

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

TESE DE MESTRADO

GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO DIRECIONAL POR
COMBINAÇÃO DE DIPOLOS MAGNÉTICOS

JOÃO AUGUSTO PEREIRA NETO



BELEM

2001

PEREIRA NETO, João Augusto. Geração de campo magnético direcional por combinação de dipolos magnéticos. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 2001. 51p.

Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-graduação em Geofísica, CG, UFPA, 2001.

1.INDUÇÃO 2.FOCALIZAÇÃO 3.DIPOLOS MAGNÉTICOS

4.CAMPO MAGNÉTICO 5.ARRANJOS DE BOBINAS

I.VERMA, Om Prakash, Orientador II.Título

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. Om Prakash Verma pela dedicação, responsabilidade e principalmente pelo compromisso que assumiu comigo.

Agradeço ao Jessé, Protázio, Vizeu Paulo de Carvalho e Menezes.

Além disso, agradeço ao José Geraldo das Virgens Alves pelas conversas e sugestões.

Além do mais, à Universidade Federal do Pará - Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

Agradeço ao Marcos Welby pela ajuda prestada.

Finalmente agradeço a Deus que sempre está próximo nos momentos difíceis.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1- INTRODUÇÃO	3
1.1- OBJETIVO.....	5
1.2- ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	7
2- CAMPO MAGNÉTICOS DE DIPOLOS	8
2.1- CAMPO MAGNÉTICO DE DIPOLOS COAXIAIS AO EIXO DO POÇO.....	10
2.1.1- Um dipolo magnético coaxial	10
2.1.2- Dois dipolos magnéticos coaxiais e antioaxiais	12
2.2- CAMPO MAGNÉTICO DE DIPOLOS TRANSVERSAIS AO EIXO DO POÇO.....	25
2.2.1- Um dipolo magnético transversal ao eixo do poço	25
2.2.2 – Dois dipolos magnéticos transversais paralelos e antiparalelos	30
3- ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
3.1 FEIXE DO CAMPO DE DIPOLOS ANTICOAXIAIS.....	39
3.2 FEIXE DO CAMPO DE DIPOLOS PARALELOS TRANSVERSAIS.....	39
4- CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE	51

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Arranjo de dipolos magnéticos transmissores estudados: (I) Arranjos coaxiais ao eixo do poço e, (II) Arranjos transversais ao eixo do poço.....	9
Figura 2 – Diagrama esquemático de um dipolo coaxial ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.....	11
Figura 3 – Campo magnético e linhas de fluxo de um dipolo coaxial.....	13
Figura 4 – Componente radial do campo magnético de um dipolo magnético coaxial ao eixo do poço	14
Figura 5 – Componente vertical do campo magnético de um dipolo magnético transmissor coaxial ao eixo do poço.....	15
Figura 6 – Diagrama esquemático de um par de dipolos magnéticos coaxiais ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.....	16
Figura 7 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos coaxiais.....	18
Figura 8 - Componente radial de um par de dipolos coaxiais.....	20
Figura 9 - Componente vertical de um par de dipolos coaxiais.....	21
Figura 10 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos anticoaxiais.....	22
Figura 11 - Componente radial de um par de dipolos anticoaxiais.....	23
Figura 12 - Componente vertical de um par de dipolos anticoaxiais.	24
Figura 13 – Diagrama esquemático de um dipolo transversal ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.....	26
Figura 14 – Campo magnético e linhas de fluxo de um dipolo transversal.....	27

Figura 15 – Componente radial do campo magnético de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço.....	28
Figura 16 – Componente vertical do campo magnético de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço	29
Figura 17 – Diagrama esquemático de um par de dipolos magnéticos transversais paralelos ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.....	31
Figura 18 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos.....	32
Figura 19 - Componente radial de um par de dipolos transversais paralelos.....	33
Figura 20 - Componente vertical de um par de dipolos transversais paralelos.....	34
Figura 21 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais antiparalelos.....	36
Figura 22 - Componente radial de um par de dipolos transversais antiparalelos.....	37
Figura 23 - Componente vertical de um par de dipolos transversais antiparalelos.....	38
Figura 24 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais.....	40
Figura 25 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais.....	41
Figura 26 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais.....	42
Figura 27 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais.....	43
Figura 28 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos.....	44
Figura 29 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos.....	45
Figura 30 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos.....	46
Figura 31 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos.....	47
Figura 32 – Diagrama esquemático de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço no plano yz.....	53

RESUMO

A ferramenta de indução EM é utilizada na perfilagem de poço de prospecção com a finalidade de determinar a concentração de óleo na formação geológica. Formações com camadas que são relativamente de grande espessura já foram bem tratadas, entretanto zonas com camadas finas intercaladas com argila e areia com bom potencial de hidrocarbonetos precisam ser investigadas. Por isso, é necessário melhorar a resolução da sonda de indução para delimitar camadas finas com maior precisão. Teoricamente, se uma sonda de indução apresentar o feixe do campo magnético direcionado transversalmente ao eixo do poço, ela poderá ter um bom potencial para melhorar a resolução vertical das sondagens.

Neste trabalho estudamos a geração do campo magnético direcional na forma de um feixe fino através de diferentes combinações de duas bobinas transmissoras (dipolos magnéticos) para determinar um arranjo que apresente uma melhor focalização na perfilagem de indução.

Duas configurações com dois transmissores EM apresentam uma região em que só há contribuição da componente radial para a indução magnética: dois dipolos magnéticos paralelos transversais ao eixo do poço e dois dipolos magnéticos antiaxiais ao eixo do poço. Para estas duas configurações foram analisados os possíveis espaçamentos entre os dois dipolos magnéticos transmissores, verificando-se que quanto mais próximos os dois dipolos magnéticos transmissores mais agrupadas ficam as linhas de fluxo magnético numa direção transversal ao eixo do poço. Conseqüentemente é gerado um feixe fino e direcional, concentrando energia em uma porção de volume estreita a partir dos transmissores, tendo um bom potencial para melhorar a resolução vertical da sonda de indução EM de poço.

ABSTRACT

The induction tool is used in order to determine the concentration of hydrocarbons in the formation. Thick layers reservoirs are easy to be investigated but there is a need to improve the resolution of the existing tools to investigate potentially thin alternating clay-sand sequences. This could be achieved by focusing a directed beam of the magnetic field in the formation. The type of field can be created by combining the magnetic dipoles in different configurations.

In this work we studied the generation of the directional and focused magnetic field with different combinations of two transmitters loops (two magnetic dipoles) so that the tool gets a better penetration depth than the current inductive tools being capable to delineate zones of fine layers.

1- INTRODUÇÃO

Os Métodos Eletromagnéticos (EM) são dos mais utilizados na prospecção geofísica a rasas e médias profundidades, com uma larga faixa de aplicações:

- exploração Mineral;
- investigação de Recursos Geotérmicos;
- mapeamento Geológico e Localização de Falhas;
- prospecção de Água Subterrânea;
- detecção de Cavidades Naturais e Artificiais;
- mapeamento de Zonas de Contaminação;

A escolha da técnica de levantamento EM é determinada pelo objetivo da investigação, pois há um método mais apropriado para cada aplicação. Os métodos EM podem ser classificados em sistemas no domínio da frequência (FEM) e no domínio do tempo (TEM). Nesse estudo, estamos interessados no método EM no domínio da frequência, por ser o método EM mais aplicado para investigar profundidades rasas. Este método utiliza duas bobinas pequenas, uma transmissora que gera um campo primário e outra receptora e estão a uma distância constante. Este arranjo é movimentado em intervalos discretos ao longo do percurso. Tipicamente há dois tipos de arranjos mais usados para este método na superfície, que são o de bobinas horizontais coplanares (dipolos magnéticos verticais), e o de bobinas verticais coaxiais (dipolos magnéticos horizontais). Ambos os arranjos utilizam duas bobinas separadas por uma distância fixa, sendo que uma bobina serve como transmissor que gera um campo primário e a outra bobina é o receptor. O ponto de referência para as medidas é usualmente a posição central entre as bobinas. Tipicamente, o

campo secundário gerado por um alvo captado pela bobina receptora é medido na forma de amplitude e fase ou em componentes em quadratura e em fase em relação ao campo primário.

O método no domínio da frequência é o método EM mais aplicado para investigar profundidades rasas, devido a relativa facilidade de estender as medidas para frequências arbitrárias altas.

Na prospecção de água subterrânea os métodos EM no domínio da frequência são geralmente usados para determinação de interfaces plana paralelas através de sondagem vertical e são empregadas também através de caminhamento (perfis) na localização de contatos laterais e as zonas de fraturas nas rochas sólidas que podem conter poucos, mas úteis reservatórios de água potável.

