

Studio di fattibilità dei magneti in configurazione “Halbach” dello spettrometro dell’esperienza FOOT

Claudio Sanelli¹

¹⁾ *INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, I-00044 Frascati, Italy*

Abstract

Questa nota presenta uno studio di fattibilità per dei magneti permanenti da utilizzare nella costruzione dello spettrometro dell’esperienza FOOT. Vengono presentate simulazioni magnetiche in 2D e 3D per differenti configurazioni dei magneti permanenti in configurazione “Halbach” facendo una valutazione comparativa delle dimensioni necessarie, in particolare per il materiale magnetico, per ottenere i valori di campo richiesti. Infine si presenta una simulazione di un sistema di due magneti così come al momento si pensa di realizzare il sistema finale dell’esperienza.

1 Introduzione

L'esperimento FOOT (FragmentatiOn Of Target) è finalizzato alla misura della frammentazione nucleare nella tecnica di adroterapia per la cura dei tumori. In particolare il fascio di particelle che depositerà la sua energia sulle cellule tumorali, distruggendone definitivamente il DNA, perde circa il 10% della sua efficacia biologica attraversando i tessuti sani nel suo percorso verso il bersaglio. Durante questo percorso alcune particelle del fascio andranno ad interagire con i tessuti sani dando luogo ad una produzione di altre particelle, di frammentazione, di cui FOOT si propone di misurare le caratteristiche. In modo del tutto simile lo stesso effetto si verifica nello spazio essendo gli astronauti soggetti al flusso di protoni provenienti dal sole o di particelle di alta energia provenienti dallo spazio galattico. La conoscenza quindi degli effetti della frammentazione è particolarmente importante anche al fine di determinare le idonee protezioni schermanti. La misura viene effettuata facendo collidere il fascio di particelle su un opportuno target e la posizione dei frammenti viene tracciata attraverso due rivelatori a pixel di silicio, di cui uno immediatamente dopo il bersaglio e l'altro posizionato più a valle a circa 10-15 cm. Un calorimetro dedicato misurerà infine il tempo di volo e l'energia dei frammenti prodotti. Per aumentare la risoluzione dell'apparato, si è pensato di far viaggiare detti frammenti attraverso un campo magnetico in modo da aumentarne la deflessione e, di conseguenza, ottenere una migliore separazione tra le varie particelle sul rivelatore finale. La presente nota riassume le valutazioni effettuate al fine di determinare la configurazione magnetica ottimale alla misura delle caratteristiche delle particelle prodotte dalla frammentazione.

2 Considerazioni preliminari

In questo studio di fattibilità si è assunto:

- una sezione circolare utile del magnete avente raggio di 3.5 cm;
- un valore di induzione magnetica minimo di 0.6 T al centro della sezione di cui sopra;
- utilizzo di PM (Permanent Magnet) quali generatori di flusso magnetico dello stesso materiale che fu utilizzato per la costruzione dei dipoli della sezione di interazione di KLOE-2;
- i magneti sono previsti essere inseriti in una scatola di Alluminio di contenimento avente spessore minimo di 2 mm;
- non si prevede l'impiego di alcuna schermatura esterna in Ferro a basso contenuto di Carbonio.

A tal fine si è considerato nelle simulazioni 2D il Sm-Co (Samarium – Cobalto) 2:17 tipo R26HS per i magneti permanenti, ad alto valore di energia immagazzinata, prodotto commercialmente, avente:

- Magnetizzazione residua: $B_r = 10900$ Gauss;
- Campo Coercitivo: $H_c = -10200$ Oe.

Questi valori si riferiscono ad un materiale specifico, sopra indicato, e sono quelli indicati a suo tempo dal costruttore dei dipoli per KLOE-2. È ovvio che i calcoli di dimensionamento finali dovranno essere effettuati con valori garantiti dalla ditta costruttrice del magnete.

In generale il materiale per magneti permanenti si ottiene per sinterizzazione e risulta piuttosto fragile. Inoltre, il Sm-Co è un materiale velenoso per ingestione, per cui la sua manipolazione richiede opportuni accorgimenti nella lavorazione al fine di evitare pericoli per l'operatore e l'utilizzatore finale. A tale scopo, si è pensato di racchiudere i blocchi di PM necessari a comporre il magnete dello spettrometro in una scatola di Alluminio, sia per proteggere i PM da eventuali urti, quindi come protezione meccanica, sia per evitare un qualsiasi spolvero di materiale. Detta scatola di Al segue la forma dei PM e si è assunto uno spessore di 2 mm, eventualmente realizzabile per elettroerosione.

Come conseguenza, la gap del magnete, ovvero il raggio ai PM, ai fini elettromagnetici è di 3.7 cm. La figura 1 riporta la sezione di 1/2 magnete nella configurazione "Halbach" classica, ovvero con 12 blocchi di PM in totale, con uno spessore dei blocchetti pari a 3,5 cm, a cui corrisponde una induzione magnetica al centro di poco più di 0,6 T.

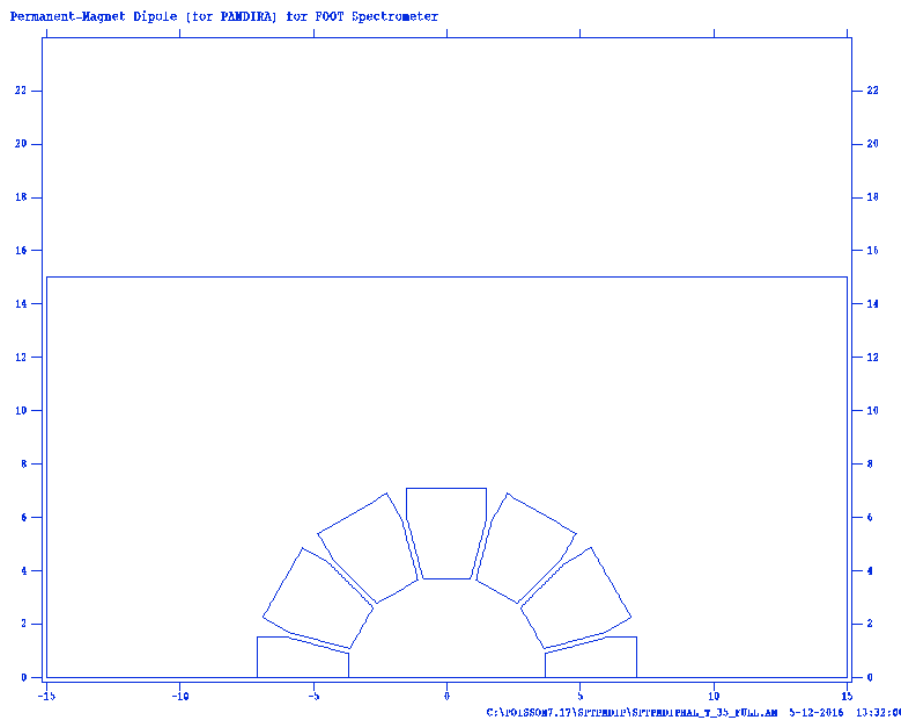


Figura 1: Sezione "Halbach" classica a 12 blocchi (1/2 della geometria)

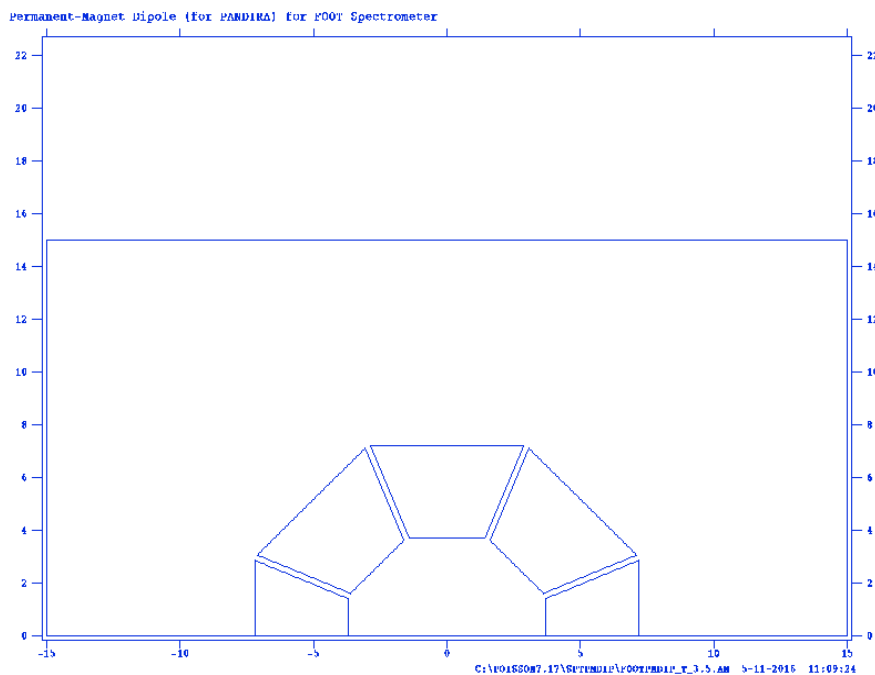


Figura 2: Sezione “Halbach” semplificata a 8 blocchi (1/2 della geometria)

La figura 2 riporta invece la sezione di 1/2 magnete nella configurazione “Halbach” semplificata, ovvero con 8 blocchi di PM in totale, sempre con uno spessore dei blocchetti pari a 3.5 cm, a cui corrisponde una induzione magnetica al centro di poco più di 0.6 T.

3 Calcoli elettromagnetici – 2D

Sulla base delle suddette condizioni, sono state effettuate delle simulazioni con il codice 2D PANDIRA (programma del gruppo POISSON specifico per magneti con PM - Los Alamos) valide per una struttura infinitamente lunga. La figura 3 mostra l’andamento delle linee di flusso di campo magnetico nel caso di configurazione “Halbach” a 12 blocchi mentre la figura 4 riporta l’andamento delle linee di flusso nel caso “Halbach” semplificato a 8 blocchi. Entrambe le figure 3 e 4 fanno riferimento ad uno spessore dei blocchetti di PM di 3.5 cm. Figure simili si hanno per spessori di PM maggiori di 3.5 cm.

In figura 5, è riportato l’andamento dell’induzione magnetica sull’asse orizzontale delle ascisse nel caso “Halbach” a 12 blocchi, mentre in figura 6 è riportato l’analogo andamento nel caso “Halbach” a 8 blocchi. Entrambi gli andamenti fanno riferimento al caso di PM con spessore 3.5 cm.

