



**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO  
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI**

<b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b>	<b>102015000065509</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>26/10/2015</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>26/04/2017</b>

**Classifiche IPC**

<b>Sezione</b>	<b>Classe</b>	<b>Sottoclasse</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Sottogruppo</b>
G	01	R	33	383

<b>Sezione</b>	<b>Classe</b>	<b>Sottoclasse</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Sottogruppo</b>
G	01	R	33	3873

**Titolo**

Magnete per diagnostica clinica tramite risonanze magnetiche (MRI) composto da anelli cilindrici di tipo Halbach: modalità di costruzione e tecniche per rendere omogeneo il campo magnetico in una larga frazione del volume interno del magnete.

## TITOLO

Magnete per diagnostica clinica tramite risonanze magnetiche (MRI) composto da anelli cilindrici di tipo Halbach: modalità di costruzione e tecniche per rendere omogeneo il campo magnetico in una larga frazione del volume interno del magnete.

## SOMMARIO

La presente invenzione individua le modalità di costruzione e le tecniche che consentono di ottenere un campo magnetico della omogeneità richiesta per l'utilizzo in analisi di imaging tramite risonanza magnetica (MRI), dell'ordine quindi di 20 parti per milione (ppm) nella zona di interesse (tale tecniche nel seguito verranno indicate con la parola "shimming"). La peculiarità del modello costruttivo descritto è di arrivare ad ottenere una regione di campo omogeneo, e quindi utilizzabile per tali analisi, di dimensioni lineari pari a circa il 40% delle dimensioni lineari del magnete. La tecnica di shimming prevede l'uso di materiale magnetico condizionato e permette di controllare con precisione la magnetizzazione degli elementi correttivi pur utilizzando un materiale che intrinsecamente ha una precisione molto bassa. Il risultato è un magnete di piccola dimensione e peso estremamente ridotto utilizzabile per misure MRI per applicazioni cliniche dedicate quali l'analisi delle articolazioni periferiche, l'analisi della regione oculare, la veterinaria.

## CAMPO DELL'INVENZIONE

L'invenzione è nell'ambito di sistemi e metodi per l'imaging tramite risonanze magnetiche. Più in particolare si riferisce a sistemi e metodi per scanner MRI dedicati. Uno scanner dedicato è un dispositivo che può eseguire analisi MRI in una parte limitata del corpo umano. I magneti per queste applicazioni sono più piccoli di quelli normalmente usati (sistemi "whole body") e hanno regioni uniformità di dimensioni minori. Il tipico campo di vista ("Field Of View", abbreviato "FOV") dei sistemi clinici per l'uomo è una sfera 40/50 cm di diametro, mentre, ad esempio, il FOV di un sistema dedicato alle articolazioni periferiche (mano, piede, Ginocchio) è una sfera di circa 16 cm di diametro. In generale i sistemi dedicati operano ad un valore del campo magnetico dell'ordine di 0.15T-0.3T, e vengono definiti a basso campo.

## STATO DELL'ARTE PRECEDENTE

Il magnete rappresenta la parte più critica di uno MRI e deve avere omogeneità di campo molto buona in una frazione significativa del suo volume interno. Scanner dedicati sono descritte in brevetti quali US6191584B1, US20080197845A1, US20100301861A1, US20110084695A1. Essi hanno in comune il fatto di essere formati da una struttura magnetica che comprende: il materiale magnetico, il giogo e i poli magnetici. La regione omogeneità del magnete è contenuto fra i poli e la parte del corpo in esame viene inserita in questa regione. La presenza del giogo e dei poli in ferro ha i seguenti inconvenienti:

- La presenza di ferro introduce perdite magnetiche e quindi a parità di campo magnetico generato è richiesta una maggiore quantità di materiale magnetico;
- Aumenta notevolmente le dimensioni e il peso del magnete;
- La procedura richiesta per lo shimming del campo magnetico diventa più complessa per effetto della non linearità della suscettibilità magnetica del ferro.

Un anello circolare di tipo Halbach è una particolare disposizione dei blocchi di magneti permanenti (vedi Figura 2) che aumenta il campo magnetico lungo una direzione mentre annulla il campo lungo la direzione

perpendicolare. Ciò si ottiene ruotando la direzione della magnetizzazione in funzione della posizione azimutale dei blocchi. Uno dei principali vantaggi di un anello di Halbach è che non necessita di un giogo in ferro per confinare il campo magnetico. Fig. 2 mostra diversi modi per ottenere un anello Halbach, in Fig.2a la variazione nella direzione azimutale di magnetizzazione è continua lungo il materiale, mentre Fig.2b e 2c mostrano l'implementazione con blocchi distinti. In Fig. 2c i blocchi sono orientati diversamente fra di loro, mentre in Fig. 2b è l'orientazione all'interno del blocco che è stata ruotata. Il primo caso implica un trattamento magnetico dell'intero anello tecnologicamente impraticabile particolarmente in un grande dispositivo magnetico. La realizzazione degli anelli di Fig.2b richiede che i blocchi siano magnetizzati, allo stesso valore della magnetizzazione residua, lungo direzioni diverse. Da un punto di vista tecnologico ciò è difficile da ottenere in quanto le lunghezze dei blocchi lungo diverse direzioni sono differenti. L'effetto principale, in ogni caso è che una distribuzione continua di direzioni di magnetizzazione viene sostituita da una distribuzione discreta. Nell'anello nel suo complesso tale discretizzazione ha l'effetto di ridurre l'uniformità di campo lungo la direzione radiale, riduzione che è tanto maggiore quanto minore è il numero di blocchi che compongono l'anello. Inoltre, i disegni in Fig. 2 sono bidimensionali e implicano una lunghezza infinita nella direzione perpendicolare al piano. I magneti usabili in MRI hanno ovviamente una lunghezza finita, ma in aggiunta, questa lunghezza deve essere la più corta possibile in modo da poter collocare al centro del FOV la parte in esame. Deve quindi essere trovato il modo di costruire il magnete in grado di ottimizzarne l'omogeneità di campo in una parte più grande possibile del magnete.