Na Arqueologia os métodos EM têm sido utilizados para identificar anomalias de significativo potencial arqueológico abaixo da superfície. Por exemplo, Frohlich & Lancaster (1986) usaram o aparato indutivo *Geonics EM-31* que mede a condutividade sem contato com o terreno e conduziram escavações de antigos cemitérios na Jordânia e na Arábia Saudita, investigando a resposta do equipamento considerando mudanças nas condições climáticas e do meio ambiente. Assim, este equipamento utilizado num contexto arqueológico pode identificar variações de condutividade devido a cavidades, como as que existem nas câmaras funerárias. Um outro exemplo de utilização de método EM na arqueologia é o Ground Penetration Radar (GPR) que tem sido usado em muitos sítios arqueológicos para identificar possíveis áreas potenciais para escavação.

Para contaminações de subsolo o mapeamento EM indutivo fornece um método rápido de levantamento de possíveis locais com contaminantes pesados. Entretanto, a faixa de profundidade pode reduzir para menos de 1 m se o agente contaminante for condutivo. Um exemplo é quando há a presença de fluidos condutivos nos poros da rocha ou argila.

Na Engenharia os métodos EM não só são usados para mapear o terreno para colocação de estacas na construção de prédios mas para diferenciar água congelada de não congelada por ser de significativa importância em áreas afetadas por extensos permafrosts pois sua localização é vital quando do planejamento de extensos oleodutos. Um exemplo de aplicação que tem sido largamente utilizado, particularmente na engenharia é o GPR, já que sistemas EM comumente usados (com frequências abaixo de 60 KHz) são incapazes de investigar detalhes a uma profundidade maior que 5m. O GPR além de investigar essas profundidades é mais efetivo em terrenos relativamente resistivos. Por exemplo, uma aplicação do GPR na engenharia é na análise da espessura da pavimentação asfáltica.

Uma outra aplicação muito usada do método EM no domínio da frequência é em sondas indutivas em poços. A perfilagem indutiva de poço é utilizada na indústria de hidrocarbonetos e na detecção de corpos condutivos mais afastados do eixo do poço. O princípio de operação é o mesmo para medidores de condutividade elétrica do terreno.

Como foi visto acima, o método de dipolo EM está sendo amplamente empregado para muitos propósitos tais como estudos de: água subterrânea, meio ambiente, investigações na engenharia, arqueologia e perfilagem de poço. Em muitos destes casos os contrastes na condutividade são muito menores que aqueles encontrados na prospecção mineral. Portanto para estas aplicações deve ser utilizado um equipamento de alta resolução na medida da condutividade elétrica do meio.

A ferramenta convencional de indução de poço que emprega bobinas na disposição coaxial não tem boa resolução vertical para camadas finas, porém esta característica é uma deficiência ferramental. Montenegro (1991) observou que o efeito de camadas adjacentes (shoulder bed effect) é acentuado nos perfis obtidos com arranjo coaxial.

O campo gerado por uma bobina transmissora é espalhado por todo o volume em volta do transmissor imerso no poço, sem haver uma concentração de linhas de fluxo do campo magnético em uma porção de volume estreita a partir do transmissor para penetrar a uma grande distância. Tipicamente este espalhamento do campo prejudica as resoluções vertical e radial.

Na perfilagem de indução de poço é de primordial importância a maior profundidade de investigação através da maior penetração da radiação EM. Em um meio isotrópico a profundidade de penetração é determinada pela frequência e condutividade do meio o qual a radiação EM atravessará.

Uma alternativa para obter maior profundidade de penetração é através de maior espaçamento entre bobinas transmissora e receptora, contudo haverá um comprometimento da resolução vertical.

Se a separação entre as bobinas for diminuída maior será a resolução vertical e em contraste teremos a detecção de baixa profundidade, isto é, restrita às proximidades do eixo do poço e da zona invadida, que não é, necessariamente o objeto da investigação.

Para investigação profunda e ao mesmo tempo de melhor resolução na perfilagem de indução é necessário ter maior espaçamento entre T-R e minimizar influências indesejadas, tais como: influências das camadas adjacentes do poço, das formações próximas e da zona invadida (Schlumberger, 1989). Assim, bobinas auxiliares são utilizadas nas ferramentas atuais de indução para diminuir estes efeitos. Deste modo, sondas multibobinas ou focalizadas têm a vantagem de melhorar a resolução vertical com a supressão da resposta de camadas adjacentes e outros efeitos indesejados.

A sonda de indução 6FF40 além de ser construída com duas bobinas (transmissora e receptora), também incorpora mais quatro bobinas para eliminar efeitos do poço, de camadas adjacentes e para minimizar efeitos de invasão. No entanto esta sonda é deficiente com relação a

resolução vertical, principalmente quando temos camadas finas, isto é, as camadas consideradas são de menor espessura que o espaçamento entre a bobina transmissora e a receptora, ou quando o contraste de condutividade entre camadas adjacentes for pequeno. Já a sonda de indução *Phasor* utiliza um arranjo duplo de indução para gravar dados em três profundidades de investigação, fazendo uma medida de alta qualidade dos sinais em quadratura. Isto leva a esta sonda ter vantagens sobre a ferramenta convencional de indução: melhor resolução vertical, aumento da profundidade de investigação em formações condutivas e correções mais eficientes em grandes diâmetros de invasão.

Na tentativa de diminuir as limitações da sonda de indução de poço, Montenegro (1991), Carvalho (1993) verificaram que o arranjo coplanar (dipolos transversais ao eixo do poço) possui melhor resolução vertical comparado com o arranjo coaxial (dipolos coaxiais ao eixo de poço). Isto ocorre porque o campo magnético do dipolo transversal é concentrado perpendicularmente ao eixo do poço. O rastreamento desse feixe de campo horizontalmente focalizado facilita uma maior resolução vertical nos perfis do poço. Então, o emprego de um estreito e longo feixe de campo magnético vai satisfazer as exigências da alta resolução vertical e maior profundidade de investigação para uma sonda de indução. Entretanto, Souza (1992) e Carvalho (1993) concluíram que o posicionamento do arranjo coplanar deve ser realizado com mais de uma posição angular para garantir o rastreamento sobre os 360° em torno do eixo do poço.

Um estudo com tratamento numérico realizado por Hagiwara (1985) obteve o dobro de profundidade de penetração comparado com a ferramenta convencional a partir de combinações de campos magnéticos de duas bobinas transmissoras coaxiais com alta frequência.

1.1- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a geração de campo magnético no espaço homogêneo na forma de um feixe fino e direcional através de diferentes combinações de duas bobinas transmissoras (dipolos magnéticos) com diferentes espaçamentos entre os dipolos, para determinar um arranjo ótimo de bobinas que apresenta uma melhor focalização na perfilagem de indução.

1.2- ORGANIZAÇÃO DA TESE

No CAPÍTULO 1 são apresentadas aplicações e limitações dos métodos atuais, o objetivo e a organização.

No CAPÍTULO 2 temos a apresentação e discussão de campos magnéticos e suas componentes em coordenadas cilíndricas. São tratadas: (I) um dipolo magnético transmissor coaxial ao eixo do poço, (II) um par de dipolos magnéticos coaxiais e antioaxiais (III) um dipolo magnético transmissor transversal ao eixo do poço, (IV) um par de dipolos magnéticos transversais ao eixo do poço paralelos e antiparalelos.

No CAPÍTULO 3 demonstramos a análise dos resultados do campo magnético das configurações de transmissores.

No CAPÍTULO 4 concluímos os estudos realizados nesta tese e fazemos sugestões para desenvolvimentos futuros.

2- CAMPO MAGNÉTICO DE DIPOLOS.

O transmissor da sonda convencional de indução de poço é uma antena ou pequena bobina que gera um campo magnético. O campo magnético de uma pequena bobina na origem, isto é, no ponto P (x=0, y=0, z=0) pode ser descrito em termos da indução magnética \vec{B} , tendo uma solução geral conhecida como Lei de Biot-Savart

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_o}{4\pi} \int_v \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{r^3} dv, \quad (1)$$

onde $\vec{J}(r)$ é a densidade de corrente, μ_o é a permeabilidade magnética e $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Todos os campos de indução magnética podem ser descritos em termos de uma distribuição de corrente, isto é, sempre tem a forma da equação (1), com alguma densidade de corrente. Disto resulta que não há polos magnéticos isolados e que

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (2)$$

Uma aplicação desta lei está no cálculo do campo magnético primário no espaço livre de uma fonte de corrente conhecida.

