

ANEXO B

Análisis de Resultados del Componente de Conformación de Haces con Módulos Alimentadores de Arreglos Superficiales de 9x9 Módulos de Excitación.

Se hace referencia al componente de conformación de haces con un número determinado de módulos alimentadores, cuando se proponen sub diseños con el fin de que puedan ir implementados en un solo FPGA. Lo ideal es encontrar algún FPGA que soporte un sub diseño con la mayor cantidad de módulos alimentadores posibles sin incurrir en detrimento de la calidad del servicio, con el propósito de recurrir a la menor cantidad posible de dispositivos FPGAs para evitar que los costos de la implementación del componente de conformación de haces se eleven. En pocas palabras, se busca que el diseño del componente de conformación de haces sea eficiente desde el punto de vista de los costos para una posible implementación.

La tabla B.1 muestra las características físicas de los FPGAs de la última serie lanzados al mercado por la empresa Xilinx.

Tabla B.1. Características físicas de las familias de FPGAs de la arquitectura Virtex 6.

Parámetros	FPGAs Virtex 6 Familia LXT							Familia SXT	
	Lx75T	Lx130T	Lx195T	Lx240T	Lx365T	Lx550T	Lx760T	Sx315T	Sx475T
Slices	11640	20000	31200	37680	56880	85920	118560	49200	74400
CLBs	5820	10000	15600	18840	28440	42960	59280	24600	37200
Flip Flops	93120	160000	249600	301440	455040	687360	948480	393600	595200
LUTs	46560	80000	124800	150720	227520	343680	474240	196800	297600
Bloques RAM (36 Kb)	156	264	344	416	416	632	720	704	1064
Pines I/O	360	600	600	720	720	1200	1200	720	840
DSP48E1	288	480	640	768	576	864	864	1344	2016

El sub diseño del componente de conformación de haces con 1 módulo alimentador se puede apreciar en la figura B.1.

La figura B.2 muestra la demanda de recursos hardware del sub diseño del módulo alimentador de 81 módulos de excitación mas las etapas de cálculo de fase y control de ancho de haz, es decir, sería el requerimiento del componente de conformación de haces con un módulo alimentador.

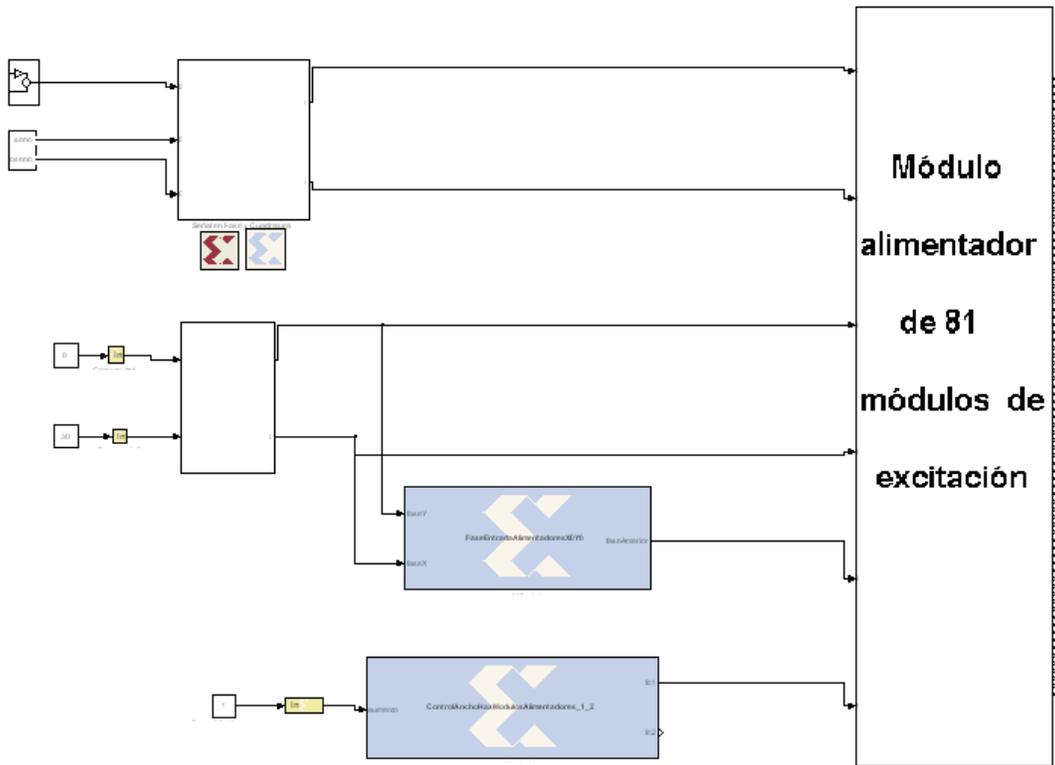


Figura B.1. Sub diseño del componente de conformación de haces con un módulo alimentador.

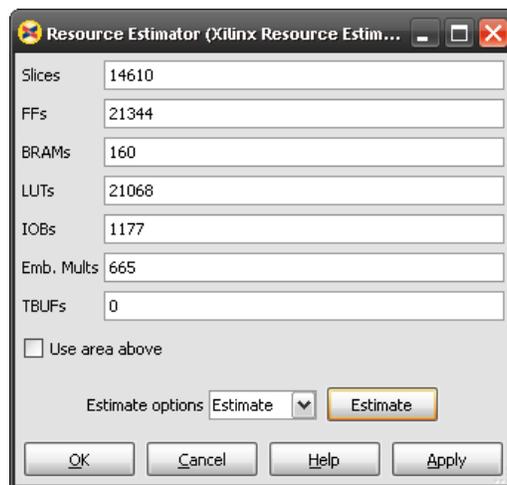


Figura B.2. Conjunto de especificaciones hardware requeridas por el componente de conformación de haces con un módulo alimentador.