Per questi motivi, nonostante il fatto che gli anelli di Halbach rappresenterebbero un modo conveniente per costruire i magneti per piccole apparati MRI dedicati, essi non sono comunemente utilizzati in applicazioni commerciali. Inoltre la necessità di fabbricare blocchi magnetici permanenti magnetizzati lungo direzioni differenti richiede modalità di costruzione e attrezzature che sono fuori dalla portata della maggior parte dei produttori di materiali magnetici. I brevetti US4703276, US5148138, US6680663, descrivono l'utilizzo di blocchi con diverse orientazioni della direzione di magnetizzazione. I brevetti US20090128272, US20140111202 descrivono un principio simile, nel primo campo è ottenuta da quattro barre di materiale magnetizzato e la regione di buona omogeneità è una piccola frazione del volume realizzazione. Il secondo descrive un dispositivo portatile in cui le dimensioni delle barre magnetizzate sono molto piccole e il campo magnetico risultante è necessariamente bassa. Entrambi i modelli inoltre non tengono conto della lunghezza finita delle barre provocando una ulteriore riduzione della regione omogeneità.

Un tentativo di tener conto della lunghezza finita del magnete si ha nel brevetto WO 2007120057 in tale brevetto per tenere conto della lunghezza finita del magnete si propone di procedere distanziando i blocchi centrali in modo tale da annullare i coefficienti di secondo ordine dello sviluppo del campo in serie di potenze (vedi WO 2007120057, rivendicazioni 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26) il risultato di questa scelta è che la regione di uniformità ha dimensioni lineari che vanno da un terzo ad un decimo rispetto alle dimensioni lineari del magnete (vedi WO 2007120057 Figure 3-8). Un ulteriore elemento che tende a ridurre l'omogeneità di campo lungo la direzione radiale è che per ottenere la distribuzione di Halbach usando magneti uguali si è dovuto ruotare i magneti in modo tale da presentare nella direzione radiale superfici diverse tra di loro e che includono anche gli spigoli dei blocchi. Questo produce una distribuzione non uniforme del potenziale che tende a ridurre ulteriormente l'omogeneità del campo magnetico all'interno.

#### DEFINIZIONE E OGGETTO DELL'INVENZIONE

La presente invenzione individua le modalità di costruzione e di shimming di un magnete per uso clinico utilizzando anelli cilindrici di Halbach in grado di ottenere un campo omogeneo in una regione, interna al

magnete, di dimensioni lineari pari a circa il 40% delle dimensioni del magnete stesso. Il magnete è costruito utilizzando blocchi di dimensione identica fra di loro, magnetizzati tutti lungo una direzione perpendicolare ad una delle superfici laterali del cilindro. Il magnete è ottenuto utilizzando 6 anelli di Halbach ognuna composta da 16 blocchi identici come mostrato in Fig.1a e Fig.1b. I blocchi magnetizzati sono cilindri a base esadecagonale (Fig. 3) e la direzione della magnetizzazione è perpendicolare all'asse del cilindro e diretta verso il centro di una delle 16 facce laterali. Le diverse orientazioni della magnetizzazione si ottengono, in fase di costruzione, ruotando i blocchi in base alla posizione angolare in cui devono essere collocati. Un foro interno cilindrico permette di fissare i blocchi alla struttura di supporto. Nell'esempio di Fig. Fig.1a e Fig.1b il magnete è composto da sei anelli di materiale magnetico ciascuna composta da 16 blocchi. Fig. 4 mostra la sezione longitudinale del magnete. Per ridurre l'effetto della lunghezza finita il magnete è possibile agire sui diversi parametri geometrici di Fig. 4 (R1, R2, D0, D1, D2). L'ottimizzazione può essere eseguita sia utilizzando strumenti analitici che tecniche numeriche. La densità di flusso di ciascun anello, infatti, può essere scritto come:

$$B(x) = \frac{\mu}{4\pi r^2} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{3x_i(m_i + m_i^*)}{(r^2 + x_i^2)^{3/2}}$$

dove  $m_i$  sono i momenti magnetici dei singoli blocchi e  $n_i$  sono i vettori unitari che danno la posizione dei blocchi:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_i &= m \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\beta_i) \\ \cos(\beta_i) \end{bmatrix} \\ \mathbf{n}_i &= \frac{1}{(r^2 + x_i^2)^{1/2}} \begin{bmatrix} x_i \\ r * \sin(\alpha_i) \\ r * \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

in cui dà l'orientazione della magnetizzazione del blocco  $i$ -esimo e la sua posizione angolare.

E' stato dimostrato che tramite l'utilizzo di tecniche analitiche si può raggiungere una precisione dell'ordine del 5% (H. Soltner, P. Blumer, Concepts in Magnetic Resonance, Part A, Vol 36A (4) 211-222). Tuttavia la possibilità di utilizzare accurati programmi di simulazione di campo magnetico accoppiati a tecniche di ottimizzazione in cui è possibile inserire i vincoli richiesti ha ridotto l'importanza di un approccio analitico. Molti parametri del disegno proposto possono essere vincolati in modo da ottenere un disegno che rispetti i vincoli richiesti dall'utilizzo del magnete. Il primo vincolo è il foro del magnete (OPEN BORE in Fig. 4), che determina la dimensione degli oggetti che possono essere inseriti, il secondo è il FOV (7) dello stesso che di solito ha la forma di una sfera centrata nel centro geometrico magnete e definita dalla suo diametro. Altre grandezza importanti sono le distanze estremità del magnete/inizio del FOV e estremità del magnete/centro FOV (L0, L1).

Il modo in cui differenti materiali sono utilizzati per shimmare i magneti è descritta in molti articoli scientifici e brevetti. In considerazione del fatto che la maggior parte magneti hanno poli in ferro la maggior parte delle tecniche di shimming è rivolta alla sagomatura dei poli per ottimizzare l'omogeneità di campo. Anche in questo caso però, dopo la prima ottimizzazione rivolta alla superficie

del polo, il passo successivo è quello di aggiungere elementi in ferro o materiale magnetico per migliorare l'omogeneità (tali elementi saranno di seguito indicati come "elementi di shim").