As fontes de corrente envolvidas são pequenas bobinas transmissoras representadas por dipolos magnéticos. Os campos magnéticos destes dipolos são calculados e apresentados na forma de mapas de campo magnético total e de suas componentes paralela (vertical) e normal (radial) ao eixo do poço num meio homogêneo isotrópico com frequência zero, assim não temos atenuação do campo devido ao meio. A unidade de campo magnético é o Tesla (T). Duas classes de configurações são tratadas (Figura 1):

I. Dipolos magnéticos coaxiais ao eixo do poço (bobinas coaxiais):

- Um dipolo magnético (Figura 1a)
- Dois dipolos magnéticos coaxiais (Figura 1b)

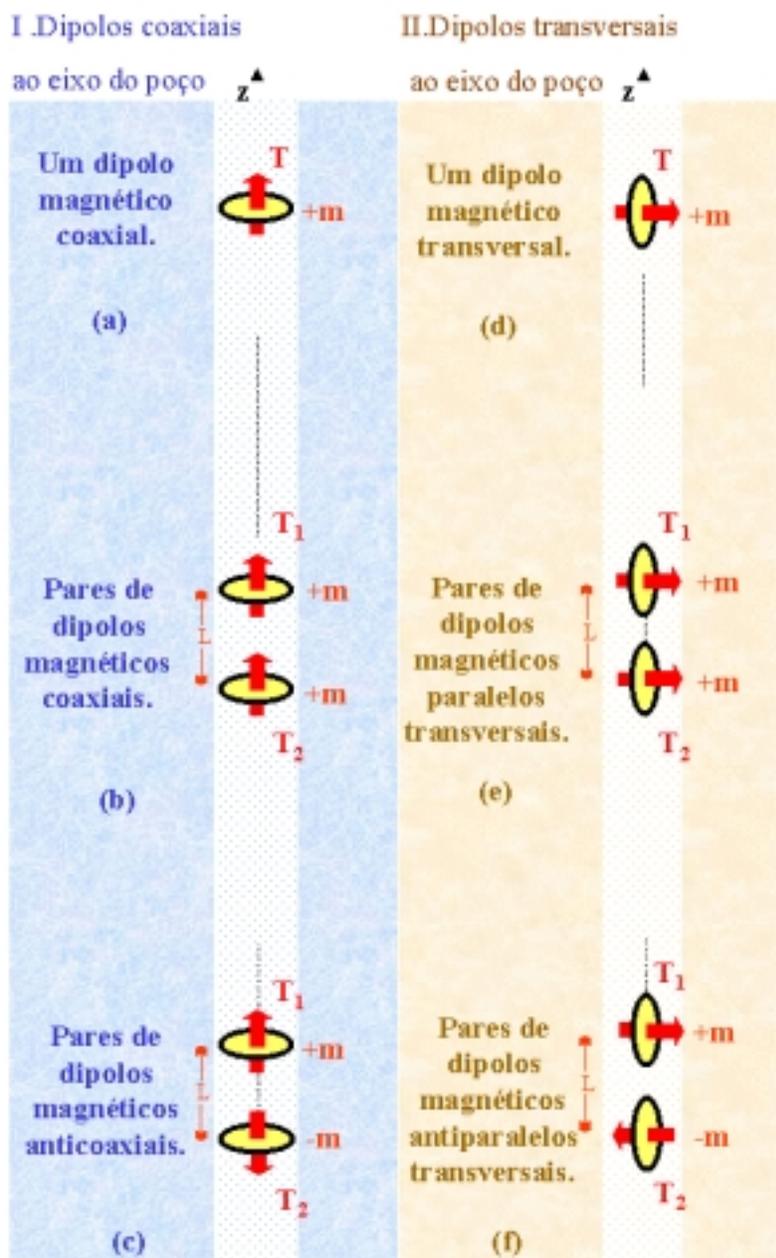


Figura 1 – Arranjo de dipolos magnéticos transmissores estudados: (I) Arranjos coaxiais ao eixo do poço e, (II) Arranjos transversais ao eixo do poço

- Dois dipolos magnéticos antiaxiais (Figura 1c)

II. Dipolos magnéticos transversais ao eixo do poço (bobinas coplanares):

- Um dipolo magnético (Figura 1d)
- Dois dipolos magnéticos paralelos (Figura 1e)
- Dois dipolos magnéticos antiparalelos (Figura 1f)

2.1- CAMPO MAGNÉTICO DE DIPOLOS COAXIAIS AO EIXO DO POÇO.

2.1.1- Um dipolo magnético coaxial.

O campo magnético \vec{B} nas vizinhanças de uma pequena bobina localizada no plano xy ou de um dipolo magnético localizado no ponto $P(r=0, z=0)$ e suas componentes radial r e vertical z em coordenadas cilíndricas, ver Figura 2, é dado pela equação (3) (Telford et al 1976)

$$\vec{B} = \frac{m \mu_o}{4 \pi (r^2 + z^2)^{5/2}} \left\{ 3 r z \vec{i}_r + (2 z^2 - r^2) \vec{i}_z \right\} , \quad (3)$$

onde $m = \pi a^2 I$, sendo m o momento de dipolo magnético. As suas componentes radial B_r e vertical B_z são definidas respectivamente por

$$B_r = \frac{3 m \mu_o r z}{4 \pi (r^2 + z^2)^{5/2}} , \quad (4)$$

$$B_z = \frac{m \mu_o (2 z^2 - r^2)}{4 \pi (r^2 + z^2)^{5/2}} , \quad (5)$$

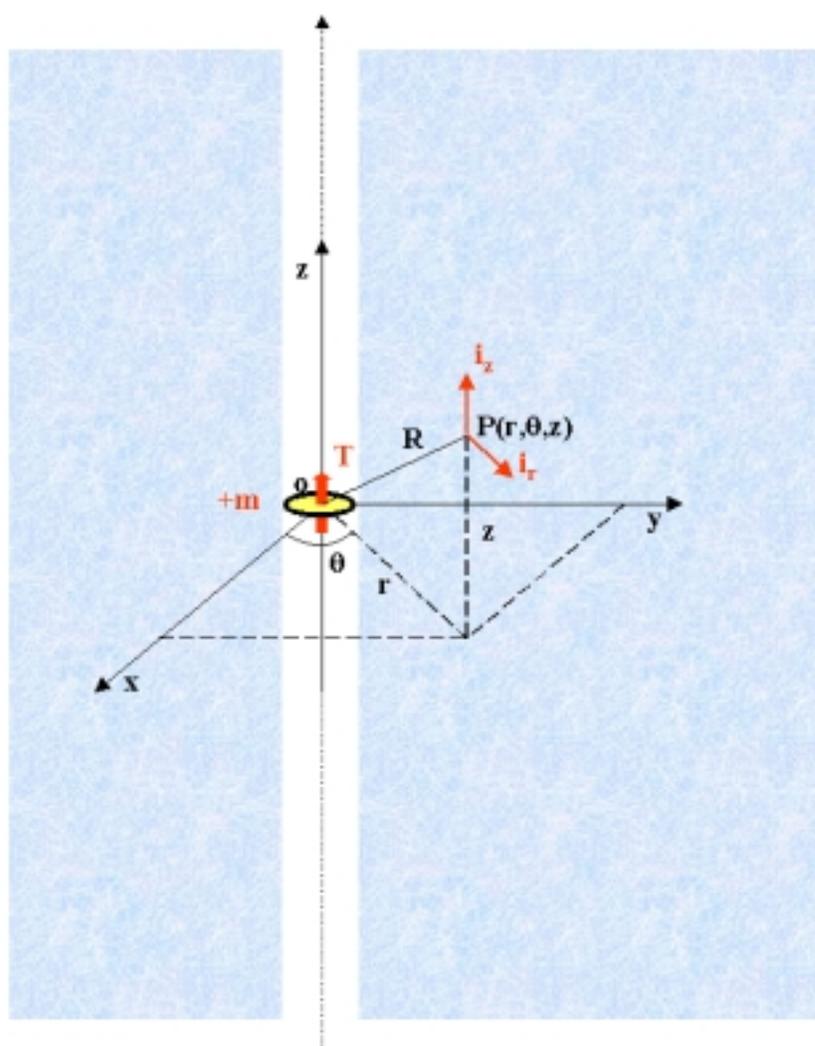


Figura 2 – Diagrama esquemático de um dipolo coaxial ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.

A Figura 3 mostra o campo magnético e as linhas de indução de um dipolo magnético coaxial ao eixo do poço posicionado no ponto $P(r=0, z=0)$. O campo magnético calculado é multiplicado por 2 com o objetivo de facilitar a comparação quantitativa com o campo magnético de dois dipolos, porque estes têm campo proveniente de dois transmissores. O campo é forte onde as linhas de fluxo estão mais agrupadas, isto é, na região onde $z=0$.