De acuerdo con la figura B.2, el número de LUTs de cuatro entradas reportado por el bloque *Resource Estimator* es 21.068, restándole el 21% según criterio de Xilinx, se obtiene un valor aproximado de 16.643 LUTs de 6 entradas, y teniendo en cuenta que cada Slice está conformado por 4 de éstas LUTs entonces el número aproximado de Slices es 4.161, en ese orden de ideas, el número de CLB's aproximado sería 2.081 si se tiene en cuenta que cada CLB contiene dos Slices. De esta manera se puede notar que el número de Slices requeridos al igual que el número de tablas LUTs es apenas el 3.5096% de la capacidad que tiene la referencia Lx760T de la familia LX de la arquitectura Virtex 6 (ver tabla B.1). Algo similar sucede con el número de flip-flops, teniendo en cuenta que el número requerido es 21.344 y la capacidad máxima de la familia Lx760T es 948.480, se obtiene un desaprovechamiento del 97.749% de flip-flops.

En relación con el desaprovechamiento de recursos, cabe mencionar que si se toma como referencia las familias de FPGAs virtex 6 Lx550T y Lx760T (tabla 1), es porque son las únicas familias que cumplen con el requerimiento de bloques de entrada y salida. Teniendo en cuenta este desaprovechamiento se realizó otro sub diseño pero esta vez con dos módulos alimentadores multiplexando sus salidas para que el total de bloques de entrada y salida se conserve igual al mostrado en la figura B.2.

El sub diseño del componente de conformación de haces con dos módulos alimentadores multiplexando las salidas se puede apreciar en la figura B.3.

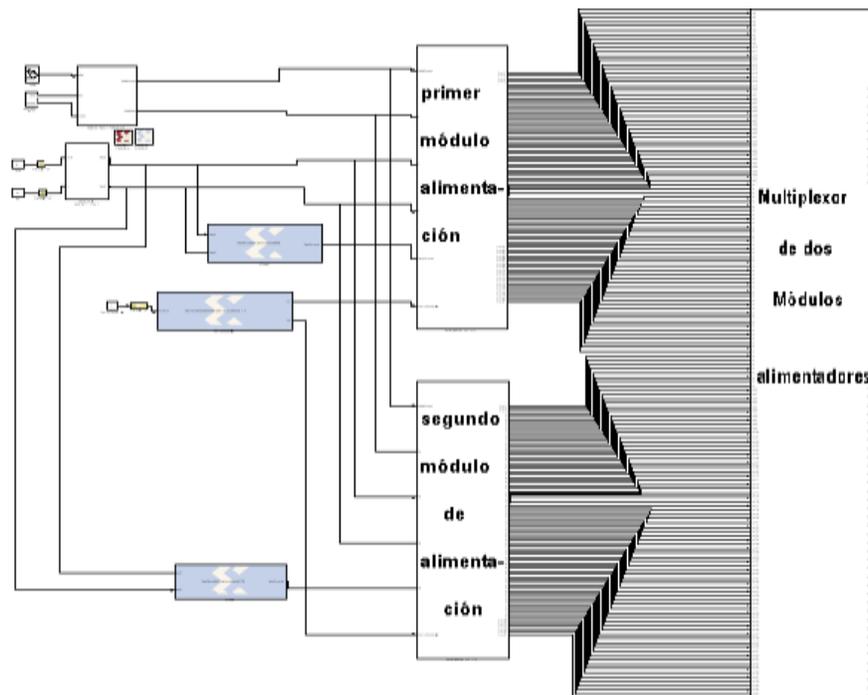


Figura B.3. Componente de conformación de haces con dos módulos alimentadores multiplexando las salidas.

Realizando una estimación de recursos a este sub diseño se obtienen los resultados representados por la figura B.4.

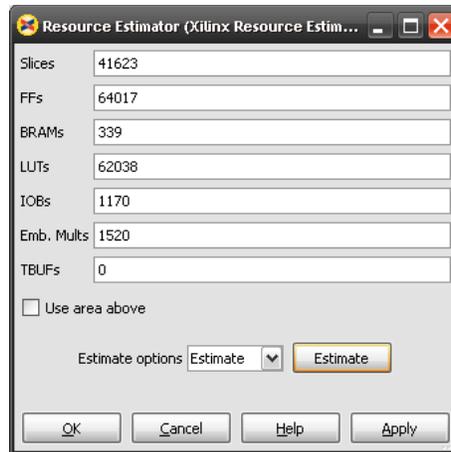


Figura B.4. Conjunto de especificaciones hardware requeridas por el componente de conformación de haces con dos módulos alimentadores multiplexando las salidas.

En la figura B.4 se observa que el análisis de requerimientos hardware del componente de conformación de haces con dos módulos alimentadores multiplexando las salidas, revela un mayor requerimiento en tablas LUTs, slices, flip-flops, y bloques RAM con la misma cantidad de bloques de entrada y salida, en comparación con el análisis de recursos hardware que exige el componente de conformación de haces con un módulo alimentador (figura B.2). Esto significa que esta nueva configuración multiplexando las salidas de dos módulos alimentadores puede ser mas eficiente en cuanto al aprovechamiento de recursos del FPGA, que la configuración del componente de conformación de haces con solamente un módulo alimentador.

Con el sub diseño del componente de conformación de haces con dos módulos alimentadores se obtiene un incremento notable en el número de bloques multiplicadores empotrados, en consecuencia, las familias de FPGAs Lx550T y Lx760T de la arquitectura Virtex 6 (tabla B.1) no soportarían este sub diseño.

Teniendo en cuenta que el sub diseño de los dos módulos alimentadores multiplexando las salidas exige requerimientos hardware que hasta el momento ninguna referencia de FPGAs puede proporcionar, se debe buscar cual es el dispositivo que con mayor eficiencia pueda soportar el sub diseño con un módulo alimentador. Las únicas dos referencias de las diferentes arquitecturas Virtex de FPGAs con capacidad de cumplir a cabalidad con los requerimientos hardware del sub diseño del componente de conformación de haces con un módulo alimentador son; las familias Lx550T y Lx760T

(tabla B.1) de la arquitectura Virtex 6. Este par de dispositivos cumplen holgadamente con los requerimientos del diseño, a excepción de los bloques de entrada y salida y de los procesadores DSP48E1 que se ajustan de una manera precisa a los disponibles por los dispositivos en cuestión.