La curva verde mostra l’andamento della componente B_y sull’asse rispettivamente, da sinistra verso destra, all’esterno del magnete, nel blocco PM laterale di sinistra, nella gap del magnete, nel blocco di PM laterale di destra ed infine all’esterno del magnete. La curva rossa è l’analogo per la componente B_x che risulta nulla come atteso.

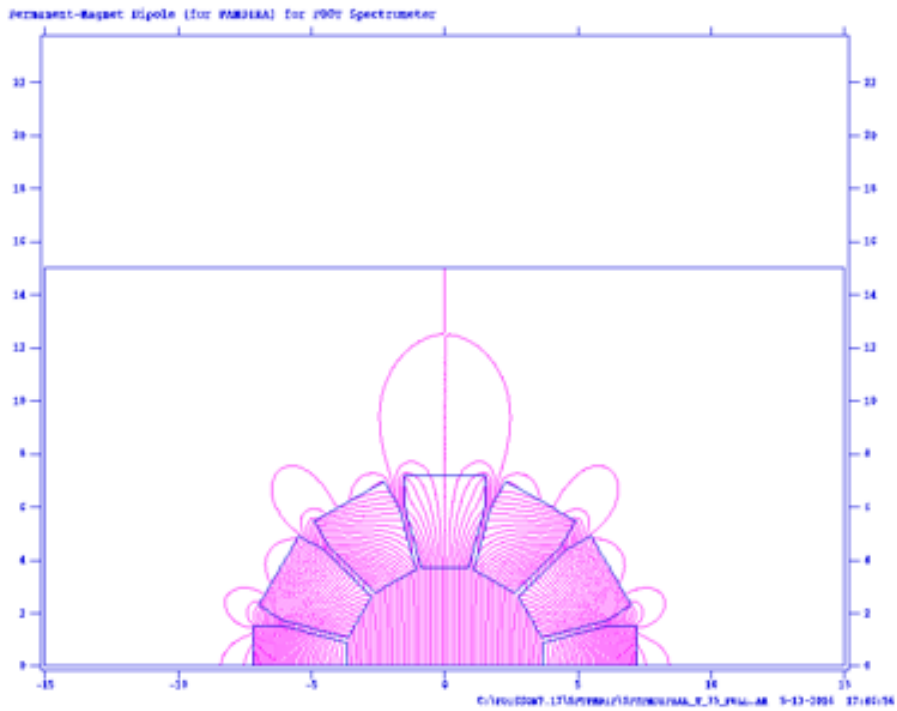


Figura 3: Andamento delle linee di flusso del campo magnetico nel caso “Halbach” a 12 blocchi.

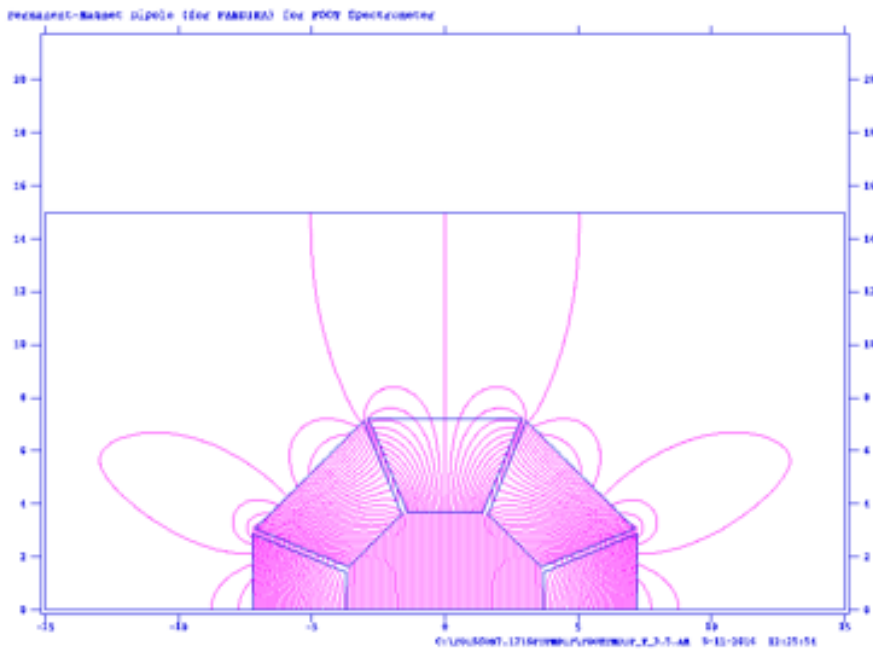


Figura 4: Andamento delle linee di flusso del campo magnetico nel caso “Halbach” a 8 blocchi.

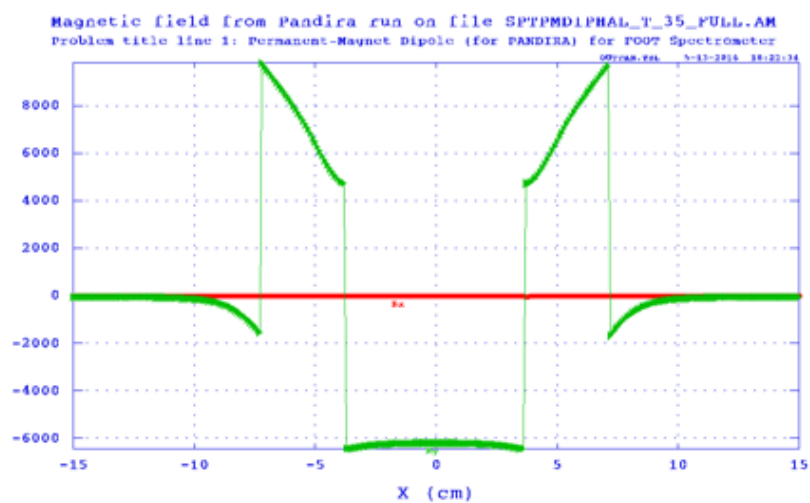


Figura 5: Andamento dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale delle ascisse nel caso di "Halbach" a 12 blocchi.

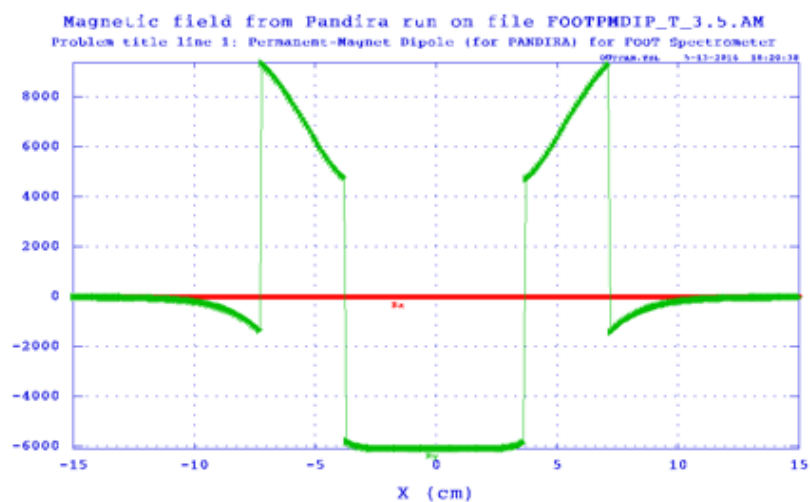


Figura 6: Andamento dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale delle ascisse nel caso di "Halbach" a 8 blocchi.

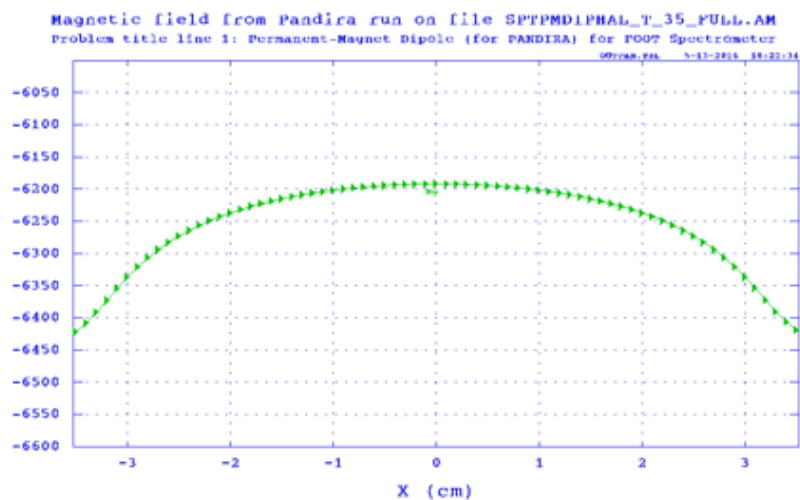


Figura 7: Zoom della fig. 5: andamento di B_y sull'asse orizzontale del magnete nell'intervallo da -3.5 a + 3.5 cm, caso "Halbach" a 12 blocchi.

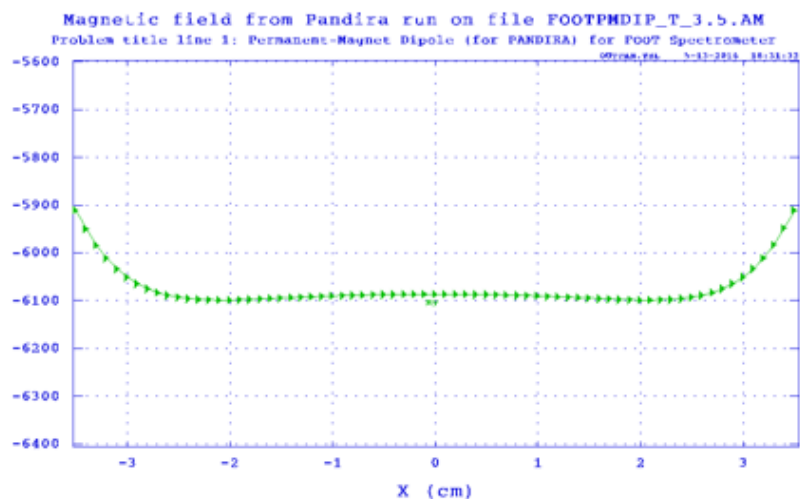


Figura 8: Zoom della fig. 6: andamento di B_y sull'asse orizzontale del magnete nell'intervallo da -3.5 a + 3.5 cm, caso "Halbach" a 8 blocchi.