A Figura 4 mostra a sua componente radial. Esta componente radial é nula no plano $(r=0, z=0, \theta)$ e no eixo $z(z, r=0, \theta)$. Nos cálculos do campo magnético foram considerados valores do momento magnético $1 A.m^2$.

A Figura 5 mostra a componente vertical devido a um dipolo coaxial. Esta componente apresenta valores negativos (sentido negativo) na parte central entre o primeiro e quarto quadrantes e entre o segundo e terceiro quadrantes, isto é, em torno do plano $(r=0, z=0, \theta)$. Ela também é nula na parte central de cada quadrante onde o campo muda de direção. A intensidade máxima desta componente é encontrada no eixo z .

2.1.2- Dois dipolos magnéticos coaxiais e antioaxiais.

O campo magnético devido a dois dipolos magnéticos coaxiais é obtido num ponto arbitrário $P(r, z, \theta)$ pela combinação vetorial dos campos resultantes dos dois dipolos isolados. Assim, o campo de dois dipolos coaxiais é definido por (Figura 6)

$$\begin{aligned} \vec{B}_T = & \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} + \frac{(z - z_2)}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right] \vec{i}_r + \\ & + \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{[2(z - z_1)^2 - r^2]}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} + \frac{[2(z - z_2)^2 - r^2]}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right] \vec{i}_z, \end{aligned} \quad (6)$$

e suas componentes radial e vertical são definidas por

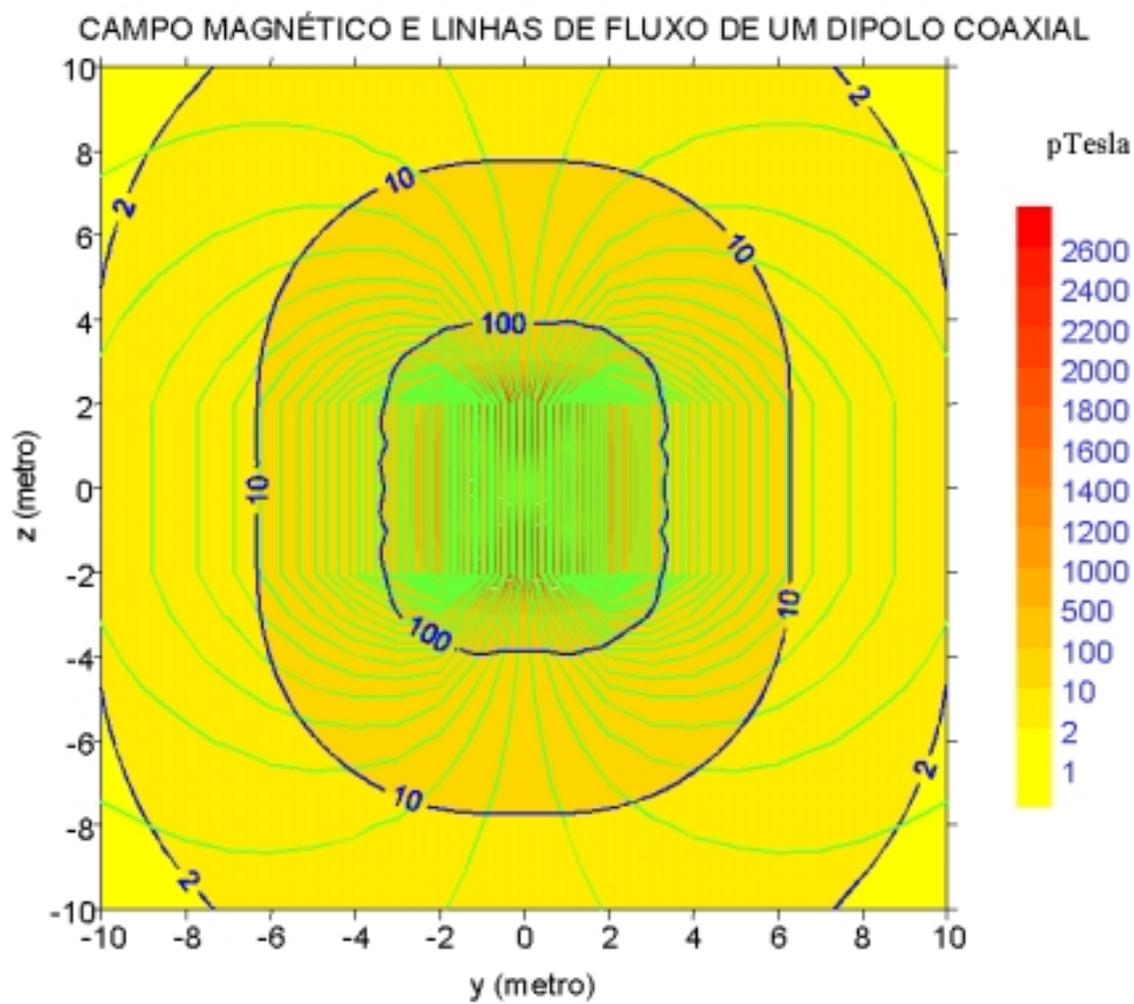


Figura 3 – Campo magnético e linhas de fluxo de um dipolo coaxial. O dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=0)$.

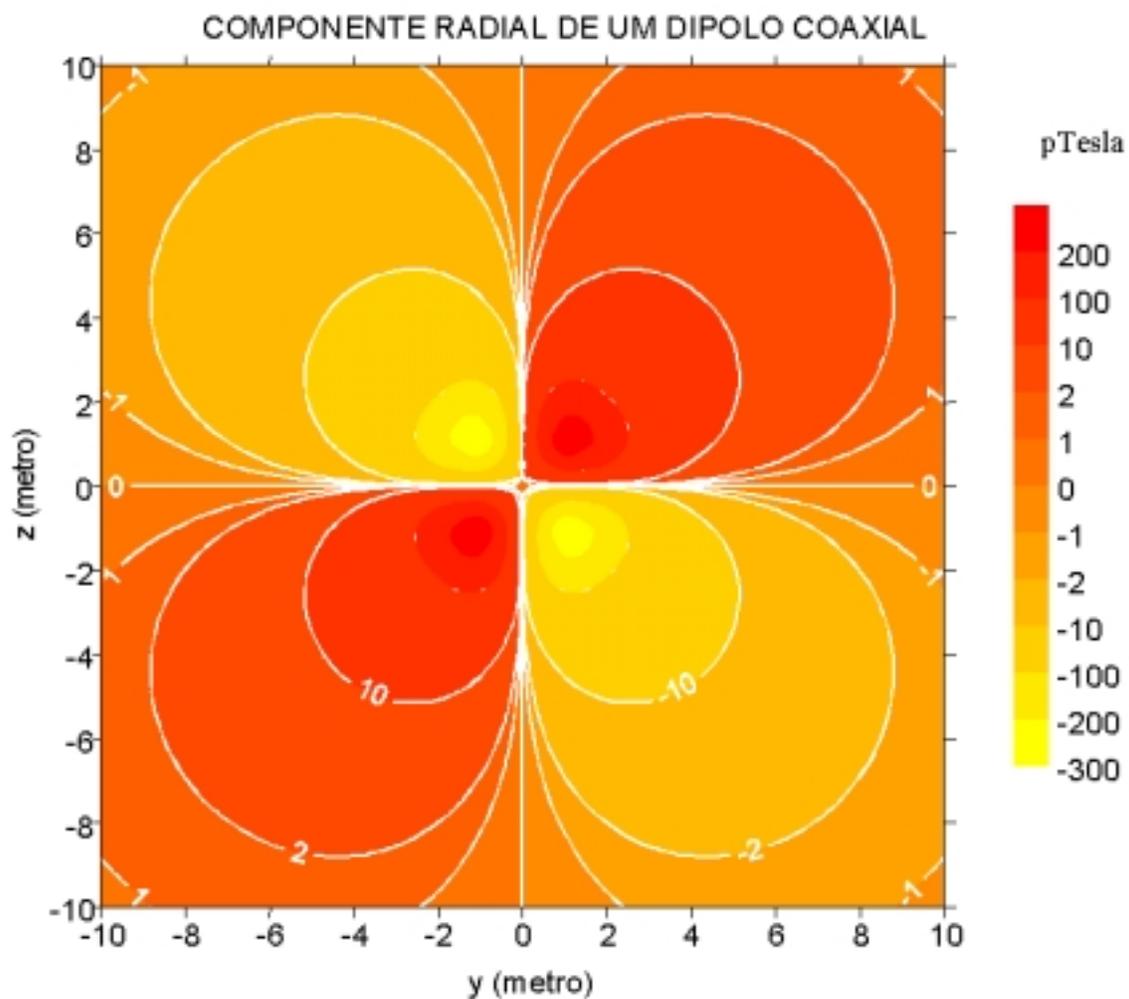


Figura 4 – Componente radial do campo magnético de um dipolo magnético coaxial ao eixo do poço posicionado no ponto ($r=0, z=0$).