La referencia Lx550T podría ofrecer un mejor aprovechamiento de recursos que la referencia Lx760T como se puede ver en la figura B.2 y en la tabla B.1. En razón a esto, se concluye que la referencia Lx550T de la arquitectura Virtex 6 es la mas apropiada para implementar el sub diseño del componente de conformación de haces con un módulo alimentador. En ese orden de ideas, para la posible implementación del diseño total se requerirían de 400 FPGAs Lx550T para implementar cada uno de los 400 módulos alimentadores, donde cada uno se compone de un arreglo rectangular de 9x9 módulos de excitación que finalmente van a alimentar cada una de las antenas del arreglo de 180x180.

Teniendo en cuenta que el sub diseño seleccionado para la posible implementación es el componente de conformación de haces con un módulo alimentador, se re realiza un análisis del corrimiento de fase logrado a través de la simulación de dicho sub diseño.

Tablas de resultados del corrimiento en fase.

Tabla B.3. Resultados de fase teórica y simulada para θ 0.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
0,5	0	875	925	-0,0274	-0,027	-0,0274	0,0000	0,000	0,0017	3,652	0,00
0,5	3	875	920	-0,0274	-0,027	-0,0274	-0,0014	-0,001	-0,0012	0,563	0,00
0,5	6	875	917	-0,0273	-0,027	-0,0274	-0,0029	-0,003	-0,0029	-0,072	0,00
0,5	9	875	915	-0,0271	-0,027	-0,0274	-0,0043	-0,004	-0,0041	0,529	0,00
0,5	12	875	911	-0,0268	-0,027	-0,0274	-0,0057	-0,006	-0,0064	-1,173	-0,01
0,5	15	877	910	-0,0265	-0,026	-0,0262	-0,0071	-0,007	-0,0070	0,069	0,01
0,5	18	877	908	-0,0261	0,026	-0,0262	-0,0085	-0,008	-0,0082	0,719	0,00
0,5	21	877	905	-0,0256	-0,026	-0,0262	-0,0098	-0,010	-0,0099	0,305	-0,01
0,5	24	879	903	-0,0250	-0,025	-0,0250	-0,0112	-0,011	-0,0111	0,161	0,00
0,5	27	881	901	-0,0244	-0,024	-0,0239	-0,0124	-0,012	-0,0122	-0,121	0,01
0,5	30	881	898	-0,0237	-0,024	-0,0239	-0,0137	-0,014	-0,0140	-0,343	0,00
0,5	33	882	896	-0,0230	-0,023	-0,0233	-0,0149	-0,015	-0,0151	-0,024	-0,01
0,5	36	884	894	-0,0222	-0,022	-0,0221	-0,0161	-0,016	-0,0163	-0,384	0,00
0,5	39	886	893	-0,0213	-0,021	-0,0210	-0,0173	-0,017	-0,0169	0,147	0,01
0,5	42	887	891	-0,0204	-0,020	-0,0204	-0,0183	-0,018	-0,0180	0,468	0,00
0,5	45	889	889	-0,0194	-0,019	-0,0192	-0,0194	-0,019	-0,0192	0,000	0,00

Tabla B.4. Resultados de fase teórica y simulada para θ 1° grado y φ desde 0° a 45°

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
1	0	825	925	-0,0548	-0,055	-0,0565	0,0000	0,000	0,0017	1,771	-0,03
1	3	827	917	-0,0548	-0,055	-0,0553	-0,0029	-0,003	-0,0029	-0,013	-0,01
1	6	827	911	-0,0545	-0,055	-0,0553	-0,0057	-0,006	-0,0064	-0,605	-0,02
1	9	829	906	-0,0542	-0,054	-0,0541	-0,0086	-0,009	-0,0093	-0,762	0,00
1	12	829	903	-0,0536	-0,054	-0,0541	-0,0114	-0,011	-0,0111	0,453	-0,01
1	15	830	898	-0,0530	-0,053	-0,0536	-0,0142	-0,014	-0,0140	0,379	-0,01
1	18	832	893	-0,0521	-0,052	-0,0524	-0,0169	-0,017	-0,0169	0,140	0,00
1	21	834	887	-0,0512	-0,051	-0,0512	-0,0196	-0,020	-0,0204	-0,689	-0,01
1	24	836	884	-0,0501	-0,050	-0,0501	-0,0223	-0,022	-0,0221	0,161	0,00
1	27	837	879	-0,0489	-0,049	-0,0495	-0,0249	-0,025	-0,0250	0,166	-0,01
1	30	841	875	-0,0475	-0,047	-0,0472	-0,0274	-0,027	-0,0274	-0,124	0,01
1	33	842	870	-0,0460	-0,046	-0,0466	-0,0299	-0,030	-0,0303	-0,024	-0,01
1	36	846	867	-0,0444	-0,044	-0,0443	-0,0322	-0,032	-0,0320	0,107	0,00
1	39	848	862	-0,0426	-0,043	-0,0431	-0,0345	-0,035	-0,0349	-0,036	-0,01
1	42	851	858	-0,0407	-0,041	-0,0413	-0,0367	-0,037	-0,0373	-0,032	-0,02
1	45	855	855	-0,0388	-0,039	-0,0390	-0,0388	-0,039	-0,0390	0,000	-0,01

Tabla B.5. Resultados de fase teórica y simulada para θ 1.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
1,5	0	782	925	-0,0822	-0,082	-0,0815	0,0000	0,000	0,0017	1,228	0,01
1,5	3	781	915	-0,0821	-0,082	-0,0821	-0,0043	-0,004	-0,0041	0,158	0,00
1,5	6	781	906	-0,0818	-0,082	-0,0821	-0,0086	-0,009	-0,0093	-0,474	-0,01
1,5	9	783	899	-0,0812	-0,081	-0,0809	-0,0129	-0,013	-0,0134	-0,395	0,00
1,5	12	784	893	-0,0804	-0,080	-0,0803	-0,0171	-0,017	-0,0169	0,132	0,00
1,5	15	786	886	-0,0794	-0,079	-0,0792	-0,0213	-0,021	-0,0210	0,174	0,01
1,5	18	788	879	-0,0782	-0,078	-0,0780	-0,0254	-0,025	-0,0250	0,209	0,01
1,5	21	789	872	-0,0768	-0,077	-0,0774	-0,0295	-0,029	-0,0291	0,397	-0,01
1,5	24	793	865	-0,0751	-0,075	-0,0751	-0,0334	-0,033	-0,0332	0,161	0,00
1,5	27	797	858	-0,0733	-0,073	-0,0728	-0,0373	-0,037	-0,0373	-0,112	0,01
1,5	30	799	851	-0,0712	-0,071	-0,0716	-0,0411	-0,041	-0,0413	0,005	-0,01
1,5	33	803	844	-0,0690	-0,069	-0,0693	-0,0448	-0,045	-0,0454	-0,243	-0,01
1,5	36	807	839	-0,0665	-0,067	-0,0670	-0,0483	-0,048	-0,0483	0,181	-0,01
1,5	39	812	832	-0,0639	-0,064	-0,0640	-0,0518	-0,052	-0,0524	-0,289	-0,01
1,5	42	817	827	-0,0611	-0,061	-0,0611	-0,0550	-0,055	-0,0553	-0,138	0,00
1,5	45	822	822	-0,0582	-0,058	-0,0582	-0,0582	-0,058	-0,0582	0,000	0,00