La tecnica utilizzata per lo shimming finale del magnete è la stessa e consiste nelle seguenti operazioni:

1. Il campo magnetico iniziale è misurata in un dato numero di punti che definiscono i contorni del FOV desiderato (vedi Fig. 5);
2. Il campo magnetico prodotto dagli elementi di shim posti in un certo numero di posizioni che dipendono dalla geometria del magnete, viene determinato sperimentalmente o tramite simulazioni. Nel caso gli elementi di shim siano in ferro ciò che viene misurata o determinata numericamente è la variazione dovuta all'introduzione di tali elementi.
3. Attraverso tecniche matematiche di programmazione lineare si determina il numero di elementi magnetici di dimensioni date da collocare su ogni polo per ottenere un campo omogeneo.

La soluzione ottenuta da questa tecnica è un insieme di numeri presumibilmente non interi che rappresenta il numero di elementi elementari che dovrebbe essere collocato in ciascuna posizione. In considerazione del fatto che gli elementi di shimming possono essere realizzati in un numero limitato di dimensioni questo numero potrà solo essere approssimato dagli elementi di shimming di cui si dispone e quindi la correzione sarà solo approssimata. A causa di ciò diversi autori hanno proposto tecniche di approssimazione con numeri interi, che utilizzano, per i magneti di shim, un numero limitato di dimensioni. In questo caso il risultato sarà effettivamente un numero intero che rappresenta il numero (o i numeri) di magneti elementari che devono essere messi nelle diverse posizioni per correggere il campo magnetico. Tali soluzioni potrebbero dare una soluzione precisa, ma richiederebbe una conoscenza accurata della magnetizzazione residua degli elementi di shim che invece è conosciuta con una precisione dell'ordine del 4-6%. Ciò comporta un grave problema quando l'omogeneità richiesta è dell'ordine del 10-20ppm e la quantità di materiale shimming è una frazione non trascurabile del materiale magnetico totale (ad esempio 1/100 in massa). Lo shimming applicato ha infatti un errore intrinseco maggiore della correzione richiesta. Ciò richiede di effettuare cicli successivi di shimming utilizzando elementi di correzione via via più piccoli.

#### Descrizione delle Figure

Fig. 1 A) Collocazione dei blocchi magnetici nella costruzione del magnete. Come si vede gli anelli sono ruotati fra di loro per permettere l'inserimento di elementi di fissaggio. Nella figura sono evidenti due tipi di anelli di Halbach gli anelli esterni (1) e gli anelli interni (2) di raggio diverso tra di loro. B) Struttura generale degli elementi di fissaggio. Gli anelli di Halbach sono tenuti rigidamente in posizione da 3 spalliere trasversali (3) collegate tra di loro da elementi longitudinali non mostrati in figura e da anelli circolari(4). Tutti questi elementi sono in alluminio.

Fig. 2 Implementazione possibile di anelli di Halbach. A) Variazione continua della direzione della magnetizzazione all'interno di un anello omogeneo. B) Assemblaggio di un anello per mezzo di

elementi geometricamente identici ma con direzione ruotata della magnetizzazione. C) Anello realizzato con blocchi identici e magnetizzati lungo la stessa direzione. La distribuzione di Halbach è realizzata ruotando gli interi blocchi.

Fig. 3 Blocco cilindrico a base esadecagonale. Il foro centrale (6) permette il fissaggio del blocco alla struttura in alluminio. La magnetizzazione è diretta perpendicolarmente ad una delle 16 facce laterali (5).

Fig. 4 Spaccato longitudinale del magnete. Gli anelli terminali, indicati con 1 in figura, hanno un raggio minore rispetto agli anelli centrali indicati con 2. I blocchi sono attaccati rigidamente agli elementi di supporto interni (4), alla spalliera centrale e a quelle laterali (3). Il FOV (7) ha un diametro di 18cm. L0 ed L1 rappresentano rispettivamente le distanze dalla fine del magnete all'inizio del FOV e al centro del magnete. D0, D1 e D2 sono gli spessori degli elementi di supporto che determinano la posizione longitudinale degli anelli.

Fig. 5 Ai fini dello shimming il campo viene misurato sia sulla superficie del FOV del magnete che su una superficie sferica interna di raggio FOV/4. I punti di misura sono collocati all'intersezione di linee parallele (9) e linee meridiane (10) su sfere di raggio FOV/2 e FOV/4.

Fig. 6 Posizione (11) degli elementi di shim nel caso di un magnete di Halbach. Gli elementi sono collocati in modo che la loro magnetizzazione sia allineata alla direzione del campo prodotto dagli anelli di Halbach.

Fig. 7 Gli anelli di shim (12) sono collocati su barre longitudinali di alluminio (14) legate fermamente alla struttura di sostegno del magnete. All'interno dell'anello di shim viene collocato un secondo elemento di shim a forma di cilindro(13).

Fig. 8 Gli elementi di shim possono avere diverse forme geometriche come ad esempio base circolare (12) o quadrata (15) al cui interno vengono inserite la correzioni di secondo ordine.

#### **Descrizione dettagliata della costruzione a titolo dimostrativo: Costruzione del magnete**

Il magnete, il cui dimostrativo è mostrato in Fig. 1, è formato da 6 anelli di Halbach divisi in due sottogruppi, gli anelli interni (2) e i due anelli esterni (1). Ciascun anello è formato da 16 blocchi di forma cilindrica a base esadecagonale (Fig.1). La magnetizzazione dei blocchi è perpendicolare all'asse del cilindro e diretto verso il centro di una delle facce. L'orientazione della magnetizzazione degli anelli è tale da effettuare una rotazione di  $720^\circ$  nell'arco di un giro. Un magnete posto nella posizione angolare  $\alpha$  avrà quindi una orientazione della magnetizzazione pari a  $2^*\alpha$ .