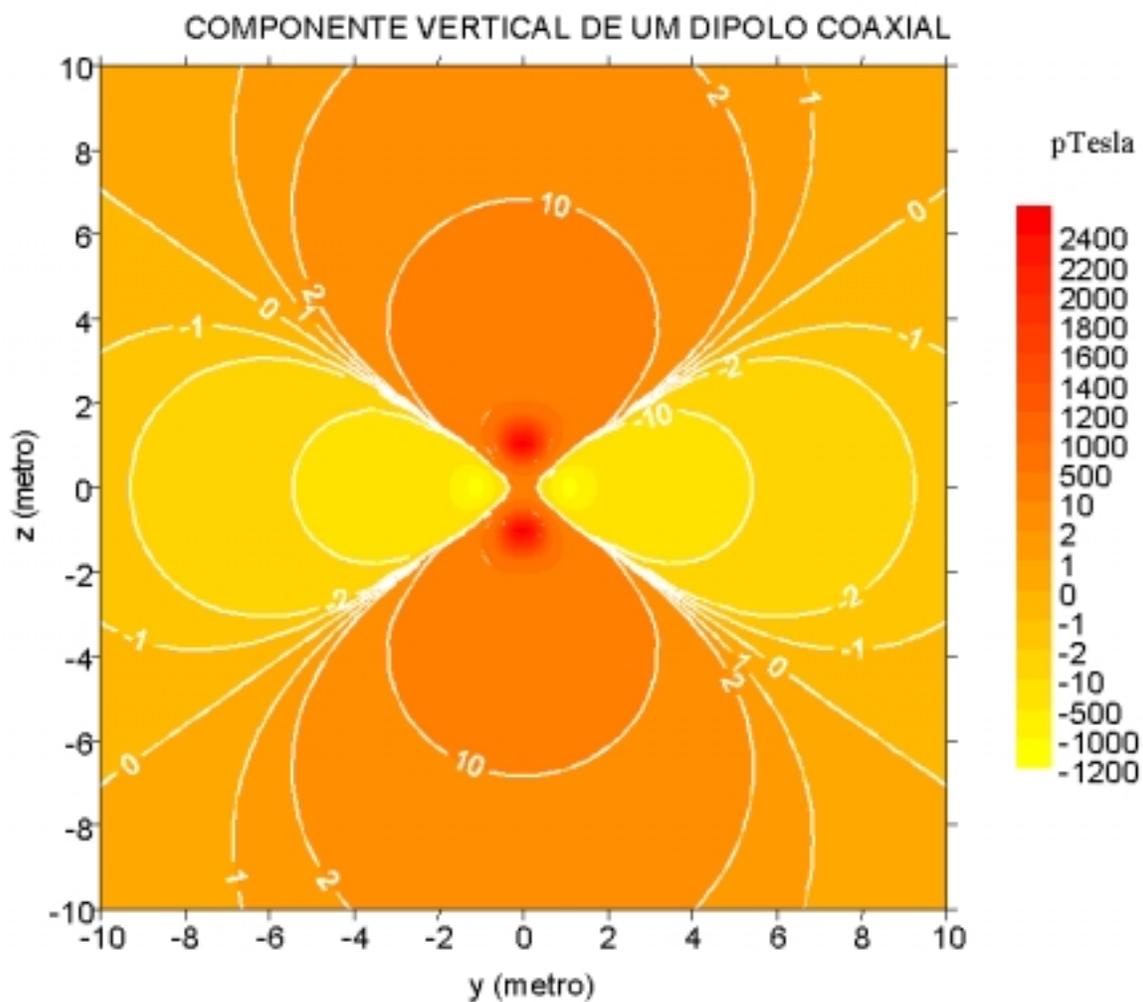


Figura 5 – Componente vertical do campo magnético de um dipolo magnético transmissor coaxial ao eixo do poço posicionado no ponto ($r=0$, $z=0$).

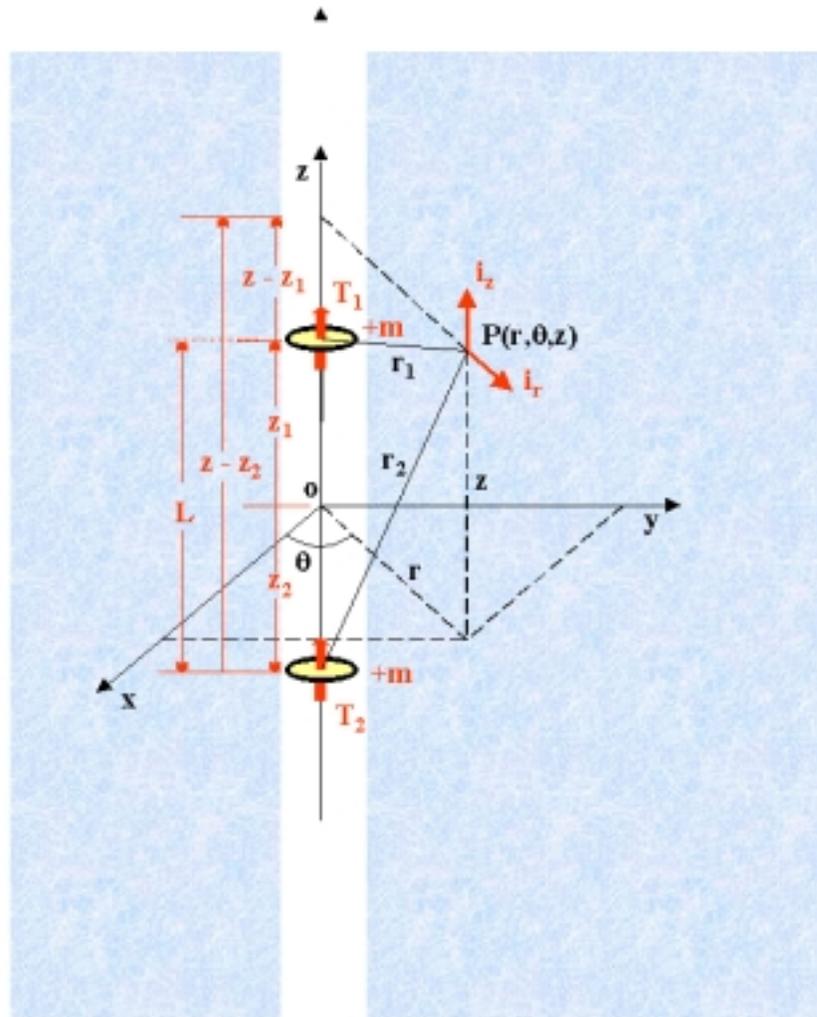


Figura 6 – Diagrama esquemático de um par de dipolos magnéticos coaxiais ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.

$$B_r = \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} + \frac{(z - z_2)}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right], \quad (7)$$

$$B_z = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2(z - z_1)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} + \frac{2(z - z_2)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right], \quad (8)$$

Para dois dipolos antioaxiais o campo magnético e suas componentes radiais e verticais são definidas por

$$\begin{aligned} \vec{B}_T = & \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} - \frac{(z - z_2)}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right] \vec{i}_r + \\ & + \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2(z - z_1)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} - \frac{2(z - z_2)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right] \vec{i}_z, \end{aligned} \quad (9)$$

$$B_r = \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} - \frac{(z - z_2)}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right], \quad (10)$$

e

$$B_z = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2(z - z_1)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_1)^2]^{5/2}} - \frac{2(z - z_2)^2 - r^2}{[r^2 + (z - z_2)^2]^{5/2}} \right]. \quad (11)$$

A figura 7 mostra o campo resultante e as linhas de fluxo magnético devido um par de dipolos coaxiais. A porção central entre os dipolos sofre mais alterações que as outras regiões. Em contraste, as regiões mais afastadas do centro dos dois dipolos mantêm características de campo de dipolos isolados (compare a Figura 3 com a Figura 7). Na zona central próximo ao eixo z ocorre um acréscimo do campo devido à superposição do campo vertical. Entretanto, este campo começa a diminuir com o aumento de r , isto é, nas proximidades onde os valores de z decrescem sendo nulo próximo de $r=2m$ para um espaçamento de 10m entre os dipolos. Esta configuração de dipolos gera um campo magnético relativamente mais concentrado nas proximidades do eixo z , que coincide com o eixo do poço. Isto significa que o emprego desta