Tabla B.6. Resultados de fase teórica y simulada para θ 2° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
2	0	734	925	-0,1096	0,110	-0,1095	0,0000	0,000	0,0017	0,914	0,00
2	3	735	911	-0,1095	-0,109	-0,1089	-0,0057	-0,006	-0,0064	-0,366	0,01
2	6	735	903	-0,1090	-0,109	-0,1089	-0,0115	-0,011	-0,0111	0,198	0,00
2	9	736	893	-0,1083	-0,108	-0,1083	-0,0172	-0,017	-0,0169	0,138	0,00
2	12	738	882	-0,1072	-0,107	-0,1071	-0,0228	-0,023	-0,0233	-0,265	0,00
2	15	740	874	-0,1059	-0,106	-0,1060	-0,0284	-0,028	-0,0279	0,225	0,00
2	18	743	863	-0,1043	-0,104	-0,1042	-0,0339	-0,034	-0,0344	-0,243	0,00
2	21	747	855	-0,1024	-0,102	-0,1019	-0,0393	-0,039	-0,0390	0,050	0,01
2	24	750	844	-0,1002	-0,100	-0,1001	-0,0446	-0,045	-0,0454	-0,394	-0,01
2	27	753	836	-0,0977	-0,098	-0,0984	-0,0498	-0,050	-0,0501	0,030	-0,01
2	30	759	827	-0,0950	-0,095	-0,0949	-0,0548	-0,055	-0,0553	-0,235	0,00
2	33	763	819	-0,0920	-0,092	-0,0926	-0,0597	-0,060	-0,0600	0,065	-0,01
2	36	769	812	-0,0887	-0,089	-0,0891	-0,0644	-0,064	-0,0640	0,286	0,00
2	39	776	803	-0,0852	-0,085	-0,0850	-0,0690	-0,069	-0,0693	-0,182	0,00
2	42	783	797	-0,0815	-0,081	-0,0809	-0,0734	-0,073	-0,0728	0,036	0,01
2	45	788	788	-0,0775	-0,078	-0,0780	-0,0775	-0,078	-0,0780	0,000	-0,01

Tabla B.7. Resultados de fase teórica y simulada para θ 2.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
2,5	0	686	925	-0,1370	-0,137	-0,1374	0,0000	0,000	0,0017	0,728	-0,01
2,5	3	686	910	-0,1368	-0,137	-0,1374	-0,0072	-0,007	-0,0070	0,089	-0,01
2,5	6	688	898	-0,1363	-0,136	-0,1362	-0,0143	-0,014	-0,0140	0,144	0,00
2,5	9	690	886	-0,1353	-0,135	-0,1351	-0,0214	-0,021	-0,0210	0,180	0,01
2,5	12	692	874	-0,1340	-0,134	-0,1339	-0,0285	-0,028	-0,0279	0,212	0,00
2,5	15	695	862	-0,1324	-0,132	-0,1322	-0,0355	-0,035	-0,0349	0,194	0,01
2,5	18	699	849	-0,1303	-0,130	-0,1298	-0,0423	-0,042	-0,0425	-0,126	0,01
2,5	21	702	837	-0,1279	-0,128	-0,1281	-0,0491	-0,049	-0,0495	-0,125	-0,01
2,5	24	707	826	-0,1252	-0,125	-0,1252	-0,0557	-0,056	-0,0559	-0,061	0,00
2,5	27	712	815	-0,1221	-0,122	-0,1223	-0,0622	-0,062	-0,0623	0,000	0,00
2,5	30	717	803	-0,1187	-0,119	-0,1194	-0,0685	-0,069	-0,0693	-0,135	-0,02
2,5	33	724	793	-0,1149	-0,115	-0,1153	-0,0746	-0,075	-0,0751	-0,085	-0,01
2,5	36	731	783	-0,1109	-0,111	-0,1112	-0,0805	-0,081	-0,0809	-0,045	-0,01
2,5	39	740	774	-0,1065	-0,106	-0,1060	-0,0862	-0,086	-0,0862	-0,118	0,01
2,5	42	747	763	-0,1018	-0,102	-0,1019	-0,0917	-0,092	-0,0926	-0,257	-0,01
2,5	45	755	755	-0,0969	-0,097	-0,0972	-0,0969	-0,097	-0,0972	0,000	-0,01