Le figure 7 e 8 sono uno zoom delle fig. 5 e 6, rispettivamente, e mostrano la componente B_y sull'asse del magnete nella gap dello stesso nell'intervallo da -3.5 a + 3.5 cm. Come è possibile vedere confrontando gli andamenti di figura 7 e 8, nel caso "Halbach" a 12 blocchi si ha un termine dominante del secondo ordine negativo piuttosto forte mentre, nel caso "Halbach" a 8 blocchi questo termine è meno marcato essendo compensato dagli altri termini di ordine superiore con un andamento, nella zona centrale del magnete, più "piatto", anche se il valore assoluto dell'induzione magnetica, nel secondo caso, risulta leggermente più basso che nel caso "Halbach" a 12 blocchi ma comunque superiore a 0.6 T. Per avere un ordine di grandezza, nel seguito vengono indicate le variazioni percentuali rispetto al valore centrale dell'induzione magnetica a differenti posizioni, sempre sull'asse orizzontale di mezzeria. Valori positivi corrispondono ad aumenti dei valori assoluti dell'induzione magnetica e viceversa.

Tabella 1:

X (cm)	"Halbach" a 12 blocchi	"Halbach" a 8 blocchi
1	0.15 %	0.063 %
2	0.49 %	0.20 %
3	2.33 %	-0.58 %

Per valutare l'uniformità dell'induzione magnetica nell'intera sezione utile del magnete, nel caso della configurazione "Halbach" classica a 12 blocchi, la figura 9 riporta il valore della componente B_y lungo la semicirconferenza per raggi pari a 1, 2 e 3 cm, mentre la figura 10 riporta l'analogo per la componente orizzontale B_x . Gli angoli, in gradi, si contano in senso antiorario partendo dal semiasse positivo delle ascisse. Come prevedibile, quanto più ci si allontana dal centro del magnete tanto più peggiora la qualità di campo magnetico e tanto più ci si avvicina ai PM tanto più si risente della discretizzazione a blocchetti dei generatori di flusso magnetico. Le figure 11 e 12 sono l'analogo delle figure 9 e 10 ma nel caso della configurazione "Halbach-like" ovvero con 8 blocchi di PM.

La figura 13 mostra come varia l'induzione magnetica al centro del magnete al variare dello spessore dei blocchetti di PM sia nel caso a 12 che 8 blocchi. Viene anche riportata la previsione della formula teorica, come da me modificata con il coefficiente moltiplicativo 0,82, che in questa configurazione risulta essere leggermente pessimistico. Dalla figura 13 si evince che, volendo, è possibile ottenere configurazioni con valori di B_y maggiori di 0,6 T. Tuttavia, a parità di campo integrato lungo l'asse del magnete, un magnete con B_y al centro più alto significa un magnete più corto e quindi con una configurazione dell'induzione magnetica longitudinale sempre più prossima ad una gaussiana. Una valutazione quantitativa dell'andamento longitudinale potrà aversi con una simulazione 3D. Giusto per avere una visione, la figura 14 riporta 1/4 della geometria per la

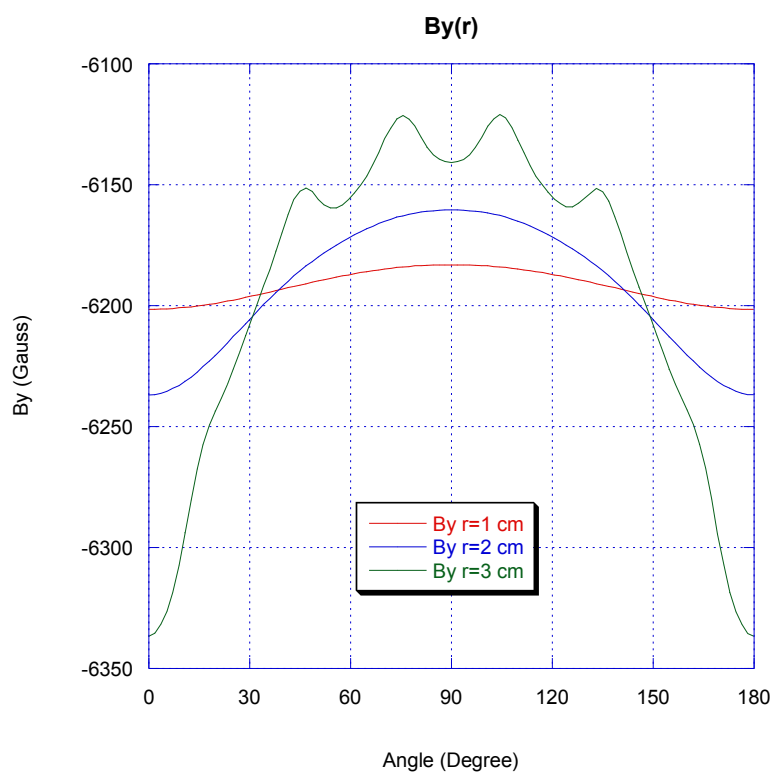


Figura 9: Andamento della componente B_y (Gauss) lungo la semicirconferenza avente raggio $r=1$, $r=2$, e $r=3$ cm. “Halbach” 12 blocchi

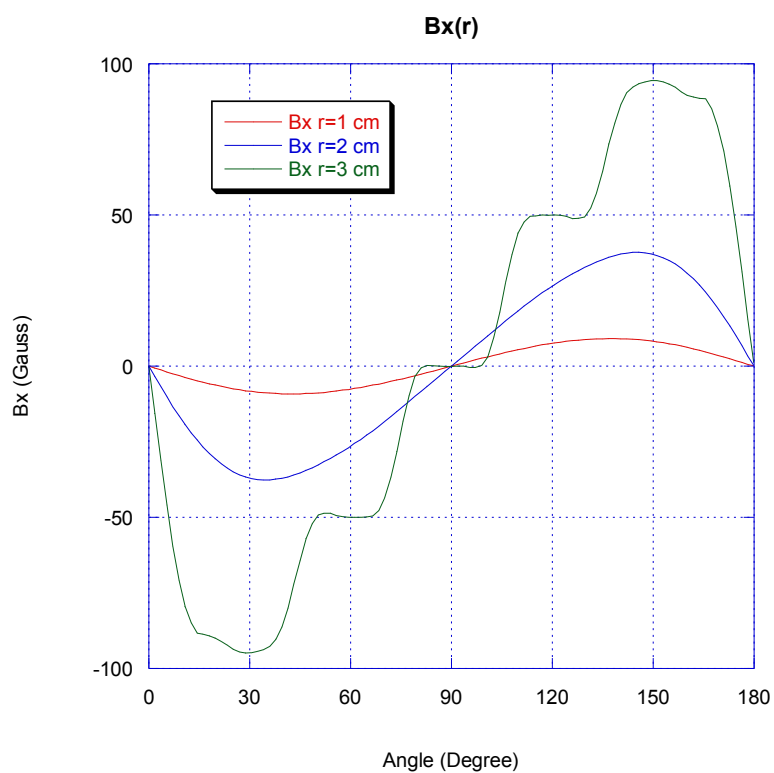


Figura 10: Andamento della componente B_x (Gauss) lungo la semicirconfenza avente raggio $r=1$, $r=2$, e $r=3$ cm. “Halbach” 12 blocchi

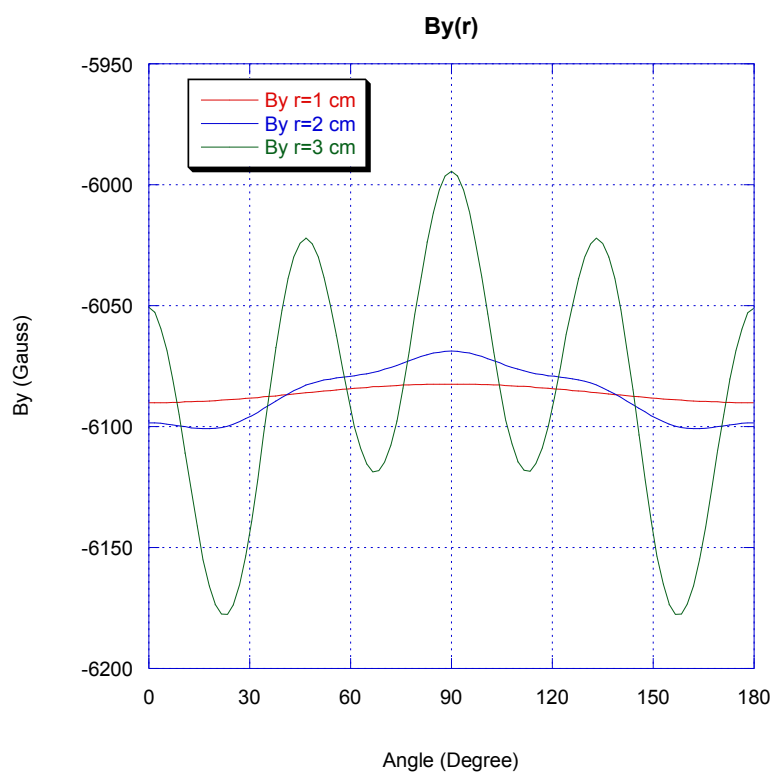


Figura 11: Andamento della componente B_y (Gauss) lungo la semicirconferenza avente raggio $r=1$, $r=2$, e $r=3$ cm. “Halbach-like” 8 blocchi.

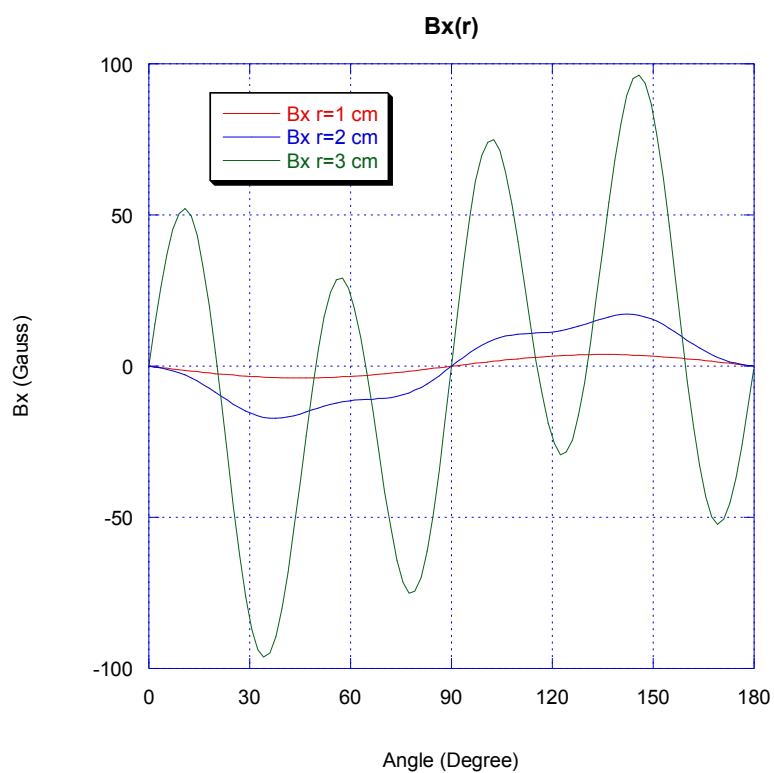


Figura 12: Andamento della componente B_x (Gauss) lungo la semicirconferenza avente raggio $r=1$, $r=2$, e $r=3$ cm. “Halbach-like” 5 8 blocchi.