Come è visibile in Fig.4 i raggi degli anelli interni sono eguali mentre gli anelli terminali sono posti ad una distanza minore in modo da compensare parzialmente l'effetto della lunghezza finita del magnete. I supporti che tengono insieme il magnete sono di alluminio. Il campo magnetico è confinato all'interno del magnete dalla disposizione della magnetizzazione e non ha bisogno di una struttura in ferro né come giogo né in forma di polo. Ciò, a parità di dimensioni e di materiale usato, permette di ottenere il massimo valore possibile del campo magnetico.

Il materiale usato per shimmare il campo magnetico ed ottenere la richiesta omogeneità è collocato nella zona interna del magnete (8) a stretto contatto termico con i blocchi principali e con la struttura

metallica di sostegno. Ciò permette di evitare fluttuazioni termiche tra i diversi componenti del magnete e quindi permette di stabilizzare il magnete nel suo insieme ad una medesima temperatura. Per lo stesso motivo l'intero magnete sia all'interno che all'esterno è schermato termicamente tramite uno strato di materiale isolante (non mostrato in figura).

Nel prototipo dimostrativo la distanza L0 tra la parte esterna del magnete e l'inizio della regione di omogeneità è pari a 13 cm e il diametro della regione di omogeneità (7) è pari a 18cm. La lunghezza totale del magnete è pari a 45 cm. Ciò rende il magnete idoneo all'utilizzo per lo studio sia per lo studio delle articolazioni periferiche (mani, piedi ginocchio ecc..), che per applicazioni in campo oftalmico in quanto rendo possibile studiare la regione oculare senza inserire le spalle del paziente all'interno del magnete, e per lo studio di piccoli animali domestici fino ad una massa di 18/20 kg.

#### **Descrizione dettagliata della costruzione a titolo dimostrativo: Shimming**

##### **Procedura di shimming messa a punto**

La procedura di shimming da noi messa a punto consiste nel seguente ciclo:

- A. Il campo magnetico viene misurato in una serie di punti che individuano la regione fisica in cui è richiesta omogeneità di campo. Tale operazione può essere fatta tramite misuratori di campo che utilizzano sonde NMR e che hanno una precisione di  $1/10^8$  o tramite sonde Hall. Attualmente le sonde Hall calibrate hanno una precisione di  $1/10^6$  e sono quindi adeguate alla presente applicazione. Un ulteriore vantaggio è che mentre la testa di misura della sonda NMR ha dimensioni lineari dell'ordine di 0.6cm i sensori usati nelle sonde Hall hanno dimensioni lineari dell'ordine della frazione di mm. La determinazione della posizione della sonda è quindi più accurata. La testa di misura della sonda Hall è portato in posizione con precisione micrometrica tramite un posizionatore XYZ motorizzato e controllato dal computer. Il numero dei punti sui quali viene misurato il campo è critica e il loro numero deve essere adeguato. Nel caso specifico i punti sulla superficie sferica che delimita il FOV sono presi in modo equidistante lungo 16 paralleli (9) e 16 meridiani (10) su due sfere concentriche una di raggio pari al raggio del FOV e una pari a metà di questo. A questi valori viene aggiunto il valore del campo al centro del FOV per un totale di 513 punti.
- B. Per conoscere l'effetto dell'inserzione dei singoli elementi di shim sui punti prima determinati si dovrebbe inserire gli elementi di shim nella posizioni ad essi destinate e misurare l'effetto nei punti di misura visti in precedenza. Questo però diventerebbe un procedimento troppo lungo e virtualmente impraticabile per un numero di elemento di shim dell'ordine di qualche centinaia. Questo passaggio viene quindi sostituito dalla determinazione dell'effetto degli shims tramite programmi di simulazione del campo magnetico. La variazione di campo magnetico prodotta dagli elementi di shim primari (anelli cilindrici o parallelepipedici) di magnetizzazione pari al massimo di quella utilizzata è calcolata per ciascuna delle posizioni spaziali in cui verranno collocati gli elementi di shim. Gli elementi di shim presi in considerazione sono anelli cilindrici (12) o parallelepipedici con un foro centrale. In entrambi i

casi i fori centrali sono utilizzati per inserire un secondo elemento di shim (shim secondari) (13) come mostrato in Fig.7.

- C. A questo punti tramite tecniche di programmazione lineare effettuate utilizzando funzioni specifiche presenti nei CAD di calcolo matematico (Mathematica, MATLAB, MATCAD ecc..) tipo "LinearProgramming" viene calcolato un vettore  $M(i)$  che fornisce la magnetizzazione che deve essere applicata all'elemento di shim  $i$ -esimo per rendere omogeneo il campo magnetico.
- D. Tramite un apparato magnetizzatore/condizionatore si portano i valori delle magnetizzazioni degli elementi di shim a quelli ottenuti in C. Dato che gli apparati usati per condizionare la magnetizzazione hanno una precisione di circa 1% i valori delle magnetizzazioni ottenute differiscono da quelle desiderate al massimo per un valore di circa l'1%.
- E. Si mettono in posizione gli elementi di shim e si misura nuovamente il campo magnetico prodotto dall'insieme magnete + elementi di shim;
- F. Si determina la variazione introdotta dagli elementi di shim secondari (13) inseriti all'interno degli shim primari (12)(15);
- G. Tramite tecniche di ottimizzazione lineare si determinano i valori delle magnetizzazioni richiesti dai singoli elementi di shim secondari per ottenere l'uniformità di campo desiderata;
- H. Si ripete la procedura a partire da punto D questa volta sugli shim secondari; anche questa volta l'accuratezza che si raggiunge è dell'ordine dell'uno per cento. Dato però che si ha a che fare con elementi molto più piccoli l'effetto cumulativo di queste due operazione corrisponde ad avere una accuratezza sugli elementi di shim compresa tra 0.1% e 0.01% che è molto meglio di quello che si può ottenere con qualsiasi tecnica di condizionamento della magnetizzazione.
- I. A questo punto gli elementi di shim secondari condizionati vengono messi in posizione all'interno di quelli primari.

In questo modo si riesce ad ottenere una uniformità di campo pari a circa 20ppm in una regione di spazio di dimensioni lineari pari al 40% dell'altezza del magnete. Questo risultato è sostanzialmente migliore di quello che si ottiene in altri tipi di magnete con tecniche di shim tradizionali.