Tabla B.8. Resultados de fase teórica y simulada para θ 3° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
3	0	641	925	-0,1644	-0,164	-0,1636	0,0000	0,000	0,0017	0,612	0,01
3	3	640	906	-0,1642	-0,164	-0,1642	-0,0086	-0,009	-0,0093	-0,247	0,00
3	6	640	893	-0,1635	-0,164	-0,1642	-0,0172	-0,017	-0,0169	0,129	-0,01
3	9	644	877	-0,1624	-0,162	-0,1619	-0,0257	-0,026	-0,0262	-0,195	0,01
3	12	645	863	-0,1608	-0,161	-0,1613	-0,0342	-0,034	-0,0344	-0,024	-0,01
3	15	649	848	-0,1588	-0,159	-0,1590	-0,0426	-0,043	-0,0431	-0,166	0,00
3	18	654	834	-0,1564	-0,156	-0,1560	-0,0508	-0,051	-0,0512	-0,178	0,00
3	21	659	820	-0,1535	-0,153	-0,1531	-0,0589	-0,059	-0,0594	-0,198	0,00
3	24	664	807	-0,1502	-0,150	-0,1502	-0,0669	-0,067	-0,0670	-0,024	0,00
3	27	671	793	-0,1465	-0,146	-0,1461	-0,0746	-0,075	-0,0751	-0,201	0,00
3	30	678	781	-0,1424	-0,142	-0,1421	-0,0822	-0,082	-0,0821	-0,022	0,01
3	33	685	767	-0,1379	-0,138	-0,1380	-0,0895	-0,090	-0,0902	-0,185	-0,01
3	36	693	755	-0,1330	-0,133	-0,1333	-0,0966	-0,097	-0,0972	-0,102	-0,01
3	39	702	745	-0,1278	-0,128	-0,1281	-0,1035	-0,103	-0,1031	0,182	0,00
3	42	712	733	-0,1222	-0,122	-0,1223	-0,1100	-0,110	-0,1100	0,013	0,00
3	45	723	723	-0,1163	-0,116	-0,1159	-0,1163	-0,116	-0,1159	0,000	0,01

Tabla B.9. Resultados de fase teórica y simulada para θ 3,5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
3,5	0	593	925	-0,1918	-0,192	-0,1916	0,0000	0,000	0,0017	0,522	0,00
3,5	3	592	905	-0,1915	-0,192	-0,1921	-0,0100	-0,010	-0,0099	0,051	-0,01
3,5	6	594	887	-0,1907	-0,191	-0,1910	-0,0200	-0,020	-0,0204	-0,091	0,00
3,5	9	597	870	-0,1894	-0,189	-0,1892	-0,0300	-0,030	-0,0303	-0,090	0,00
3,5	12	599	853	-0,1876	-0,188	-0,1881	-0,0399	-0,040	-0,0402	-0,058	-0,01
3,5	15	604	836	-0,1853	-0,185	-0,1852	-0,0496	-0,050	-0,0501	-0,133	0,00
3,5	18	609	820	-0,1824	-0,182	-0,1822	-0,0593	-0,059	-0,0594	-0,050	0,00
3,5	21	614	803	-0,1791	-0,179	-0,1793	-0,0687	-0,069	-0,0693	-0,125	-0,01
3,5	24	621	788	-0,1752	-0,175	-0,1753	-0,0780	-0,078	-0,0780	0,002	0,00
3,5	27	628	772	-0,1709	-0,171	-0,1712	-0,0871	-0,087	-0,0873	-0,031	-0,01
3,5	30	637	757	-0,1661	-0,166	-0,1659	-0,0959	-0,096	-0,0961	-0,069	0,00
3,5	33	645	743	-0,1608	-0,161	-0,1613	-0,1045	-0,104	-0,1042	0,129	0,00
3,5	36	655	727	-0,1552	-0,155	-0,1555	-0,1127	-0,113	-0,1135	-0,142	-0,01
3,5	39	666	714	-0,1490	-0,149	-0,1491	-0,1207	-0,121	-0,1211	-0,094	0,00
3,5	42	676	702	-0,1425	-0,143	-0,1432	-0,1283	-0,128	-0,1281	0,193	-0,01
3,5	45	688	688	-0,1356	-0,136	-0,1362	-0,1356	-0,136	-0,1362	0,000	-0,02

Tabla B.10. Resultados de fase teórica y simulada para θ 4° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
4	0	546	922	-0,2191	-0,219	-0,2189	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
4	3	546	903	-0,2188	-0,219	-0,2189	-0,0115	-0,011	-0,0111	0,107	0,00
4	6	547	882	-0,2179	-0,218	-0,2183	-0,0229	-0,023	-0,0233	-0,089	-0,01
4	9	551	863	-0,2164	-0,216	-0,2160	-0,0343	-0,034	-0,0344	-0,036	0,01
4	12	554	842	-0,2144	-0,214	-0,2143	-0,0456	-0,046	-0,0466	-0,265	0,00
4	15	557	824	-0,2117	-0,212	-0,2125	-0,0567	-0,057	-0,0571	-0,029	-0,02
4	18	565	805	-0,2084	-0,208	-0,2079	-0,0677	-0,068	-0,0681	-0,146	0,01
4	21	570	786	-0,2046	-0,205	-0,2049	-0,0785	-0,079	-0,0792	-0,125	-0,01
4	24	578	769	-0,2002	-0,200	-0,2003	-0,0891	-0,089	-0,0891	0,022	0,00
4	27	587	752	-0,1953	-0,195	-0,1951	-0,0995	-0,099	-0,0990	0,094	0,01
4	30	595	733	-0,1898	-0,190	-0,1904	-0,1096	-0,110	-0,1100	-0,027	-0,01
4	33	605	717	-0,1838	-0,184	-0,1846	-0,1194	-0,119	-0,1194	0,110	-0,01
4	36	617	700	-0,1773	-0,177	-0,1776	-0,1288	-0,129	-0,1293	-0,050	-0,01
4	39	630	685	-0,1703	-0,170	-0,1700	-0,1379	-0,138	-0,1380	-0,064	0,00
4	42	642	669	-0,1629	-0,163	-0,1630	-0,1466	-0,147	-0,1473	-0,100	-0,01
4	45	655	655	-0,1550	-0,155	-0,1555	-0,1550	-0,155	-0,1555	0,000	-0,01