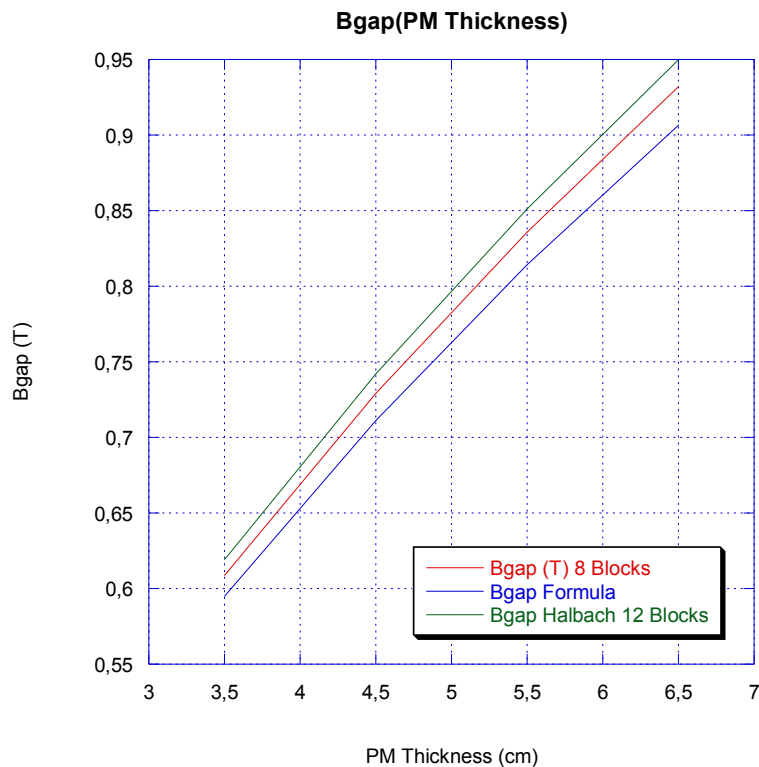


Figura 13: Andamento dell'induzione magnetica B_y al centro del magnete al variare dello spessore e di blocchetti di PM, sia nel caso "Halbach" 12 blocchi che nel caso "Halbach-like" 8 blocchi.

configurazione Halbach classica 12 blocchi con uno spessore dei PM di 6,5 cm che danno una induzione al centro del magnete di circa 0,95 T.

4 Calcoli elettromagnetici – 3D

Le geometrie individuate in 2D sono state simulate utilizzando il codice OPERA, ver.16R1, per la sola configurazione "Halbach" a 12 blocchi, onde valutare la riduzione dell'induzione magnetica dovuta al flusso disperso avendo una gap del magnete, ovvero un diametro di gola, confrontabile con la lunghezza del magnete. In queste simulazioni si è assunta una lunghezza totale dei blocchi di PM di 9 cm, a cui va aggiunto 1 cm (0.5 cm per parte) dovuto allo spessore dei tappi di chiusura della scatola in alluminio di contenimento dei blocchi stessi, per una lunghezza meccanica complessiva di 10 cm. La figura 15 mostra la geometria del modello, pari a 1/8 del magnete, mentre la figura 16 mostra l'intero magnete, nel caso in cui lo spessore dei blocchi di PM è di 3.5 cm, corrispondenti a circa 0.6 T del caso bidimensionale. In questa configurazione il valore dell'induzione al centro del magnete scende a circa 0.51 T. I differenti colori dei blocchi di PM corrispondono a

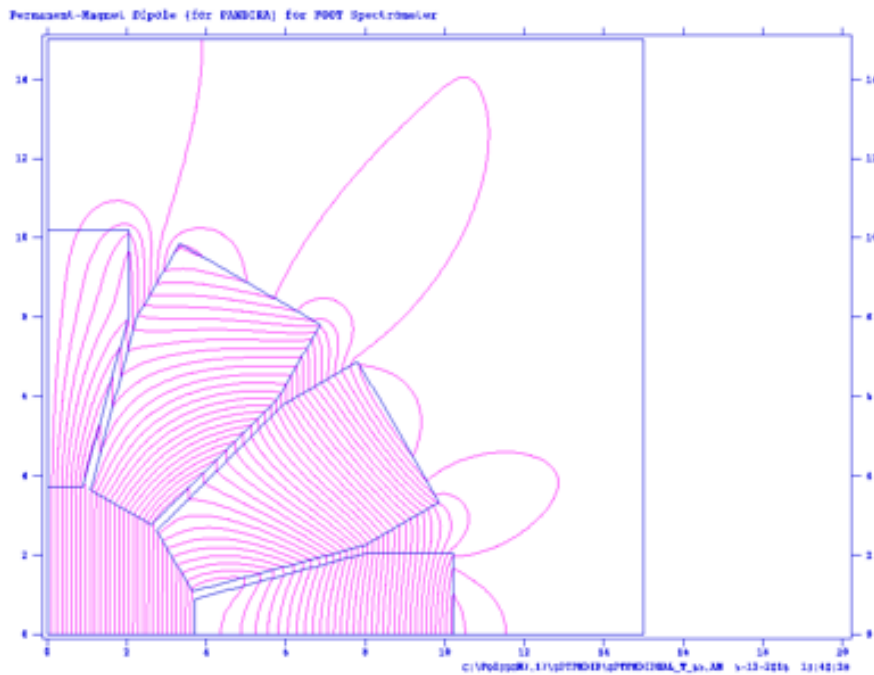


Figura 14: Configurazione “Halbach” 12 blocchi con spessore dei blocchetti di PM di 6.5 cm.

diverse direzione del vettore di magnetizzazione del campo magnetico.

La figura 17 mostra la direzione del vettore induzione magnetica B nella gap di magnete sul piano di simmetria centrale x-y del magnete.

La figura 18 mostra l’andamento della componente B_y (Gauss) dell’induzione magnetica sull’asse orizzontale x al centro del magnete. La componente B_x è nulla, come imposto dalle simmetrie. La figura 19 mostra l’andamento della componente B_y (Gauss) dell’induzione magnetica sull’asse orizzontale x al centro del magnete nel range utile -3.5 – 3.5 cm. La figura 20 mostra l’andamento della componente B_y (Gauss) dell’induzione magnetica sull’asse verticale y al centro del magnete nel range utile -3.5 – 3.5 cm.

La figura 21 mostra l’andamento della componente B_y (Gauss) dell’induzione ma-

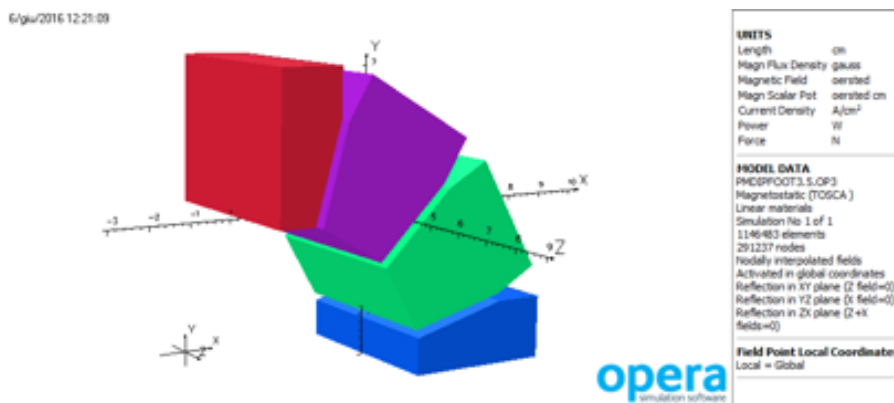


Figura 15: 1/8 del modello 3D con spessore dei PM di 3.5 cm.

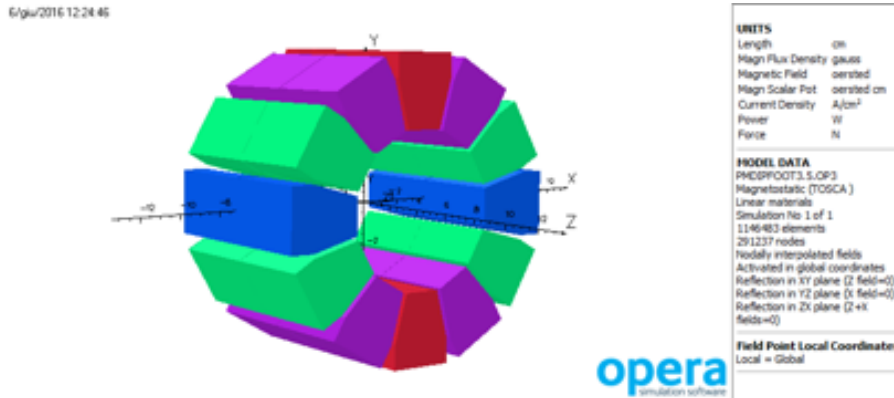


Figura 16: Modello completo del magnete 3D con spessore dei PM di 3.5 cm.

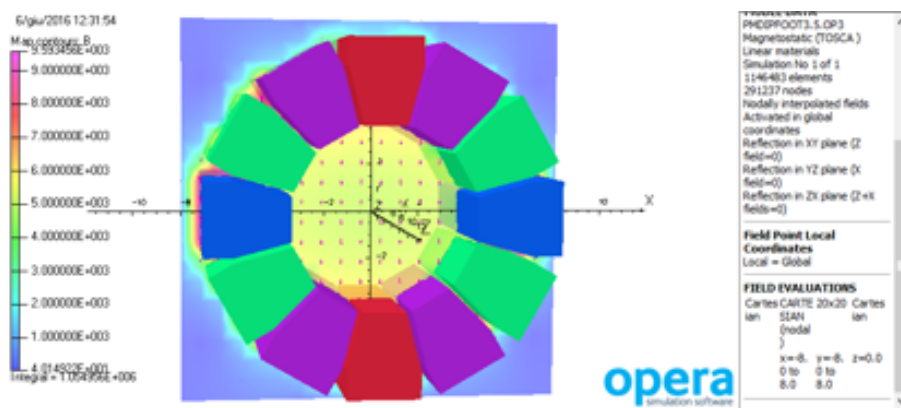


Figura 17: Direzione del vettore induzione magnetica B sul piano di simmetria centrale x-y del magnete con spessore dei PM di 3.5 cm.