#### Rivendicazioni

1. Un apparato per la generazione di un campo magnetico uniforme per applicazioni in MRI in grado di generare un campo magnetico uniforme in una porzione del magnete di dimensioni lineari pari a circa il 40% delle dimensioni del magnete.
2. Un apparato composto di 6 anelli di Halbach disposti longitudinalmente lungo un asse individuato come asse Y simmetricamente rispetto al centro di tale asse.
3. Un apparato come da rivendicazioni 1 e 2 in cui ciascun anello di Halbach è composto da 16 blocchi cilindrici a base esadecagonale uguali fra di loro nei quali la magnetizzazione residua è perpendicolare all'asse del cilindro e perpendicolare ad una delle facce laterali.

4. Un apparato come da rivendicazioni da 1 a 3 in cui i blocchi che compongono ciascun anello abbiano almeno una faccia tangente alla circonferenza centrata sull'asse del cilindro, giacente sul piano XZ e di raggio pari alla distanza del blocco dall'asse del magnete.
5. Un apparato come da rivendicazioni 1-4 in cui i 6 anelli siano divisi in due sottogruppi formati rispettivamente da 4 anelli interni e da 2 anelli esterni, caratterizzati rispettivamente dalla diversa distanza dall'asse del magnete della faccia tangente alla circonferenza di cui alla rivendicazione 4. La distanza del sottogruppo degli anelli interni è chiamata  $r_{int}$  quella degli anelli esterni è chiamata  $r_{ext}$ .
6. Un apparato come da rivendicazioni 1-5 in cui  $r_{int} > r_{ext}$  e in cui  $r_{int}$  rappresenta un vincolo per il processo di ottimizzazione mentre  $r_{ext}$  può essere variato per migliorare l'uniformità di campo.
7. Un apparato come da rivendicazioni 1-6 in cui gli elementi di shim sono formati da due distinti elementi i primi indicati come shim primari di forma cilindrica o a forma di parallelepipedo con un foro al centro, i secondi inseribili all'interno di tali fori.
8. Un apparato in cui gli elementi di shim sono portati, con un processo di condizionamento, al valore di magnetizzazione ottenuto tramite tecniche di ottimizzazione.
9. Un apparato in cui tramite la tecnica di shim descritta è possibile ottenere una omogeneità di campo di circa 20ppm in una regione di dimensioni lineari pari a circa il 40% dell'altezza del magnete.

## RIVENDICAZIONI

1. Apparato per diagnostica tramite risonanza magnetica configurato per generare un campo magnetico uniforme in un campo di vista (2), in cui l'apparato ha un asse longitudinale principale e comprende due arrangiamenti esterni (1) di magneti ad anello di Halbach ed una pluralità di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach solidalmente accoppiati ad una struttura di supporto formata da spalliere (3) ed anelli (4), gli arrangiamenti interni (1) ed esterni (2) essendo posizionati ad altezze differenti ed equispaziate tra loro lungo l'asse longitudinale principale dell'apparato in modo che i due arrangiamenti esterni (1) sono in due posizioni di estremità dell'apparato, i magneti degli arrangiamenti esterni (1) e degli arrangiamenti interni (2) essendo identici tra loro ed avendo una forma a prisma retto con base a poligono regolare avente N lati, dove N è preferenzialmente eguale al numero P di magneti dell'anello, per cui il prisma retto ha un asse longitudinale ed N facce laterali parallele a tale asse longitudinale, in cui ogni magnete genera un campo magnetico diretto ortogonalmente al centro di una delle sue N facce laterali, ognuno degli arrangiamenti esterni (1) e degli arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach comprende un numero  $P=N$  di elementi disposti in modo che i loro assi longitudinali sono posizionati su una circonferenza centrata sull'asse longitudinale principale dell'apparato ognuno ad una posizione angolare  $\alpha$  e gli assi longitudinali di due magneti adiacenti hanno una distanza angolare mutua pari a  $360^\circ/N$  ed in modo che i campi magnetici di due magneti adiacenti sono orientati secondo direzioni che formano tra loro un angolo pari a  $720^\circ/N$ , in cui gli assi longitudinali dei magneti di ogni arrangiamento esterno (1) sono posizionati su una circonferenza avente raggio  $r_{ext}$  e gli assi longitudinali dei magneti di ogni arrangiamento interno (2) sono posizionati su una circonferenza avente un raggio  $r_{int}$ , dove il raggio  $r_{int}$  è maggiore del raggio  $r_{ext}$  (i.e.  $r_{int} > r_{ext}$ ), in cui l'asse longitudinale di ogni magnete di un arrangiamento interno (2) è posizionato ad una posizione angolare  $\alpha$  equidistante tra le posizioni angolari dei due magneti più vicini di ognuno dei due arrangiamenti adiacenti a quello cui appartiene il magnete considerato, per

Commento (AS1):

Commento (AS2):

cui il campo di vista (7) ha forma di una sfera centrata nel centro geometrico della pluralità degli arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach, almeno uno dei due arrangiamenti esterni (1) di magneti ad anello di Halbach essendo provvisto di una apertura configurata per consentire l'accesso dall'esterno al campo di vista (10).

2. Apparato secondo la rivendicazione 1, in cui il numero N di facce laterali di ogni magnete, è pari al numero di magneti di ognuno degli arrangiamenti esterni (1) e degli arrangiamenti interni (2), in modo tale che la magnetizzazione di ciascun blocco sia sempre diretta perpendicolamente ad una delle N facce laterali dei blocchi.

3. Apparato secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui il numero M di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach è un numero pari, i.e.  $M = 2 \cdot I$ , dove con I si indica un numero intero, in cui il numero M di arrangiamenti interni ed esterni ad anello di Halbach è optionalmente pari a 6, i.e.  $M = 6$ .

4. Apparato secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, in cui la struttura (3) e (4) di supporto è realizzata in alluminio.

5. Apparato secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, in cui i due arrangiamenti esterni (1) di magneti ad anello di Halbach, la pluralità di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach e la struttura (3) di supporto sono schermati termicamente mediante almeno uno strato di materiale termicamente isolante.

