitació **D** per l'electroimant abans estudiat al punt 5.2

Aplicant les lleis d'Ohm i Kirchoff al circuit tenim:

$$I_1 = (SP - V_{REF}) / R_6 \quad I_2 = (G_2(SP - G_1 \Delta H) - V_{REF}) / R_5 \quad I_3 = V_{REF} / R_7 \quad I = V_s / R_8$$

per altra banda: $I_1 + I_2 = I_3$ $V_{REF} = V_s$ substituint queda

$$(SP - V_{REF}) / R_6 + (G_2(SP - G_1 \Delta H) - V_{REF}) / R_5 = V_{REF} / R_7$$

Si fem que la sortida del amplificador A2, quant tenim la bola situada a la distancia que ens interessa ferla levitar, sigui igual a la tensió de referencia **VREF** aleshores el corrent **I2** serà igual a zero i per tant podem calcular els valors del set point **SP** i **SP1** a partir de les relacions següents:

$$(SP - V_{REF}) / R_6 = V_{REF} / R_7$$

$$G_2(SP - G_1 \Delta H) = V_{REF}$$

$$V_{REF} = V_s = I \cdot R_8$$

d'on es poden deduir els següents valors:

$$SP = I \cdot R_8 \cdot (1 + R_6 / R_7) = V_{REF} \cdot (1 + R_6 / R_7)$$

$$SP1 = G_1 \Delta H + I \cdot R_8 / G_2 = G_1 \Delta H + V_{REF} / G_2$$

A continuació comencem a donar valors a alguns components del circuit. Els valors nominals dels corrents I veiem -fig 5.2- que van des de 53 fins a 308 mA . Si fem que els corrents de control I3 siguin 100 vegades mes petits que I, això implique que $R7=100R8$ i per tant si assignem $R8=2\Omega$ queda $R7=200\Omega$. Per altra banda la tensió màxima de SP es de +5V per lo tant $5=2*0.308(1+R6/200)$; d'on $R6=1k42$ (màxim)

Anem ara a assignar valors pels guanys dels amplificadors A1 i A2.

Tornant a la figura 5.2 veiem que els valors reals H1-H2 van des de 469 fins a 1018 mV Per tant si limitem la sortida del amplificador diferencial A1 a 5 V , a fi de que'l següent pas treballi a la meitat de la tensió d'alimentació de 10V, tenim que'l guany màxim G1 queda reduït a 5 aproximadament. Agafem doncs $G1=5$

El guany del amplificador diferencial A2 tindria que ser el màxim permès a fi de que'l senyal d'error sigui el màxim per corregir les desviacions de la bola, sempre i quant el nivell de soroll dels detectors Hall sigui tolerable. Agafarem un valor conservador de $G2=10$ A continuació calcularem els valors SP i SP1, amb els valors assignats anteriorment, amb funció de les distancies de levitació D

D (mm)	I(A)	Valors Reals (H1-H2) mV	SP	SP1
30	0.308	469	4.990	2.407
29	0.275	514	4.455	2.625
28	0.241	561	3.904	2.853
27	0.209	623	3.386	3.157
26	0.175	692	2.835	3.495
25	0.144	757	2.333	3.814
24	0.114	831	1.847	4.178
23	0.083	913	1.345	4.582
22	0.053	1018	0.859	5.101

A continuació anem a veure el comportament del circuit electrònic de la figura 23 davant d'una pertorbació externa. Suposem que'l sistema esta levitant a una distancia $D=30$ i que aquesta pertorbació intenta fer caure la bola 1 mm i passar-la a 31. Amb caiguda lliure per recorre 1mm la bola tarda un temps aproximat $t=\sqrt{(2*0.001/9.81)}=0.014$ seg i la sortida ΔH dels detectors Hall passaria de 469mV fins a 438 mV ; es a dir hi hauria una disminució de 31 mV a l'entrada del amplificador A1. La sortida del amplificador A1 disminuiria doncs amb $31*5=155$ mV , que serien aplicats a l'entrada del A2 i, per lo tant, la sortida d'aquest donaria un increment de $155*10=1550$ mV sobre el resistor R5. Aquest increment de tensió incrementaria el corrent I2 i, per tant, ocasionaria un increment de la tensió VREF i, amb definitiva, un increment final del corrent I de la

bobina. Tot aquest seguit d'accions, si es suficientment ràpid i consistent, lo que farà serà frenar la pertorbació i aconseguir evitar el moviment de caiguda de la bola.