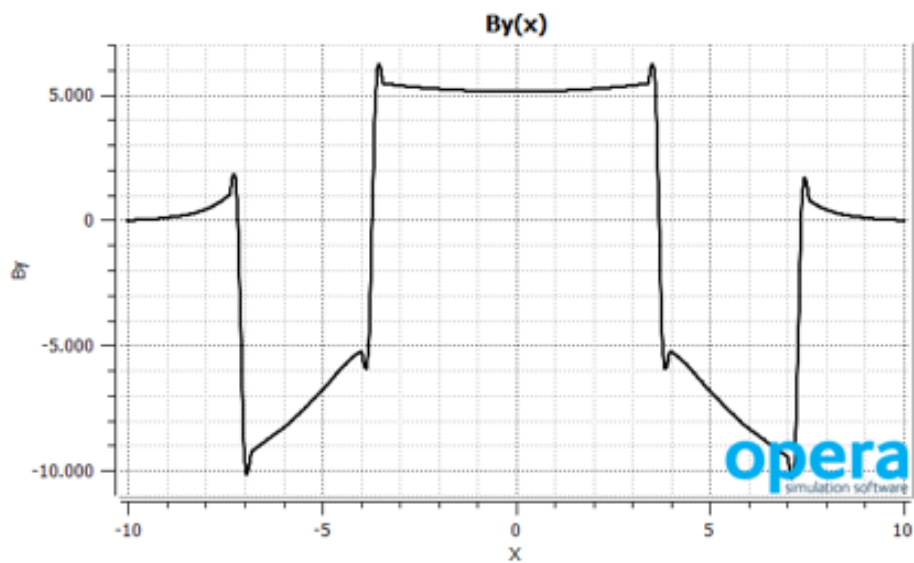


Figura 18: Andamento della componente By (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro del magnete.

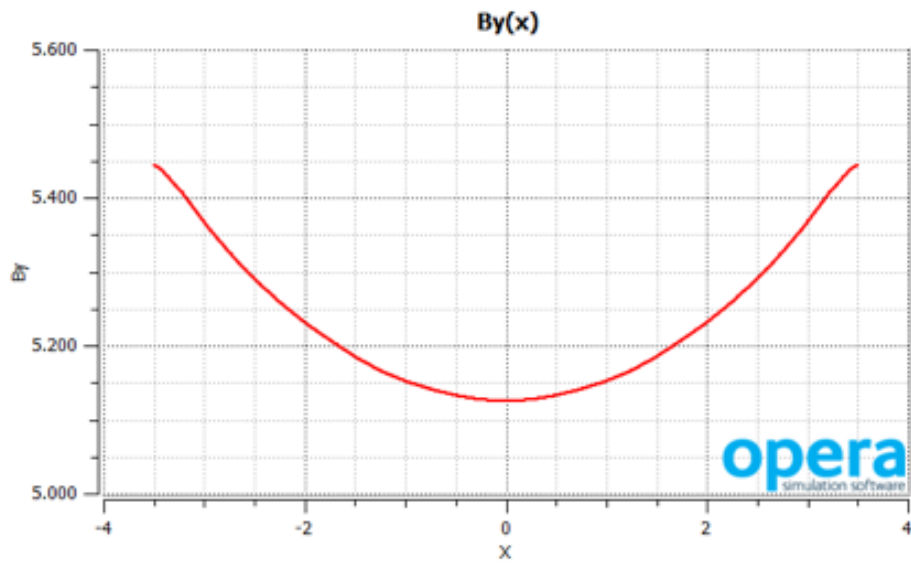


Figura 19: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro del magnete nel range utile $-3.5 - 3.5$ cm.

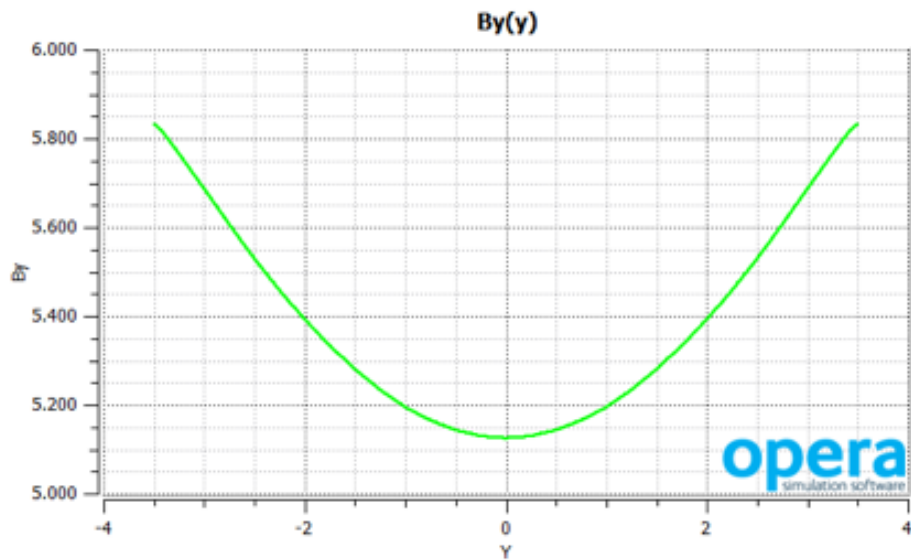


Figura 20: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse verticale y al centro del magnete nel range utile $-3.5 - 3.5$ cm.

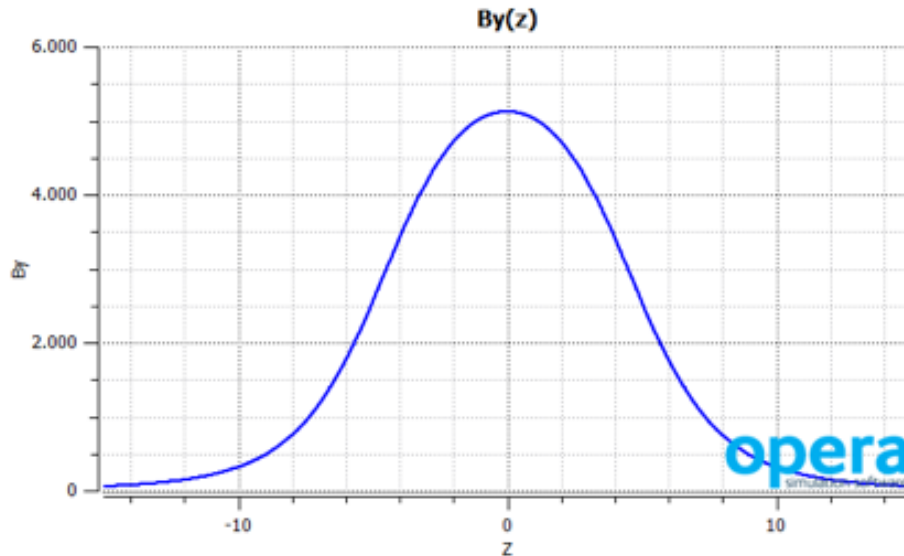


Figura 21: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse longitudinale z al centro del magnete nel range $-15 - +15$ cm.

gnetica sull'asse longitudinale z al centro del magnete nel range $-15 - +15$ cm. L'andamento, come atteso, è quello di una gaussiana piuttosto larga. Integrando il valore di B_y di figura 21 tra -15 e $+15$ cm, si ottiene un valore:

$$\int B_y(z)dz = 55015.80 \text{ Gauss} \times \text{cm}$$

Dividendo tale valore per il valore di $B_y(0)$ al centro del magnete, pari 5125.18 Gauss, otteniamo la lunghezza magnetica equivalente del magnete che risulta essere: $L_{\text{mag}} = 10.73$ cm valore leggermente superiore a quello desiderato di 10 cm e corrispondente ad una lunghezza meccanica totale dei blocchi di PM di 9 cm.

Al fine di recuperare la diminuzione del valore dell'induzione magnetica da 0.6 T, valore per una struttura infinitamente lunga, a 0.51 T, valore previsto dalla simulazione per la struttura finita avente uno spessore dei blocchi di PM di 3.5 cm, sono state effettuate varie simulazioni aumentando lo spessore dei blocchi di PM. Ad esempio, il valore di 0.6 T si ottiene con uno spessore dei PM di circa 4.5 cm contro i 3.5 cm del bidimensionale, e si riesce comunque a raggiungere i 0.9 T di induzione magnetica, al centro del magnete, ma con uno spessore dei PM di circa 11 cm contro i circa 6 cm previsti dal 2D, come riportato in figura 13. Nel seguito non vengono riportati i risultati per tutte le simulazioni effettuate ma, giusto per dare una idea di dove si potrebbe andare a parare, vengono riportati alcuni risultati per la simulazione corrispondente a 11 cm di spessore dei blocchi di PM. La figura 22 mostra la geometria al magnete in questa configurazione, da confrontarsi con la figura 16. Il diametro esterno del magnete passa da 14.4 cm a 29.4 cm, quasi raddoppiando.

L'andamento di $B_y(x)$ lungo l'asse x è riportato in figura 23. La figura 24 riporta uno zoom della figura 23 nella zona utile di interesse. L'andamento in longitudinale,

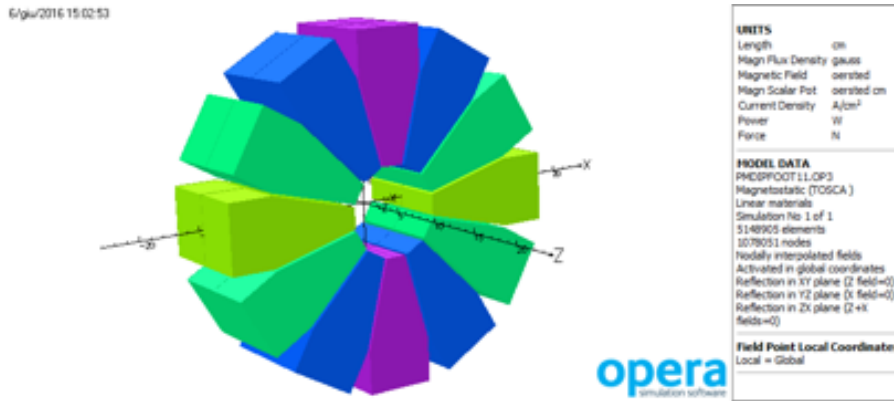


Figura 22: Modello completo del magnete 3D con spessore dei PM di 11 cm.