Tabla B.11. Resultados de fase teórica y simulada para θ 4.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
4,5	0	499	922	-0,2465	-0,246	-0,2463	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
4,5	3	499	899	-0,2461	-0,246	-0,2463	-0,0129	-0,013	-0,0134	-0,112	0,00
4,5	6	501	877	-0,2451	-0,245	-0,2451	-0,0258	-0,026	-0,0262	-0,101	0,00
4,5	9	505	855	-0,2435	-0,243	-0,2428	-0,0386	-0,039	-0,0390	-0,128	0,01
4,5	12	508	834	-0,2411	-0,241	-0,2410	-0,0512	-0,051	-0,0512	0,000	0,00
4,5	15	513	812	-0,2381	-0,238	-0,2381	-0,0638	-0,064	-0,0640	-0,053	0,00
4,5	18	520	791	-0,2344	-0,234	-0,2341	-0,0762	-0,076	-0,0763	-0,049	0,01
4,5	21	526	771	-0,2301	-0,230	-0,2306	-0,0883	-0,088	-0,0879	0,127	-0,01
4,5	24	535	750	-0,2252	-0,225	-0,2253	-0,1003	-0,100	-0,1001	0,038	0,00
4,5	27	544	729	-0,2196	-0,220	-0,2201	-0,1119	-0,112	-0,1124	-0,048	-0,01
4,5	30	556	710	-0,2135	-0,213	-0,2131	-0,1232	-0,123	-0,1234	-0,081	0,00
4,5	33	566	692	-0,2067	-0,207	-0,2073	-0,1342	-0,134	-0,1339	0,135	-0,01
4,5	36	580	672	-0,1994	-0,199	-0,1991	-0,1449	-0,145	-0,1456	-0,167	0,00
4,5	39	592	655	-0,1916	-0,192	-0,1921	-0,1551	-0,155	-0,1555	0,024	-0,01
4,5	42	607	638	-0,1832	-0,183	-0,1834	-0,1649	-0,165	-0,1654	-0,037	-0,01
4,5	45	623	623	-0,1743	-0,174	-0,1741	-0,1743	-0,174	-0,1741	0,000	0,01

Tabla B.12. Resultados de fase teórica y simulada para θ 5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
5	0	451	922	-0,2738	-0,274	-0,2742	0,0000	0,000	0,0000	0,000	-0,01
5	3	453	898	-0,2734	-0,273	-0,2731	-0,0143	-0,014	-0,0140	0,071	0,01
5	6	454	872	-0,2723	-0,272	-0,2725	-0,0286	-0,029	-0,0291	-0,098	0,00
5	9	458	848	-0,2704	-0,270	-0,2702	-0,0428	-0,043	-0,0431	-0,061	0,00
5	12	462	824	-0,2678	-0,268	-0,2678	-0,0569	-0,057	-0,0571	-0,027	0,00
5	15	468	799	-0,2645	-0,264	-0,2643	-0,0709	-0,071	-0,0716	-0,159	0,00
5	18	475	776	-0,2604	-0,260	-0,2603	-0,0846	-0,085	-0,0850	-0,088	0,00
5	21	482	753	-0,2556	-0,256	-0,2562	-0,0981	-0,098	-0,0984	-0,011	-0,01
5	24	492	731	-0,2501	-0,250	-0,2504	-0,1114	-0,111	-0,1112	0,050	0,00
5	27	502	709	-0,2440	-0,244	-0,2445	-0,1243	-0,124	-0,1240	0,108	-0,01
5	30	515	686	-0,2371	-0,237	-0,2370	-0,1369	-0,137	-0,1374	-0,107	0,00
5	33	526	666	-0,2296	-0,230	-0,2306	-0,1491	-0,149	-0,1491	0,119	-0,01
5	36	540	645	-0,2215	-0,222	-0,2224	-0,1609	-0,161	-0,1613	0,053	-0,02
5	39	556	626	-0,2128	-0,213	-0,2131	-0,1723	-0,172	-0,1723	0,036	0,00
5	42	573	607	-0,2035	-0,203	-0,2032	-0,1832	-0,183	-0,1834	-0,069	0,00
5	45	588	588	-0,1936	-0,194	-0,1945	-0,1936	-0,194	-0,1945	0,000	-0,02

Tabla B.13. Resultados de fase teórica y simulada para θ 5.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
5,5	0	405	922	-0,3011	-0,301	-0,3010	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
5,5	3	405	894	-0,3007	-0,301	-0,3010	-0,0158	-0,016	-0,0163	-0,100	-0,01
5,5	6	408	868	-0,2995	-0,299	-0,2993	-0,0315	-0,031	-0,0314	0,003	0,00
5,5	9	412	841	-0,2974	-0,297	-0,2969	-0,0471	-0,047	-0,0472	-0,025	0,01
5,5	12	415	813	-0,2945	-0,295	-0,2952	-0,0626	-0,063	-0,0635	-0,133	-0,02
5,5	15	422	788	-0,2908	-0,291	-0,2911	-0,0779	-0,078	-0,0780	-0,003	-0,01
5,5	18	430	762	-0,2864	-0,286	-0,2865	-0,0930	-0,093	-0,0932	-0,015	0,00
5,5	21	439	736	-0,2811	-0,281	-0,2812	-0,1079	-0,108	-0,1083	-0,061	0,00
5,5	24	449	712	-0,2751	-0,275	-0,2754	-0,1225	-0,122	-0,1223	0,060	0,00
5,5	27	462	686	-0,2683	-0,268	-0,2678	-0,1367	-0,137	-0,1374	-0,160	0,00
5,5	30	473	662	-0,2608	-0,261	-0,2614	-0,1506	-0,151	-0,1514	-0,074	-0,02
5,5	33	488	640	-0,2525	-0,253	-0,2527	-0,1640	-0,164	-0,1642	-0,015	0,00
5,5	36	502	617	-0,2436	-0,244	-0,2445	-0,1770	-0,177	-0,1776	0,013	-0,02
5,5	39	520	597	-0,2340	-0,234	-0,2341	-0,1895	-0,189	-0,1892	0,046	0,00
5,5	42	537	577	-0,2238	-0,224	-0,2242	-0,2015	-0,201	-0,2009	0,136	0,00
5,5	45	556	556	-0,2129	-0,213	-0,2131	-0,2129	-0,213	-0,2131	0,000	0,00