CAMPO MAGNÉTICO E LINHAS DE FLUXO DE UM PAR DE DIPOLOS COAXIAIS

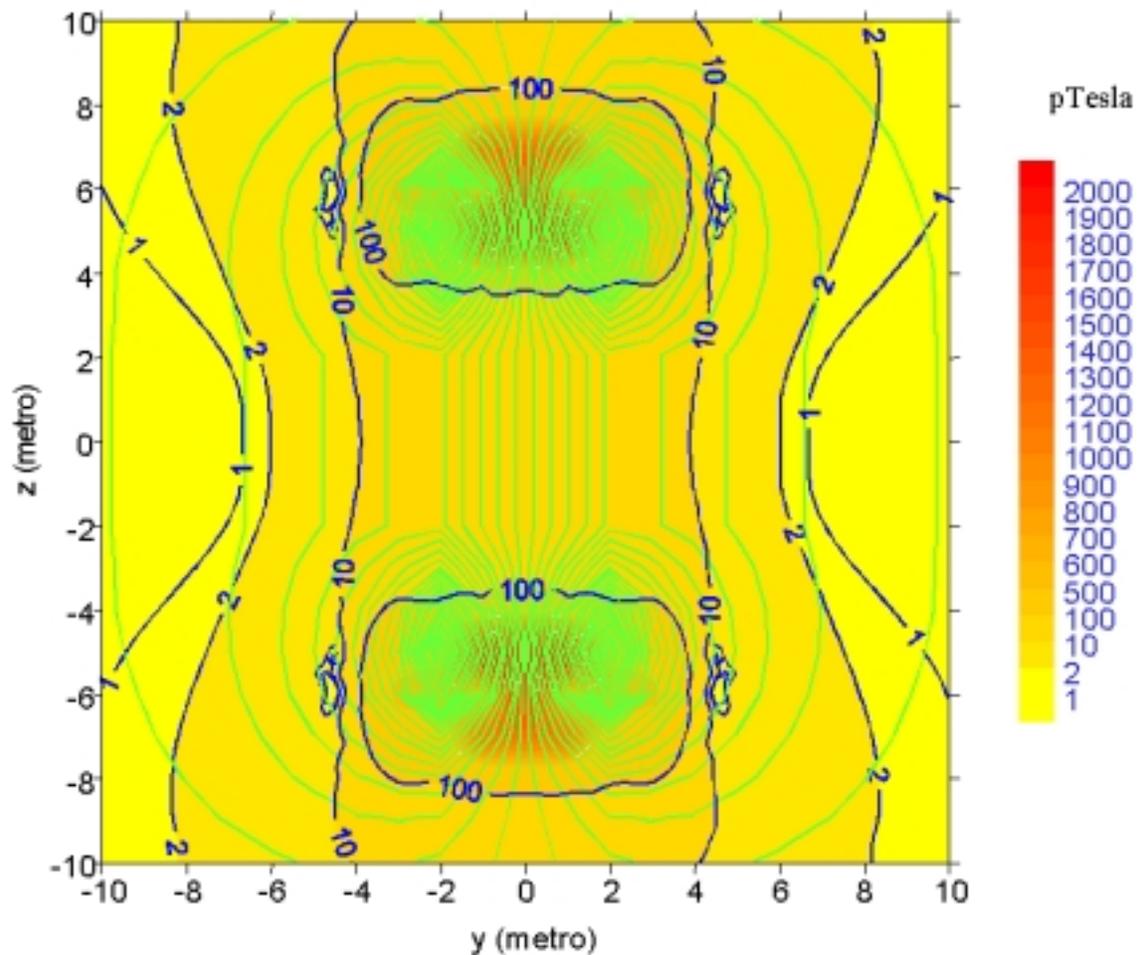


Figura 7 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos coaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5$ m). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5$ m).

configuração na perfilagem de poço vai responder principalmente à presença de lama no poço, zona lavada e possivelmente a uma parte da zona invadida.

A Figura 8 mostra a componente radial do campo magnético de um par de dipolos coaxiais. Esta componente varia positiva e negativamente alternadamente na vertical, isto é, em z , e há pouca penetração radial, isto é, normal ao eixo do poço.

A componente vertical desta configuração, Figura 9, apresenta maiores valores de campo magnético nas proximidades dos dipolos, particularmente no eixo z e apresenta pouca penetração radial, similarmente à da componente radial. Assim, a utilização desta configuração na perfilagem de poço não oferece vantagem, a não ser que a zona de investigação seja a zona do poço e a sua vizinhança.

A Figura 10 mostra a distribuição de linhas de fluxo e o campo magnético resultante devido a um par de dipolos antioaxiais. Nesta configuração, similarmente como à configuração de dipolos coaxiais temos boa concentração de fluxo nas proximidades do eixo z . Entretanto, na configuração de dipolos antioaxiais existe um feixe de fluxo penetrando radialmente em profundidade na parte central do par de dipolos. Assim, esta configuração tem boa resposta radial. Entretanto, na vizinhança do poço e na parte entre os dois dipolos o sentido das linhas de fluxo é devido a antioaxialidade dos dois dipolos. Assim, a resposta destas zonas (lama do poço, zona lavada e parte da zona invadida) será minimizada.

A Figura 11 mostra a componente radial de um par de dipolos antioaxiais. Esta componente tem antissimetria nas proximidades dos dipolos. Assim, as respostas do meio presente nesta região será praticamente anulada. Na região central entre os dipolos z entre $+1$ e -1 , existe um feixe radial do campo com possibilidade de uma boa resposta da zona virgem. Contudo, a componente vertical é praticamente inexistente nesta zona, ver Figura 12. Novamente, esta componente tem assimetria com relação ao plano central ($z=0$, r , θ). Assim, colocando-se o sensor com simetria axial no ponto ($z=0$, $r=0$), os efeitos desta componente será totalmente cancelado.

Deste modo, esta configuração é recomendada para a perfilagem de poço com a bobina receptora colocada coaxialmente no centro.

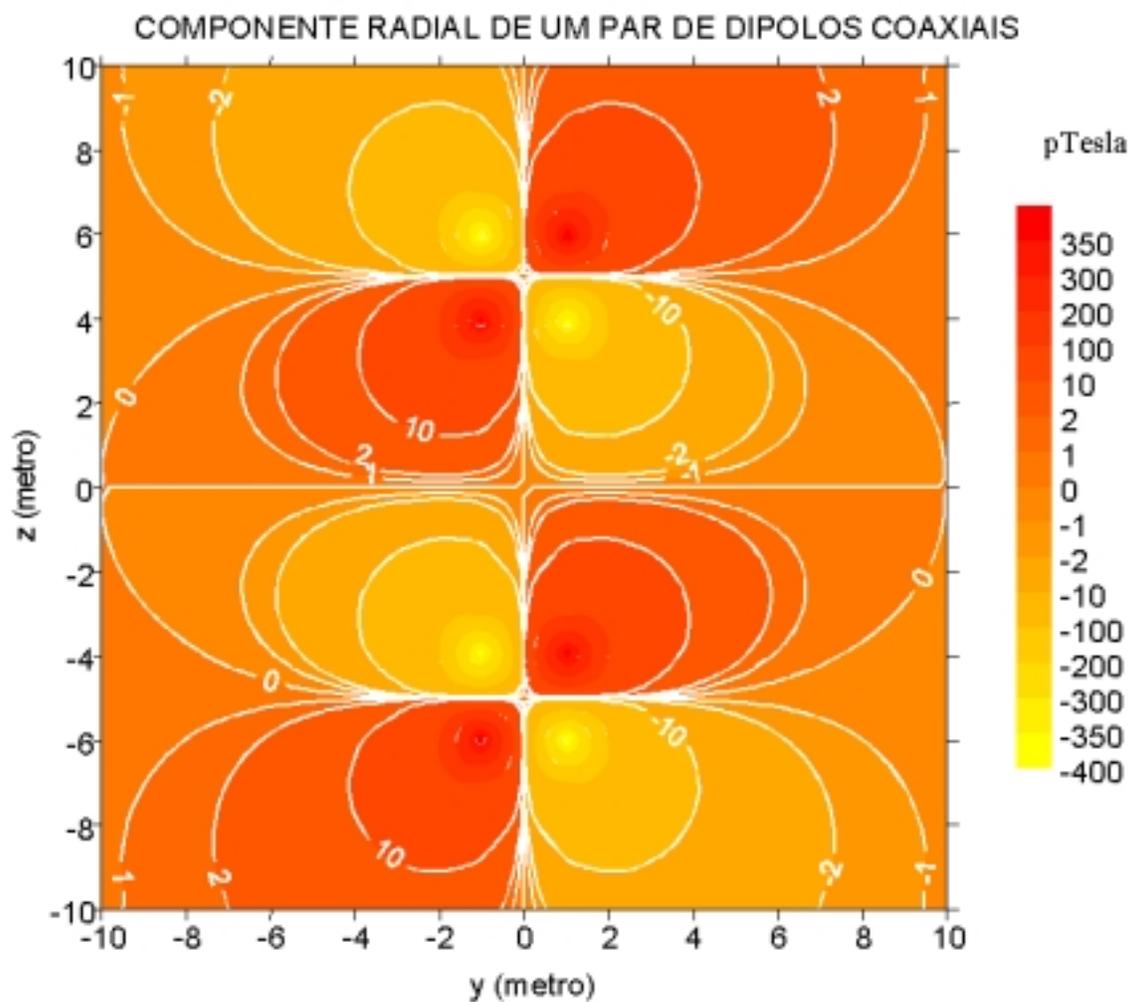


Figura 8 - Componente radial de um par de dipolos coaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5\text{m}$).