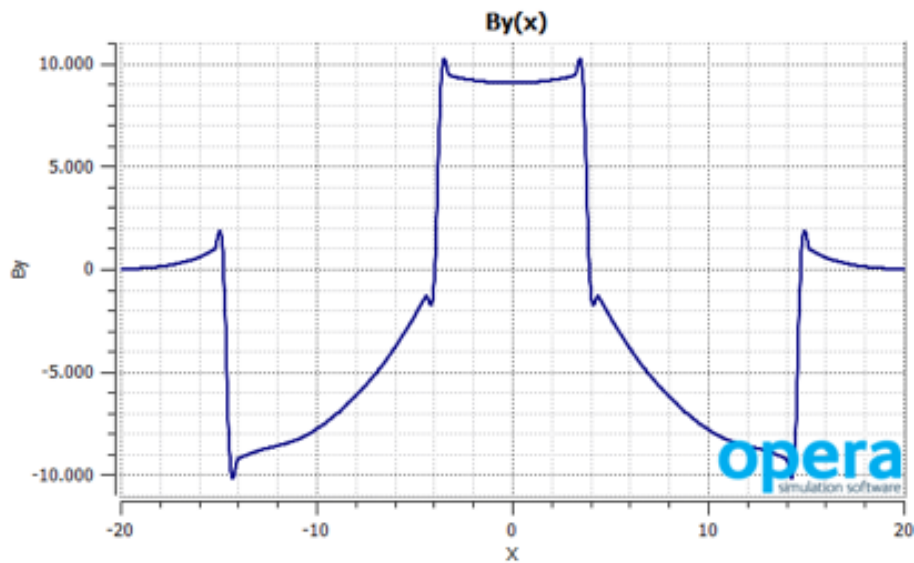


Figura 23: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro del magnete nel caso di spessore dei PM di 11 cm.

ovvero lungo z della componente $B_y(z)$ è riportato in figura 25.

In questa configurazione il valore di B_y di figura 25 integrato tra $-15 < z < +15$ cm, vale:

$$\int B_y(z) dz = 113462.79 \text{ Gauss} \times \text{cm}$$

Dividendo tale valore per il valore di $B_y(0)$ al centro del magnete, pari 9048.42 Gauss, otteniamo la lunghezza magnetica equivalente del magnete che risulta essere: $L_{\text{mag}} = 12.54$ cm. Infine, la figura 26 riporta i valore di $B_y(0,0,0)$ per differenti spessori dei blocchi di PM. Nella stessa figura vengono anche riportati i valori previsti da Pandira (per struttura infinitamente lunga) e già riportati in figura 13. La curva blu in figura 26 può con buona approssimazione essere espressa con la seguente funzione:

$$B_y(th) = 0.1034 + 0.14636 \cdot th - 0.009265 \cdot th^2 + 0.0002349 \cdot th^3$$

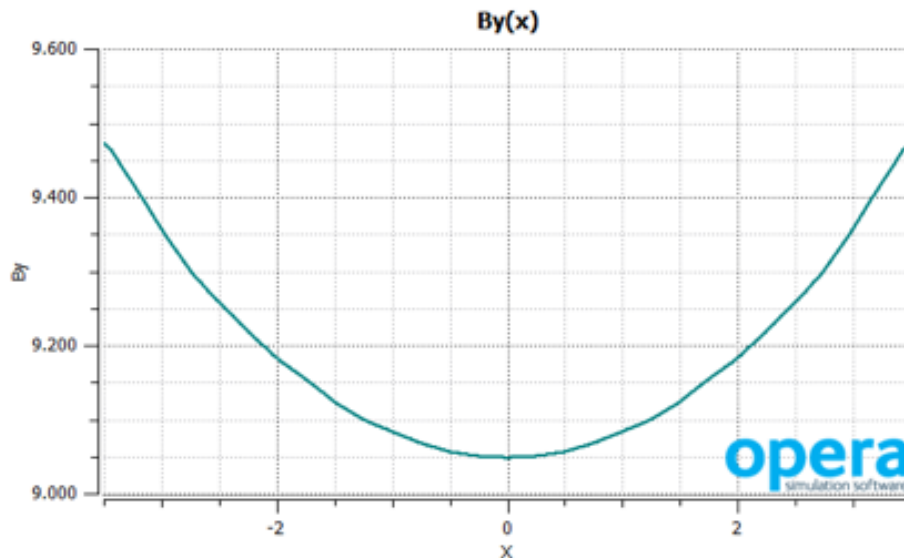


Figura 24: Zoom della figura 23 per $-3.5 < x < 3.5$ cm.

dove t_h (cm) è lo spessore dei blocchi di PM e $B_y(t_h)$ è il valore in Tesla dell'induzione magnetica al centro del magnete.

Le simulazioni effettuate dimostrano che nonostante il notevole incremento della gap del magnete tra la versione “convenzionale” con gap utile di 2 cm e quella qui analizzata con gap utile di 7 cm, è ancora possibile ottenere un magnete ragionevolmente compatto da 0.6 T di induzione magnetica al centro del magnete e, aumentando considerevolmente ma avendo ancora dimensioni e pesi “ragionevoli”, un magnete avente 0.9 T di induzione, con un diametro esterno di poco superiore ai 30 cm, considerando anche la scatola di contenimento dei blocchi di PM, con una lunghezza meccanica complessiva di 10 cm.

5 Simulazione con $B_{gap} = 0.8$ T e lunghezza dei blocchi di PM di 14 cm

Nel seguito è descritta la simulazione nel caso particolare in cui è richiesto un valore di induzione magnetica di 0.8 T al centro del magnete ma con una lunghezza complessiva dei blocchi di PM di 14 cm anziché 9 cm come nei casi precedenti, sempre mantenendo un diametro di gola utile del magnete di 7 cm (che diventa 7.4 cm ai fini magnetici per tener conto dello spessore della scatola di contenimento dei blocchi di PM). Passare da 9 a 14 cm di lunghezza incide notevolmente sul rapporto raggio di gola/lunghezza blocchi spostando la curva blu di figura 26 in alto avvicinandola alla curva rossa, valida per magneti infinitamente lunghi. Infatti lo spessore dei blocchi di PM, che dalla curva blu avrebbe dovuto essere di 8 cm, si riduce a meno di 6 cm, con un risparmio di poco meno del 35 % in volume di materiale, scalando inversamente alle corone circolari (a diminuire) e linearmente con le lunghezze (ad aumentare).

La figura 27 mostra la nuova geometria simulata con Opera 16R1.

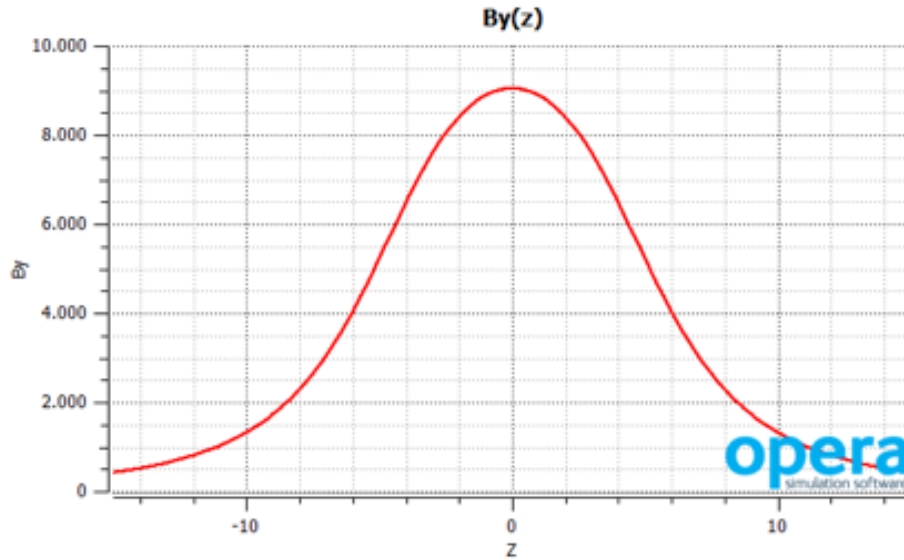


Figura 25: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse longitudinale z al centro del magnete nel range $-15 - +15$ cm, spessore dei PM di 11 cm.

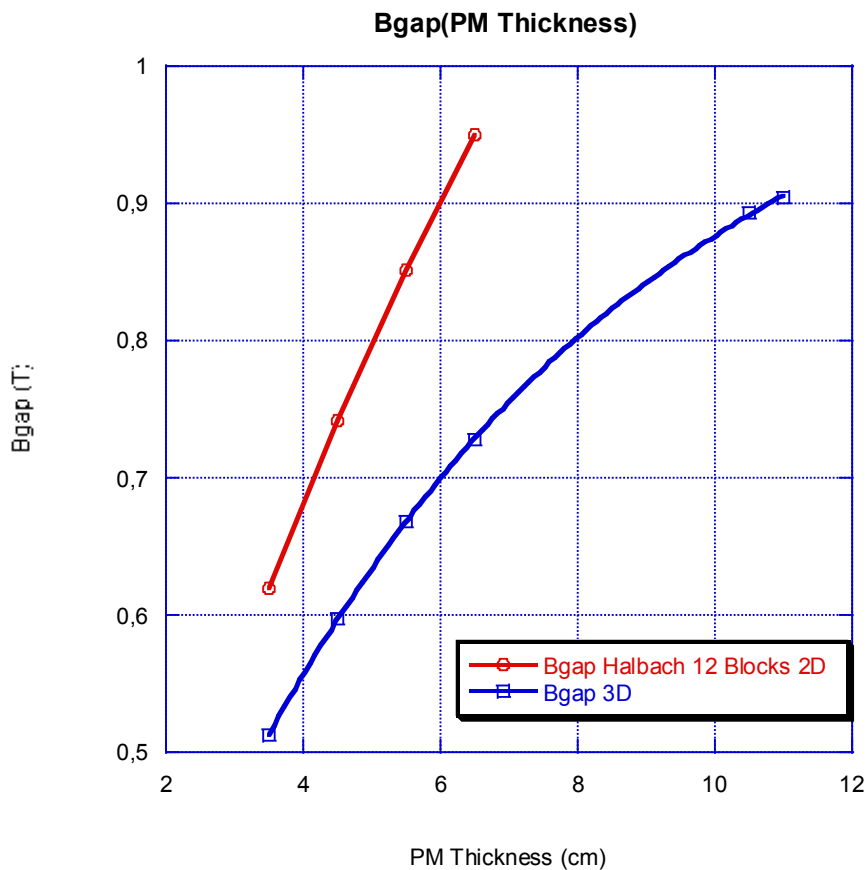


Figura 26: Confronto tra i valori di $B_y(0,0,0)$ al centro del magnete ottenuti con le simulazioni 2D e 3D in funzione dello spessore dei blocchi di PM nel caso della configurazione "Halbach" a 12 blocchi.