A continuació anem a veure, amb mes detall, el comportament del circuit anterior però amb l'influència que la bobina te sobre el temps de resposta del circuit. Estudiarem el circuit a través del simulador LTSpice que ens calculara les gràfiques a temps real. del circuit per als components concrets d'acord amb el detall de la figura 24

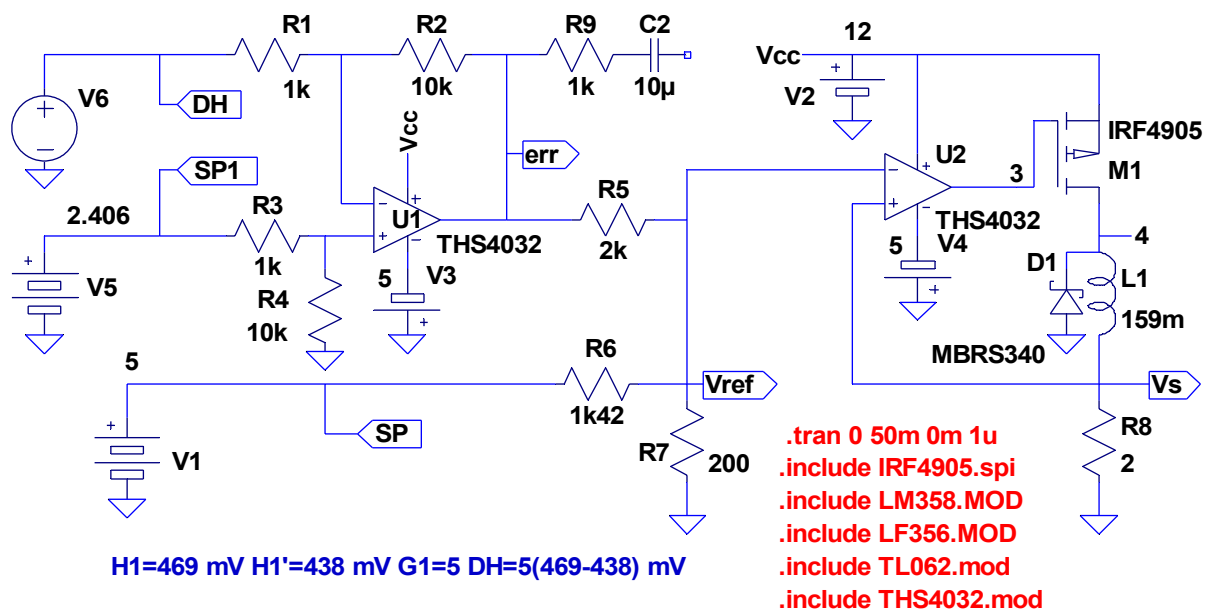


Figura 24-Levitacio D=30 SP1=2.406 SP=5.000 Perturb D=30/31 levitadorSpiceD3031.wmf

Es pot observar com SP=5 i SP1=2.406 son els valors abans calculats per una levitació a una distancia D=30 d'acord amb la taula de la pagina anterior. Per altra part L(H)=159mH esta d'acord amb els valors de la taula 5.2 de la pagina 34. Amb aquest circuit anem a representar els valors teòrics de la tensió Vref i Cs i els del corrent I(L1) junt amb la tensió d'error. El generador V6 intenta simular una caiguda de la bola des de 0.02 fins a 1mm amb el seus equivalents amb mV i amb uns temps total, en el cas de 1 mm, com si caigues d'aquesta distancia . Establirem una tensió d'alimentació Vcc=12 V a fi de que'l corrent I(L1) pugui arribar al valor teòric de correcció que l'hi pertoca, es a dir que Cs pugui seguir a Vref.