6. Apparato secondo una qualsiasi delle precedenti rivendicazioni, comprendente altresì una pluralità di elementi primari di shim, configurati per essere magnetizzati, solidalmente accoppiati alla struttura (3) e (4) di supporto in corrispondenza di una zona interna della pluralità di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach, in cui la zona interna è rivolta verso il campo di vista (7), ogni elemento primario di shim (12) o (15) essendo provvisto di almeno una sede di alloggiamento configurata per alloggiare un corrispondente elemento secondario di shim (13) configurato per essere magnetizzato, in cui optionalmente ogni elemento primario di shim ha una forma cilindrica (12) od una forma a pa-

parallelepipedo (15) e comprende una sede di alloggiamento consistente in un foro centrale configurato per alloggiare un corrispondente elemento secondario di shim avente forma cilindrica (13).

**7. Metodo di omogeneizzazione del campo magnetico generato nel campo di vista (7) dall'apparato per diagnostica tramite risonanza magnetica secondo la rivendicazione 6, comprendente le seguenti fasi:**

- A. misurare il campo magnetico generato dai due arrangiamenti esterni (1) di magneti ad anello di Halbach e dalla pluralità di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach in una pluralità di punti (11) del campo di vista (7) individuati dall'intersezione di curve parallele (9) e di curve meridiane(10);
- B. calcolare una magnetizzazione da applicare ad ogni elemento primario di shim in modo da rendere il campo magnetico nel campo di vista (7) omogeneo;
- C. magnetizzare ogni elemento primario di shim (12) o (15) in conformità al calcolo della fase B;
- D. posizionare nell'apparato la pluralità di elementi primari di shim magnetizzati nella fase C;
- E. misurare il campo magnetico generato dai due arrangiamenti esterni (1) di magneti ad anello di Halbach e dalla pluralità di arrangiamenti interni (2) di magneti ad anello di Halbach, regolato dalla pluralità di elementi primari di shim (12) o (15) magnetizzati, in una pluralità di punti del campo di vista (7);
- F. calcolare una magnetizzazione da applicare ad ogni elemento secondario di shim (13) in modo da rendere il campo magnetico nel campo di vista (7) omogeneo;
- G. magnetizzare ogni elemento secondario di shim (13) in conformità al calcolo della fase F;
- H. posizionare in detta almeno una sede di alloggiamento di ogni elemento primario di shim (12) o (15) il corrispondente elemento secondario di

**Commento (AS3):**

**Commento (AS4):**

shim (13) magnetizzato nella fase G.

8. Metodo secondo la rivendicazione 7, in cui il campo di vista (7) è sferico e detta pluralità di punti del campo di vista (7) in cui viene misurato il campo magnetico nelle fasi A ed E comprende punti equidistanti su una prima superficie sferica di raggio pari al raggio del campo di vista (7), punti equidistanti su una seconda superficie sferica di raggio pari alla metà del raggio del campo di vista (7) ed il centro del campo di vista (7).

9. Metodo secondo la rivendicazione 8, in cui i punti equidistanti sulla prima superficie sferica e sulla seconda superficie sferica sono posizionati lungo 16 paralleli e lungo 16 meridiani.

10. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 7 a 10, in cui le fasi A ed E sono effettuate tramite sonde di misura selezionate tra sonde NMR e sonde Hall, optionalmente posizionate con precisione micrometrica tramite un posizionatore motorizzato.