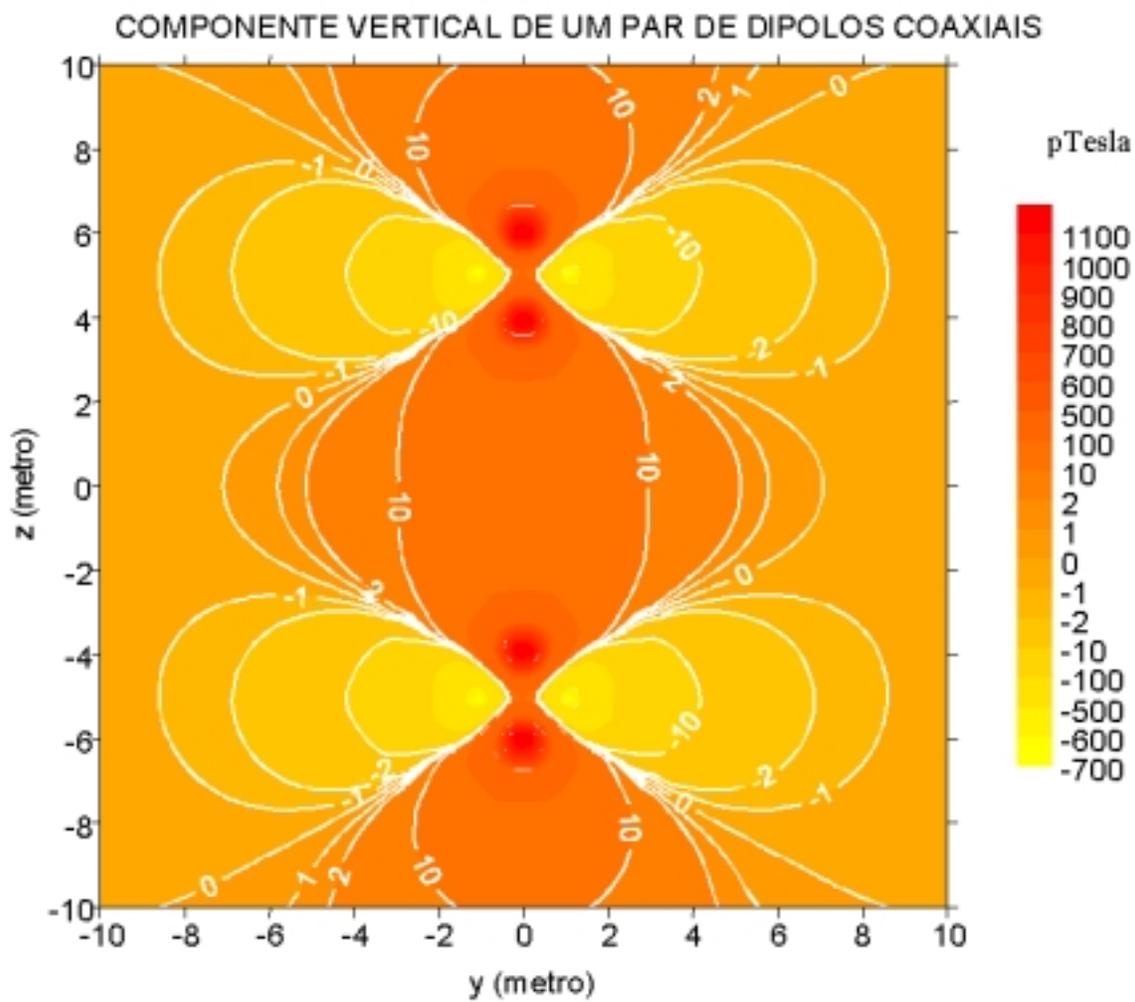


Figura 9 - Componente vertical de um par de dipolos coaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5$ m). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5$ m).

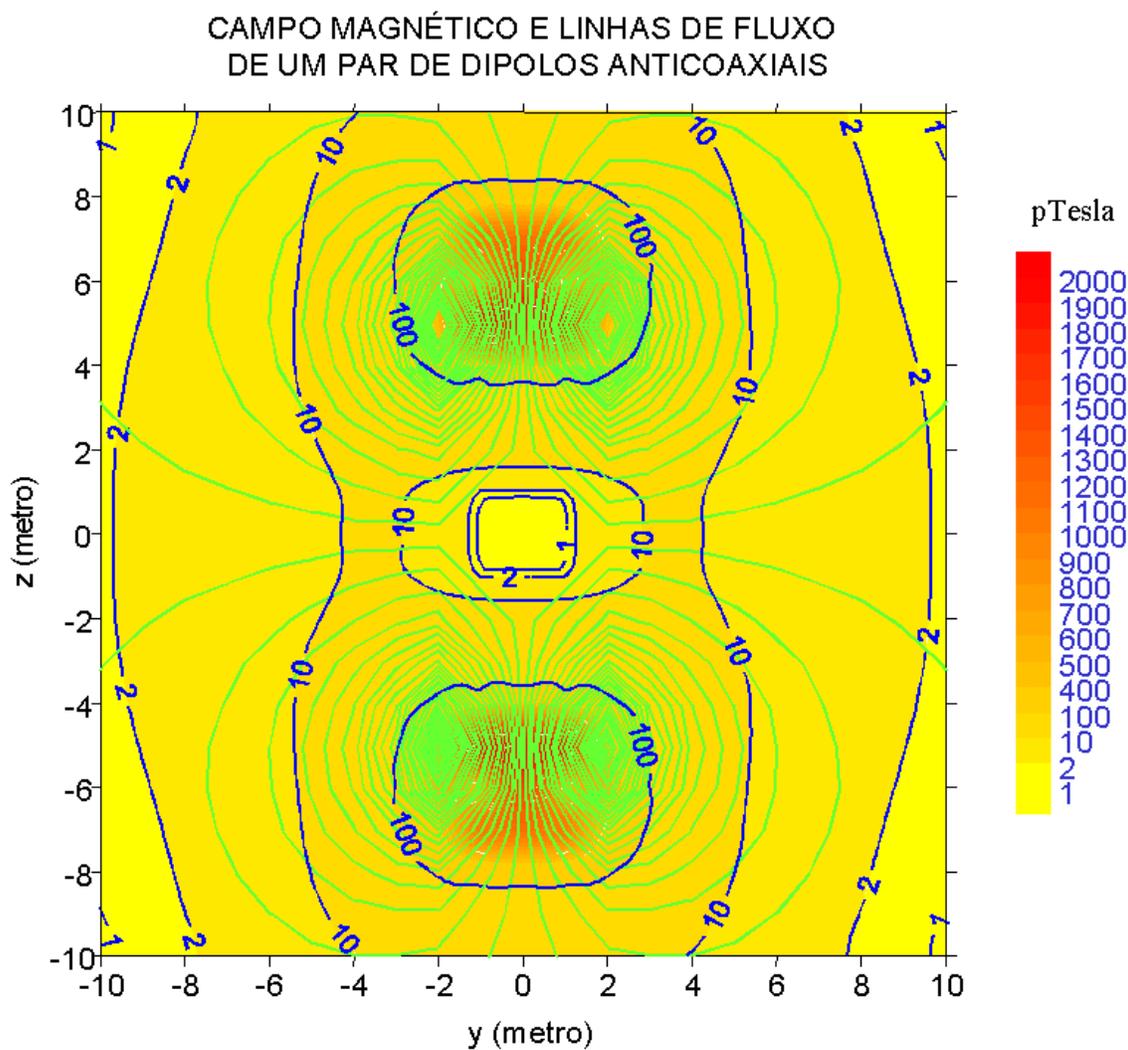


Figura 10 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5\text{m}$).