Tabla B.14. Resultados de fase teórica y simulada para θ 6° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
6	0	358	922	-0,3284	-0,328	-0,3284	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
6	3	358	893	-0,3279	-0,328	-0,3284	-0,0172	-0,017	-0,0169	0,057	-0,01
6	6	360	863	-0,3266	-0,327	-0,3272	-0,0343	-0,034	-0,0344	0,007	-0,01
6	9	365	834	-0,3243	-0,324	-0,3243	-0,0514	-0,051	-0,0512	0,022	0,00
6	12	370	805	-0,3212	-0,321	-0,3214	-0,0683	-0,068	-0,0681	0,033	0,00
6	15	377	776	-0,3172	-0,317	-0,3173	-0,0850	-0,085	-0,0850	0,003	0,00
6	18	386	748	-0,3123	-0,312	-0,3121	-0,1015	-0,101	-0,1013	0,015	0,00
6	21	395	719	-0,3066	-0,307	-0,3068	-0,1177	-0,118	-0,1182	-0,067	-0,01
6	24	407	692	-0,3000	-0,300	-0,2999	-0,1336	-0,134	-0,1339	-0,066	0,00
6	27	419	666	-0,2926	-0,293	-0,2929	-0,1491	-0,149	-0,1491	0,026	0,00
6	30	434	640	-0,2844	-0,284	-0,2841	-0,1642	-0,164	-0,1642	-0,022	0,00
6	33	449	614	-0,2754	-0,275	-0,2754	-0,1789	-0,179	-0,1793	-0,071	0,00
6	36	465	590	-0,2657	-0,266	-0,2661	-0,1930	-0,193	-0,1933	0,002	-0,01
6	39	483	566	-0,2552	-0,255	-0,2556	-0,2067	-0,207	-0,2073	-0,040	-0,01
6	42	502	544	-0,2440	-0,244	-0,2445	-0,2197	-0,220	-0,2201	0,013	-0,01
6	45	523	523	-0,2322	-0,232	-0,2323	-0,2322	-0,232	-0,2323	0,000	0,00

Tabla B.15. Resultados de fase teórica y simulada para θ 6.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
6,5	0	310	922	-0,3556	-0,356	-0,3563	0,0000	0,000	0,0000	0,000	-0,01
6,5	3	312	889	-0,3552	-0,355	-0,3552	-0,0186	-0,019	-0,0192	-0,097	0,00
6,5	6	314	858	-0,3537	-0,354	-0,3540	-0,0372	-0,037	-0,0373	-0,009	-0,01
6,5	9	319	826	-0,3513	-0,351	-0,3511	-0,0556	-0,056	-0,0559	-0,046	0,00
6,5	12	324	795	-0,3479	-0,348	-0,3482	-0,0739	-0,074	-0,0739	0,010	-0,01
6,5	15	331	763	-0,3435	-0,344	-0,3441	-0,0920	-0,092	-0,0926	-0,058	-0,01
6,5	18	341	733	-0,3382	-0,338	-0,3383	-0,1099	-0,110	-0,1100	-0,020	0,00
6,5	21	352	704	-0,3320	-0,332	-0,3319	-0,1274	-0,127	-0,1269	0,070	0,01
6,5	24	363	672	-0,3249	-0,325	-0,3255	-0,1447	-0,145	-0,1456	-0,095	-0,02
6,5	27	377	645	-0,3169	-0,317	-0,3173	-0,1615	-0,161	-0,1613	0,058	-0,01
6,5	30	393	616	-0,3080	-0,308	-0,3080	-0,1778	-0,178	-0,1782	-0,047	0,00
6,5	33	410	588	-0,2983	-0,298	-0,2981	-0,1937	-0,194	-0,1945	-0,118	-0,01
6,5	36	427	563	-0,2877	-0,288	-0,2882	-0,2090	-0,209	-0,2090	0,048	-0,01
6,5	39	447	537	-0,2764	-0,276	-0,2766	-0,2238	-0,224	-0,2242	-0,026	-0,01
6,5	42	468	513	-0,2643	-0,264	-0,2643	-0,2380	-0,238	-0,2381	-0,015	0,00
6,5	45	491	491	-0,2515	-0,251	-0,2509	-0,2515	-0,251	-0,2509	0,000	0,01

Tabla B.16. Resultados de fase teórica y simulada para θ 7° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
7	0	264	922	-0,3829	-0,383	-0,3831	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
7	3	266	887	-0,3823	-0,382	-0,3820	-0,0200	-0,020	-0,0204	-0,054	0,01
7	6	267	853	-0,3808	-0,381	-0,3814	-0,0400	-0,040	-0,0402	-0,014	-0,01
7	9	273	819	-0,3782	-0,378	-0,3779	-0,0599	-0,060	-0,0600	-0,018	0,00
7	12	279	784	-0,3745	-0,374	-0,3744	-0,0796	-0,080	-0,0803	-0,113	0,00
7	15	286	752	-0,3698	-0,370	-0,3703	-0,0991	-0,099	-0,0990	0,035	-0,01
7	18	297	719	-0,3641	-0,364	-0,3639	-0,1183	-0,118	-0,1182	0,006	0,00
7	21	308	686	-0,3574	-0,357	-0,3575	-0,1372	-0,137	-0,1374	-0,025	0,00
7	24	321	654	-0,3498	-0,350	-0,3499	-0,1557	-0,156	-0,1560	-0,033	-0,01
7	27	336	623	-0,3411	-0,341	-0,3412	-0,1738	-0,174	-0,1741	-0,032	0,00
7	30	352	594	-0,3316	-0,332	-0,3319	-0,1914	-0,191	-0,1910	0,082	0,00
7	33	370	563	-0,3211	-0,321	-0,3214	-0,2085	-0,209	-0,2090	-0,038	-0,01
7	36	389	535	-0,3097	-0,310	-0,3103	-0,2250	-0,225	-0,2253	0,017	-0,01
7	39	410	508	-0,2975	-0,298	-0,2981	-0,2409	-0,241	-0,2410	0,041	-0,01
7	42	432	482	-0,2845	-0,285	-0,2853	-0,2562	-0,256	-0,2562	0,077	-0,01
7	45	456	456	-0,2707	-0,271	-0,2713	-0,2707	-0,271	-0,2713	0,000	-0,02