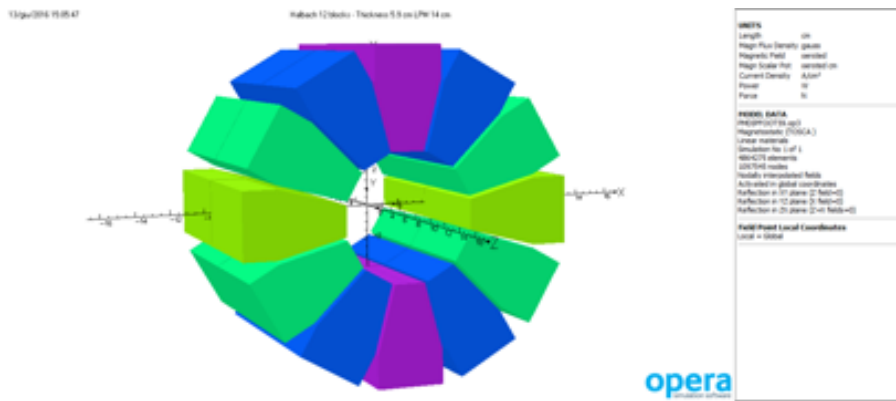


Figura 27: Modello completo del magnete 3D con spessore dei PM di 5.9 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 14 cm.

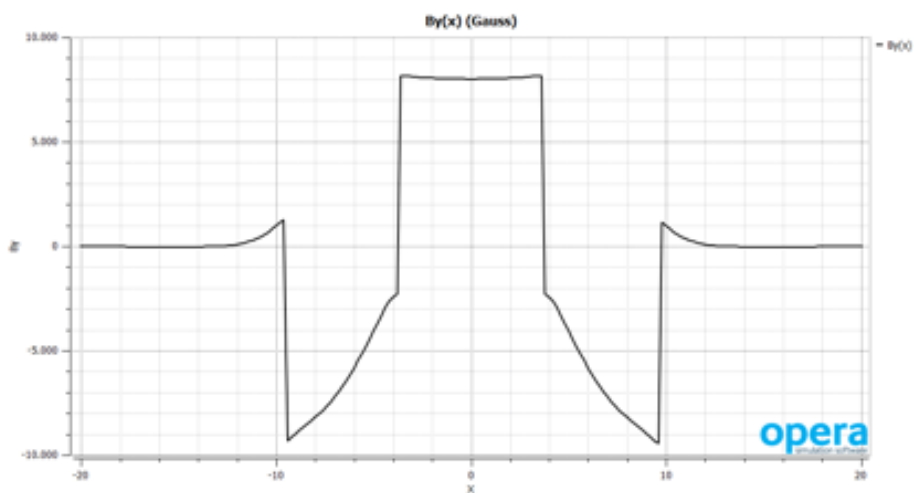


Figura 28: Andamento della componente By (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro del magnete nel caso di spessore dei PM di 5.9 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 14 cm.

La figura 28 riporta l'andamento della componente By (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro del magnete nel caso in esame.

La figura 29 riporta uno zoom della figura 28 nella zona utile di interesse.

L'andamento in longitudinale, ovvero lungo z della componente By(z) è riportato in figura 30.

In questa configurazione il valore di By di figura 30 integrato tra $-15|z|+15$ cm, vale:

$$\int By(z)dz = 121689.32 Gauss \times cm$$

Dividendo tale valore per il valore di By(0) al centro del magnete, pari 8010.09 Gauss, otteniamo la lunghezza magnetica equivalente del magnete che risulta essere: $L_{mag} = 15.2$ cm. La figura 31 è la stessa della figura 26 in cui è stata aggiunta la curva ottenuta nelle varie simulazioni effettuate nel caso in esame, ovvero con lunghezza complessiva dei blocchi di PM di 14 cm.

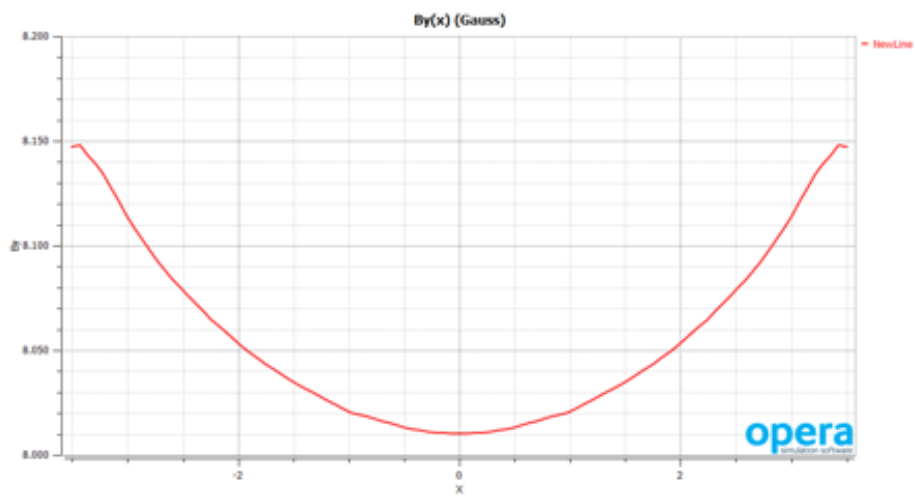


Figura 29: Zoom della figura 28 per $-3.5 < x < 3.5$ cm.

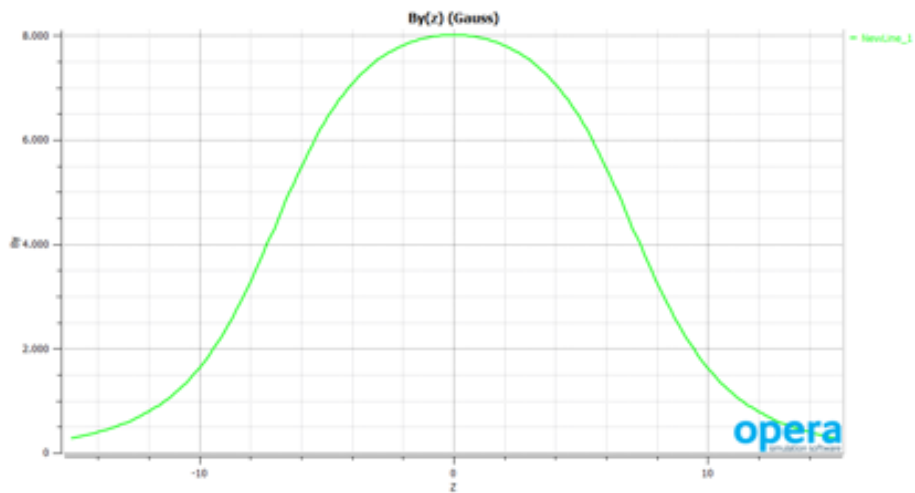


Figura 30: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse longitudinale z al centro del magnete nel range $-15 - +15$ cm, spessore dei PM di 5.9 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 14 cm.

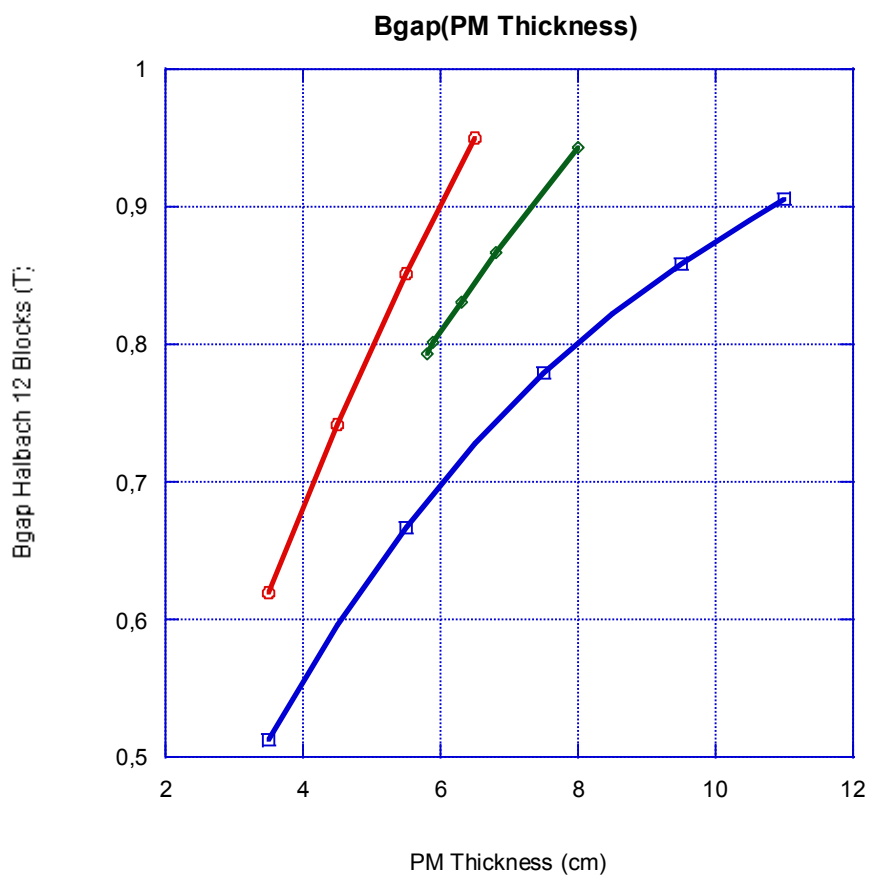


Figura 31: Confronto tra i valori di $B_y(0,0,0)$ al centro del magnete ottenuti con le simulazioni 2D e 3D in funzione dello spessore dei blocchi di PM nel caso della configurazione “Halbach” a 12 blocchi: Curva rossa: Pandira 2D; Curva blu: Opera 3D, lunghezza blocchi 9 cm; Curva verde: Opera 3D, lunghezza blocchi 14 cm.