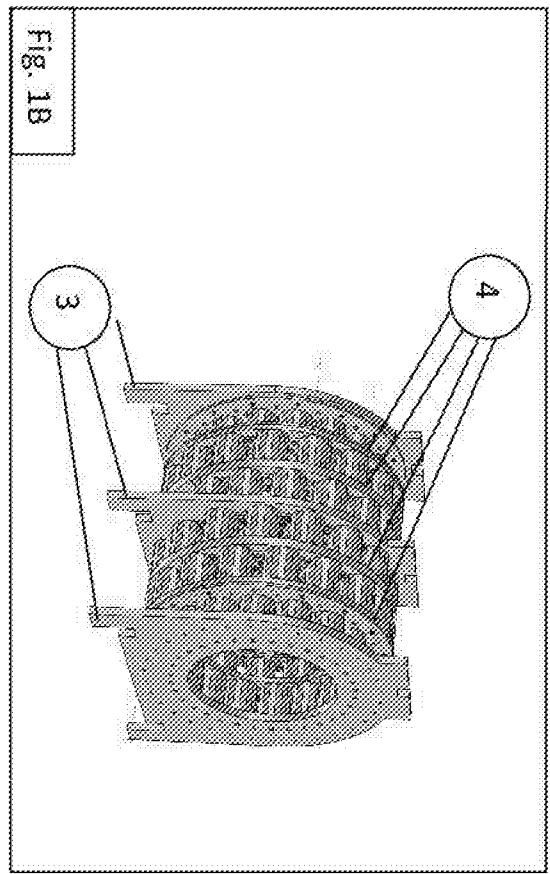
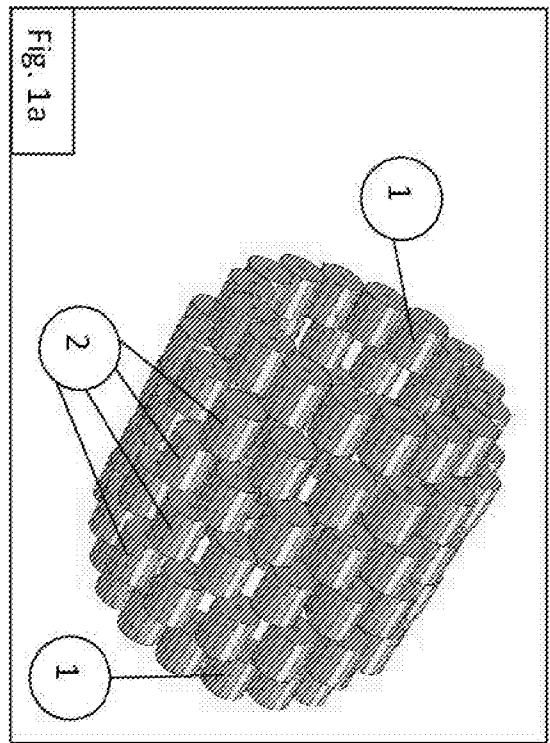
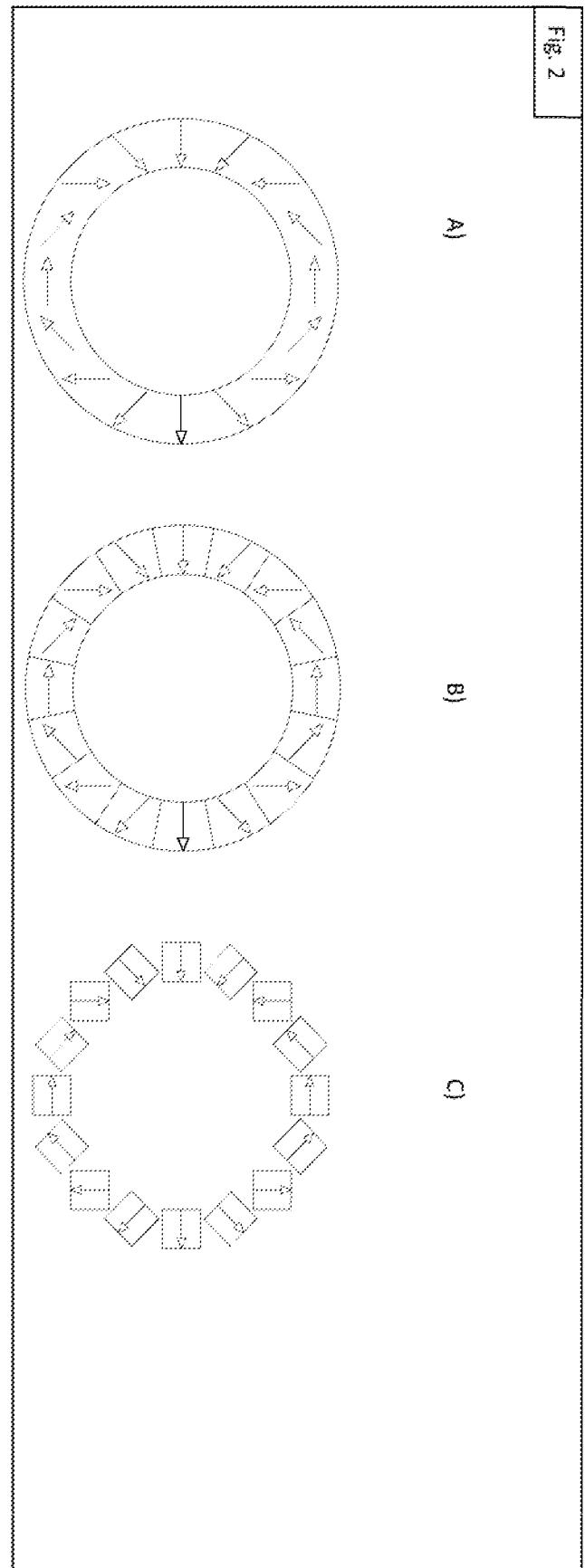
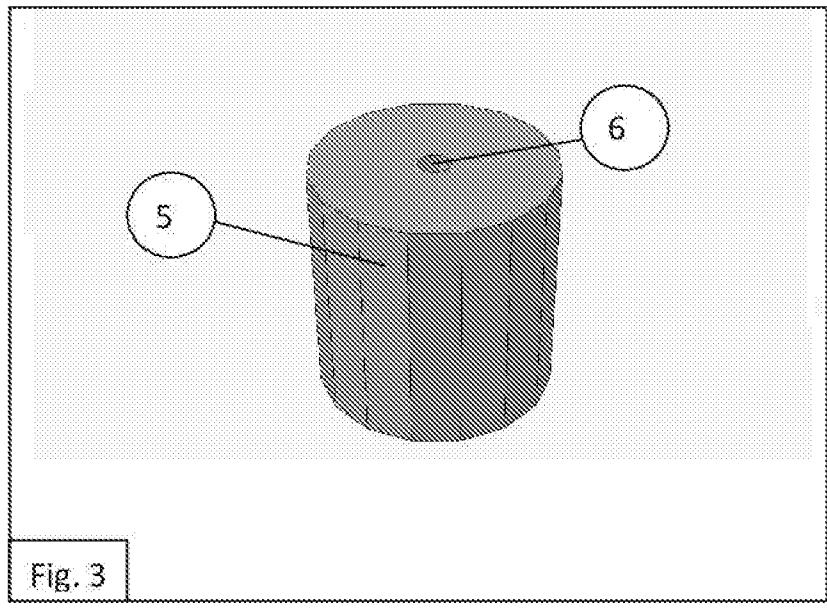