Tabla B.17. Resultados de fase teórica y simulada para θ 7.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
7,5	0	217	922	-0,4101	-0,410	-0,4105	0,0000	0,000	0,0000	0,000	-0,01
7,5	3	219	886	-0,4095	-0,409	-0,4093	-0,0215	-0,021	-0,0210	0,068	0,00
7,5	6	221	848	-0,4078	-0,408	-0,4082	-0,0429	-0,043	-0,0431	-0,026	-0,01
7,5	9	226	812	-0,4050	-0,405	-0,4052	-0,0641	-0,064	-0,0640	0,019	0,00
7,5	12	233	776	-0,4011	-0,401	-0,4012	-0,0853	-0,085	-0,0850	0,036	0,00
7,5	15	242	740	-0,3961	-0,396	-0,3959	-0,1061	-0,106	-0,1060	0,016	0,00
7,5	18	252	704	-0,3900	-0,390	-0,3901	-0,1267	-0,127	-0,1269	-0,023	0,00
7,5	21	264	669	-0,3828	-0,383	-0,3831	-0,1470	-0,147	-0,1473	-0,032	-0,01
7,5	24	278	635	-0,3746	-0,375	-0,3750	-0,1668	-0,167	-0,1671	-0,020	-0,01
7,5	27	295	602	-0,3654	-0,365	-0,3651	-0,1862	-0,186	-0,1863	-0,038	0,00
7,5	30	312	570	-0,3551	-0,355	-0,3552	-0,2050	-0,205	-0,2049	0,013	0,00
7,5	33	331	539	-0,3439	-0,344	-0,3441	-0,2233	-0,223	-0,2230	0,055	0,00
7,5	36	352	508	-0,3317	-0,332	-0,3319	-0,2410	-0,241	-0,2410	0,009	0,00
7,5	39	374	479	-0,3187	-0,319	-0,3191	-0,2581	-0,258	-0,2579	0,048	0,00
7,5	42	398	451	-0,3047	-0,305	-0,3051	-0,2744	-0,274	-0,2742	0,049	0,00
7,5	45	424	424	-0,2900	-0,290	-0,2900	-0,2900	-0,290	-0,2900	0,000	0,00

Tabla B.18. Resultados de fase teórica y simulada para θ 8° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
8	0	171	922	-0,4372	-0,437	-0,4373	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,00
8	3	171	882	-0,4366	-0,437	-0,4373	-0,0229	-0,023	-0,0233	-0,049	-0,01
8	6	175	842	-0,4348	-0,435	-0,4349	-0,0457	-0,046	-0,0466	-0,113	0,00
8	9	180	805	-0,4318	-0,432	-0,4320	-0,0684	-0,068	-0,0681	0,039	0,00
8	12	187	765	-0,4277	-0,428	-0,4279	-0,0909	-0,091	-0,0914	-0,057	-0,01
8	15	197	727	-0,4223	-0,422	-0,4221	-0,1132	-0,113	-0,1135	-0,054	0,00
8	18	207	690	-0,4158	-0,416	-0,4163	-0,1351	-0,135	-0,1351	0,023	-0,01
8	21	221	652	-0,4082	-0,408	-0,4082	-0,1567	-0,157	-0,1572	-0,065	0,00
8	24	236	616	-0,3994	-0,399	-0,3994	-0,1778	-0,178	-0,1782	-0,040	0,00
8	27	252	582	-0,3896	-0,390	-0,3901	-0,1985	-0,198	-0,1980	0,094	0,00
8	30	271	546	-0,3786	-0,379	-0,3790	-0,2186	-0,219	-0,2189	-0,010	-0,01
8	33	292	513	-0,3667	-0,367	-0,3668	-0,2381	-0,238	-0,2381	0,008	0,00
8	36	314	480	-0,3537	-0,354	-0,3540	-0,2570	-0,257	-0,2574	-0,016	-0,01
8	39	338	449	-0,3398	-0,340	-0,3400	-0,2752	-0,275	-0,2754	-0,005	-0,01
8	42	363	419	-0,3249	-0,325	-0,3255	-0,2926	-0,293	-0,2929	0,018	-0,01
8	45	391	391	-0,3092	-0,309	-0,3092	-0,3092	-0,309	-0,3092	0,000	0,00

Tabla B.19. Resultados de fase teórica y simulada para θ 8.5° y φ desde 0° a 45°.

θ	φ	tx	ty	Fase Teórica X	Fase X Parcial	Fase Simulada X	Fase Teórica Y	Fase Y Parcial	Fase Simulada Y	Delta Fi (g)	Delta teta (g)
8,5	0	125	922	-0,4644	-0,464	-0,4640	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,01
8,5	3	125	881	-0,4637	-0,464	-0,4640	-0,0243	-0,024	-0,0239	0,055	-0,01
8,5	6	128	837	-0,4618	-0,462	-0,4623	-0,0485	-0,049	-0,0495	-0,110	-0,01
8,5	9	134	797	-0,4586	-0,459	-0,4588	-0,0726	-0,073	-0,0728	-0,014	0,00
8,5	12	142	755	-0,4542	-0,454	-0,4541	-0,0965	-0,097	-0,0972	-0,085	0,00
8,5	15	151	716	-0,4485	-0,449	-0,4489	-0,1202	-0,120	-0,1199	0,041	-0,01
8,5	18	162	676	-0,4416	-0,442	-0,4425	-0,1435	-0,143	-0,1432	0,064	-0,01
8,5	21	177	637	-0,4335	-0,434	-0,4338	-0,1664	-0,166	-0,1659	0,066	0,00
8,5	24	193	597	-0,4242	-0,424	-0,4245	-0,1889	-0,189	-0,1892	-0,028	-0,01
8,5	27	211	559	-0,4137	-0,414	-0,4140	-0,2108	-0,211	-0,2114	-0,047	-0,01
8,5	30	232	523	-0,4021	-0,402	-0,4017	-0,2322	-0,232	-0,2323	-0,039	0,01
8,5	33	254	488	-0,3894	-0,389	-0,3889	-0,2529	-0,253	-0,2527	-0,012	0,01
8,5	36	276	453	-0,3757	-0,376	-0,3761	-0,2729	-0,273	-0,2731	0,020	-0,01
8,5	39	302	420	-0,3609	-0,361	-0,3610	-0,2922	-0,292	-0,2923	0,004	0,00
8,5	42	329	387	-0,3451	-0,345	-0,3453	-0,3107	-0,311	-0,3115	-0,057	-0,01
8,5	45	358	358	-0,3283	-0,328	-0,3284	-0,3283	-0,328	-0,3284	0,000	0,00

En resumen el mayor error promedio entre todas las pruebas realizadas se presentó para un ángulo θ igual a un grado, promedio que reflejado en la superficie terrestre es del orden de 8 Km.