A continuació es presenten els gràfics dels senyals del circuit anterior, pero pel operacional TL062 a la figura 25

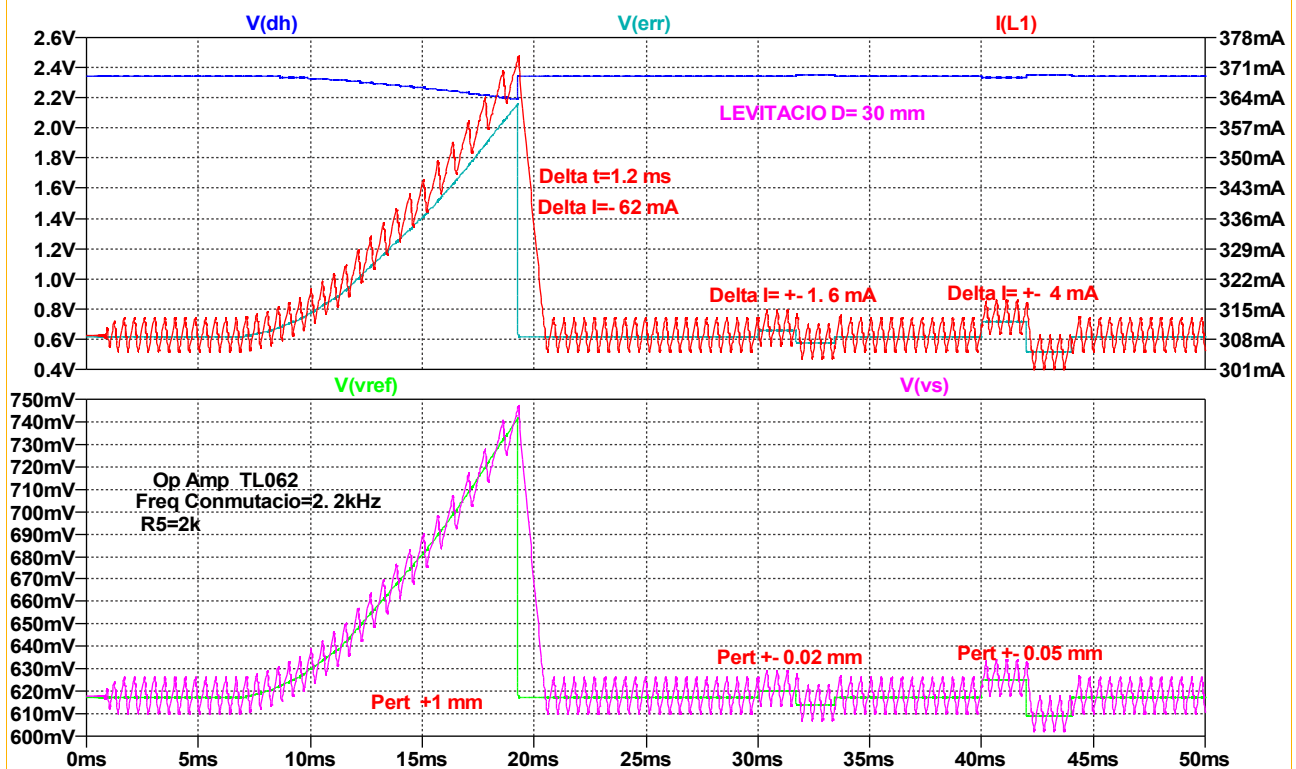


Figura 25- Grafiques dels senyals Vref, Vs i I(L1) com a resposta a pertorbacions

Cal destacar que l'operacional intenta fer que el senyal Vs segueixi les variacions del senyal Vref mitjançant connexions i desconexions del corrent de la bobina, degut a la forta autoinducció d'aquesta, i que ho logra després d'un temps d'uns 280 us de connexió i 173 us de desconexió, equivalent a una freqüència de 2.2 kHz

El generador V6 aplica senyals amb mV equivalents amb una caiguda lliure de la bola de 1mm, és a dir $t = \sqrt{2 \cdot D/g}$, i també amb moviments instantanis de ± 0.02 i ± 0.05 mm. Es pot veure la resposta del amplificador com a resposta amb aquestes pertorbacions a través del senyal Verr. Cal destacar que la resposta amb corrent, per $R5=2k$, és de 62mA per 1 mm, de 1.6mA per ± 0.02 mm i de 4mA per ± 0.05 mm. Cal mencionar que aquests valors són el doble dels valors necessaris de 31.7 mA/mm que es mencionen a la taula del paràgraf 5.2. Cal mencionar que $R5$ s'ha calculat per que fos així. D'aquesta manera es creu que l'acció de control efectiu està garantida per $D=30$ mm. La resposta del sistema electrònic per retornar la correcció de 1 mm al valor inicial $D=30$ és de 1.2 ms, que seria equivalent a un descontrol de 0.01 mm amb caiguda lliure.