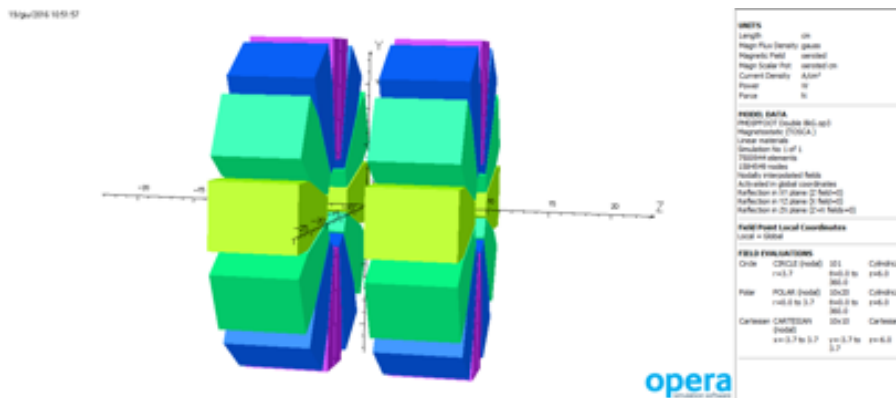


Figura 32: Modello completo 3D dei 2 magneti con spessore dei PM di 10 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 7 cm, per ciascun magnete.

6 Simulazione con 2 magneti aventi $B_{gap} = 0.8$ T, lunghezza dei blocchi di PM di 7 cm, distanziati tra di loro di 5 cm

Nel seguito è descritta la simulazione nel caso in cui anzichè avere un unico magnete da 14 cm di lunghezza, caso del paragrafo 4., si utilizzino due magneti aventi ancora un valore di induzione magnetica di 0.8 T al centro di ciascun magnete ma con una lunghezza dei blocchi di PM di 7 cm, sempre mantenendo un diametro di gola utile del magnete di 7 cm (7.4 cm ai fini magnetici per tener conto dello spessore della scatola di contenimento dei blocchi di PM), distanziati tra di loro di 5 cm (4 cm di spazio utile libero).

Spezzare il magnete in due comporta il peggioramento del rapporto tra raggio di gola/lunghezza blocchi ed infatti per ottenere un valore dell'induzione di circa 0.8 T (0.807 T per la precisione) occorre aumentare di nuovo lo spessore dei blocchi di PM portandolo da 5.9 cm del caso precedente a 10 cm. La figura 32 mostra la nuova geometria simulata con Opera 16R1. In questo caso l'origine del sistema di riferimento è sulla mezzeria dei 2 magneti. La figura 33 riporta l'andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro di uno dei 2 magneti nel caso in esame. La figura 34 riporta uno zoom della figura 33 nella zona utile di interesse.

L'andamento in longitudinale, ovvero lungo z della componente $B_y(z)$ è riportato in figura 35. I due picchi a -6 cm e +6 cm corrispondono alla mezzeria di ciascun magnete. Come atteso, le code delle due gaussiane si sommano ed in corrispondenza della mezzeria tra i due magneti si ha una induzione magnetica di 5320 Gauss. La figura 36 mostra come varia lo spessore dei blocchi di PM in funzione della lunghezza dei blocchi stessi per un valore di induzione magnetica di 0.8 T al centro del magnete ed un diametro di gola dei magneti di 7.4 cm (utile 7 cm) nel caso in esame di due magneti dipolari distanziati di 5 cm l'uno dall'altro.

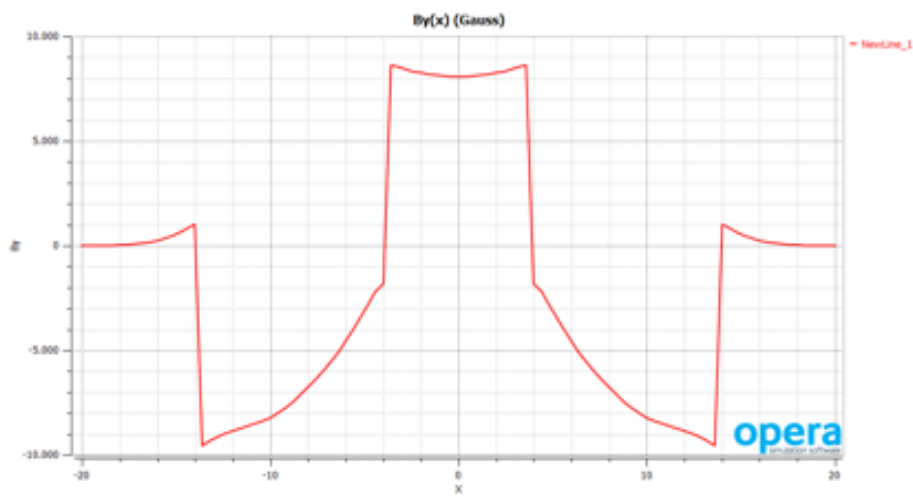


Figura 33: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse orizzontale x al centro di uno dei 2 magneti nel caso di spessore dei PM di 10 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 7 cm.

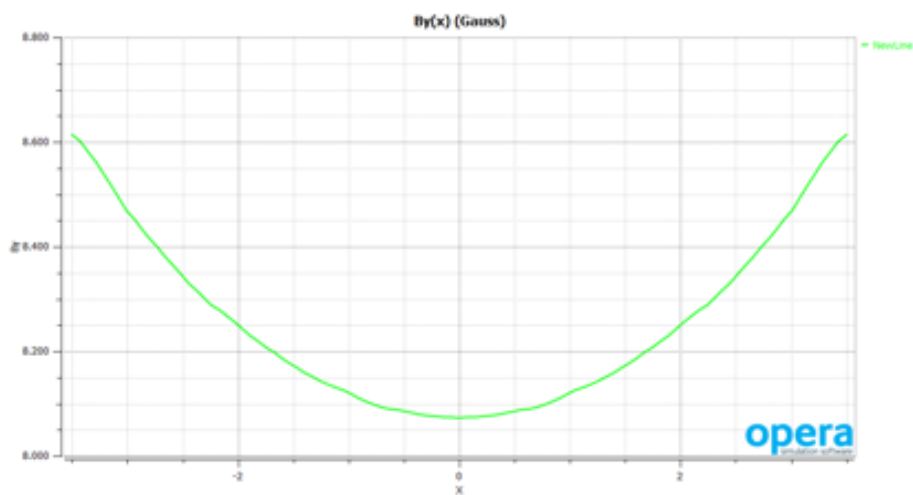


Figura 34: Zoom della figura 33 per $-3.5 < x < 3.5$ cm.

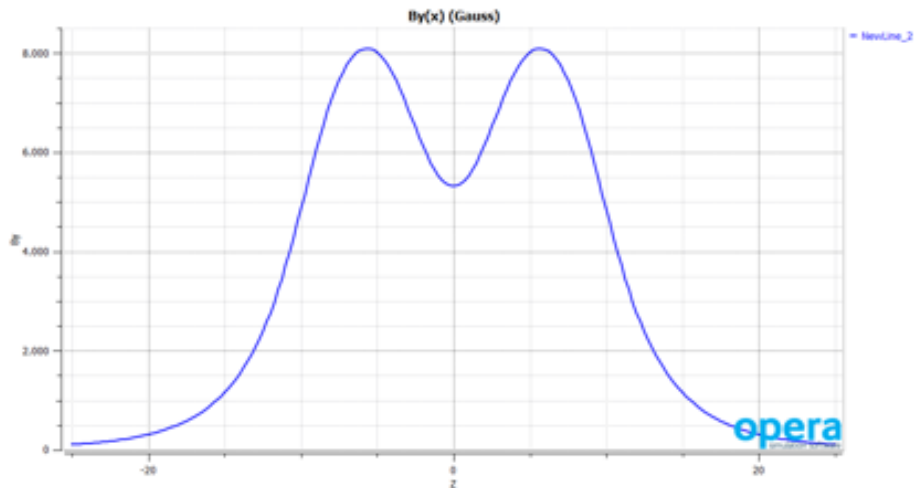


Figura 35: Andamento della componente B_y (Gauss) dell'induzione magnetica sull'asse longitudinale z al centro dei magneti nel range $-25 < z < +25$ cm, spessore dei PM di 10 cm e lunghezza dei blocchi di PM di 7 cm.

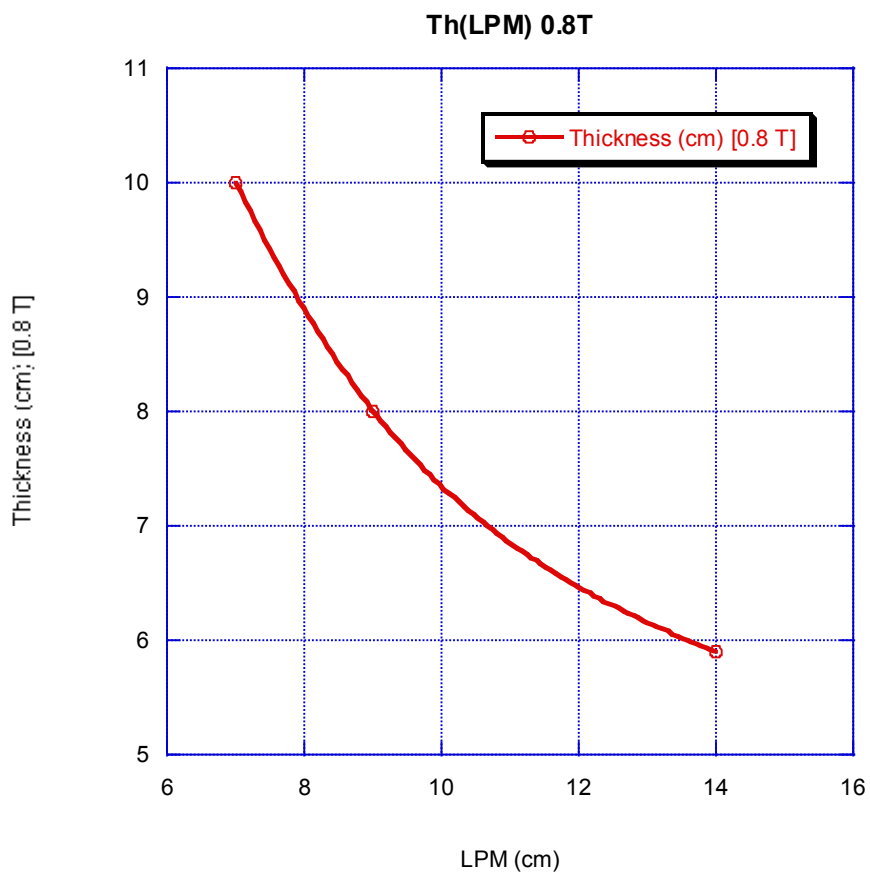


Figura 36: Variazione dello spessore dei PM in funzione della lunghezza dei blocchi di PM per un valore di induzione di 0.8 T ed un diametro di gola di 7.4 cm.