Fig. 2





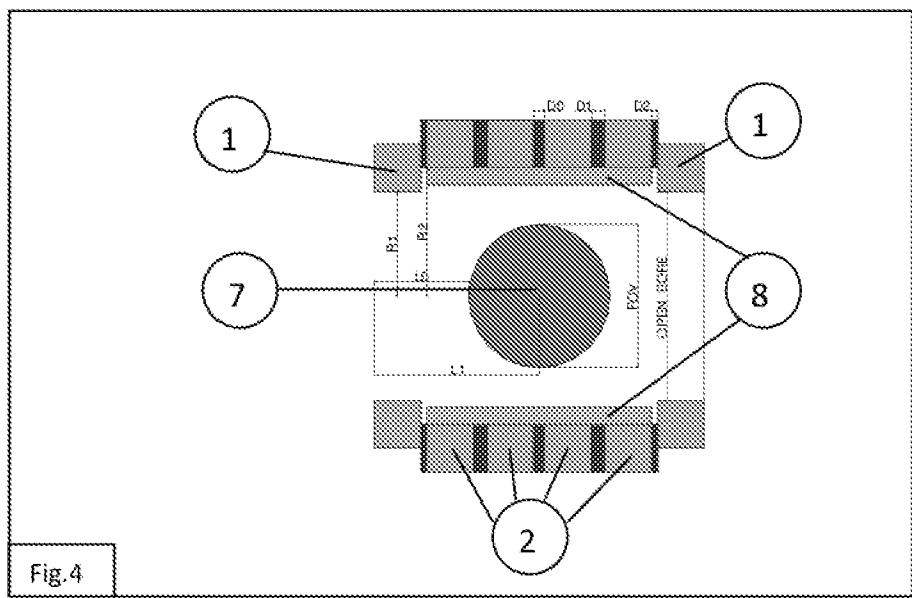


Fig. 4

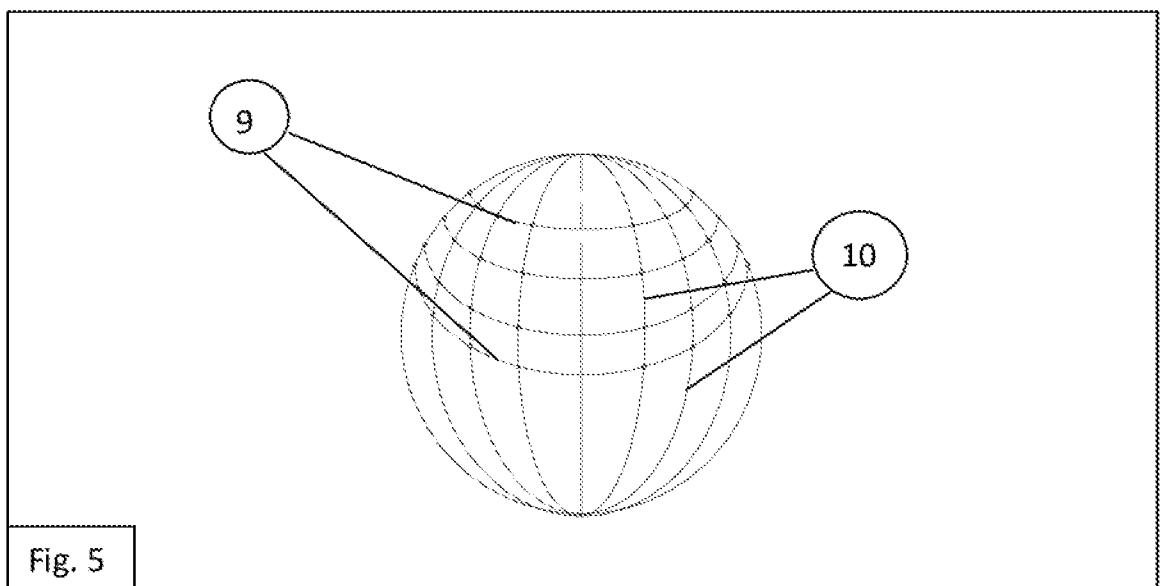
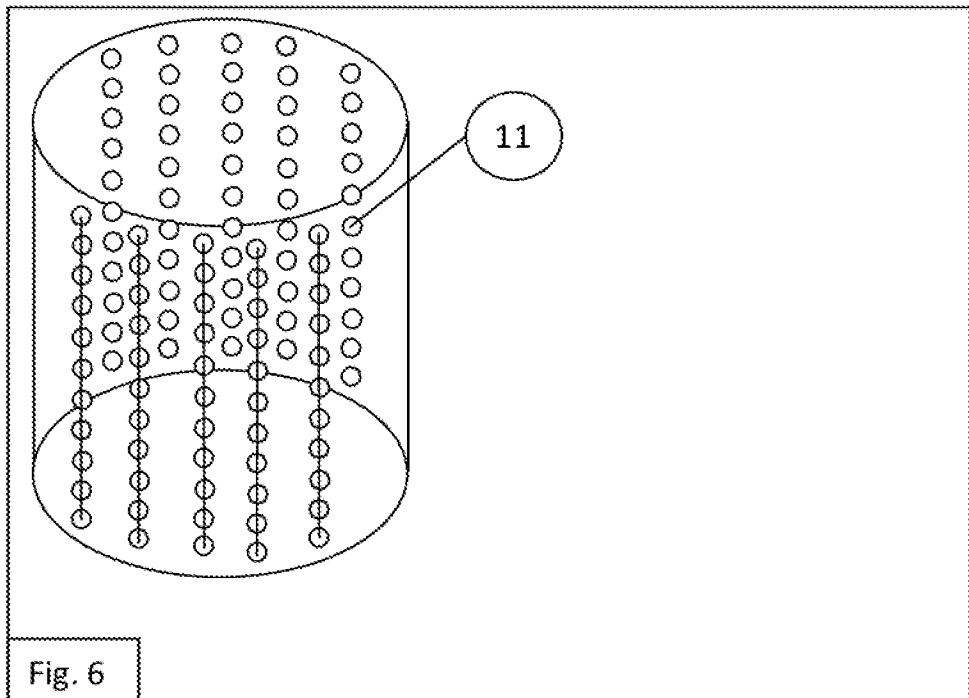


Fig. 5



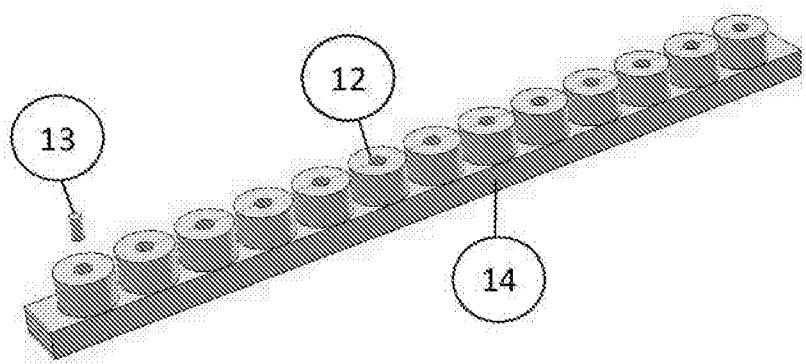


Fig. 7