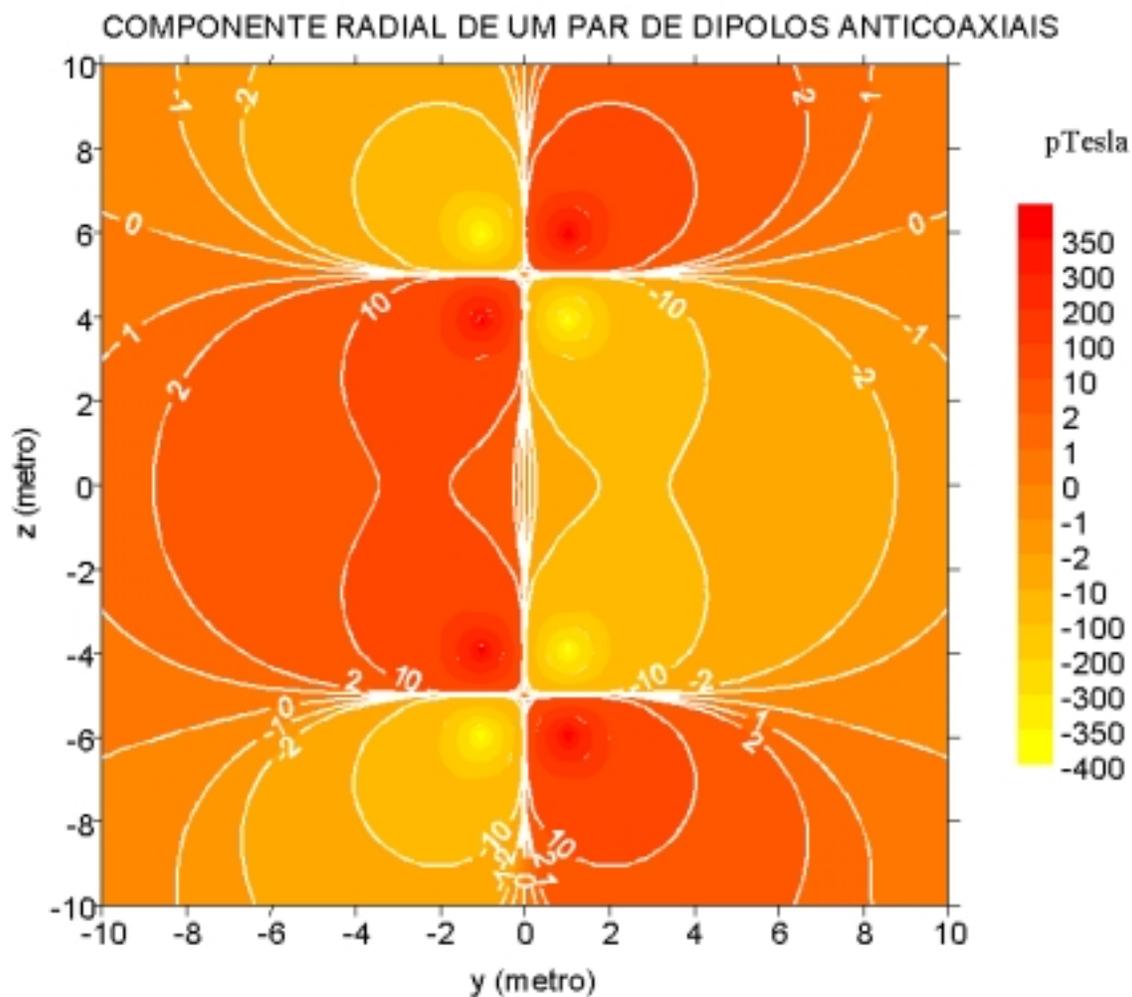


Figura 11 - Componente radial de um par de dipolos antioaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=5\text{m})$. O segundo dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=-5\text{m})$.

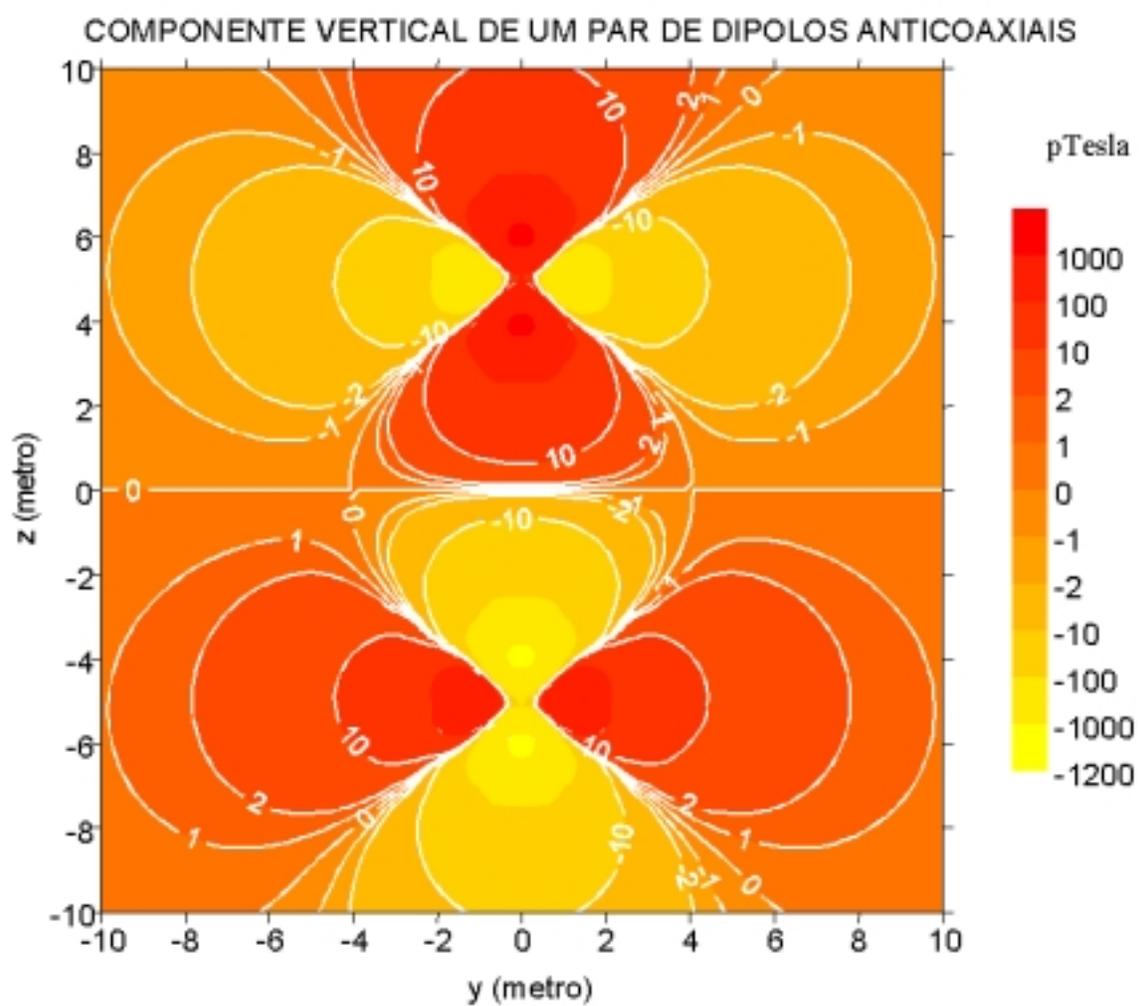


Figura 12 - Componente vertical de um par de dipolos antioaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=5\text{m})$. O segundo dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=-5\text{m})$.

2.2- CAMPO MAGNÉTICO DE DIPOLOS TRANSVERSAIS AO EIXO DO POÇO.

2.2.1- Um dipolo magnético transversal ao eixo do poço.

O campo magnético de um dipolo transversal ao eixo do poço não é simétrico em coordenadas cilíndricas mas pode ser calculado para o plano yz em que $\theta' = \pi/2$ mostrado na Figura 13. O sistema de coordenadas para um dipolo coaxial é $x'y'z'$. Este sistema é rotacionado de 90° em torno do eixo x' gerando um novo sistema de coordenadas $x y z$. A relação entre os dois sistemas é: $x' = x$, $y' = -z$ e $z' = y$. Para $\theta' = \pi/2$ temos em coordenadas cilíndricas que $r' = -z$, $z' = r$, $\vec{i}'_r = -\vec{i}_z$ e $\vec{i}'_z = \vec{i}_r$. Assim o campo magnético de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço no plano rz com $m=+1$ é definido por

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \left\{ (2r^2 - z^2) \vec{i}_r + 3rz \vec{i}_z \right\}, \quad (12)$$

$$B_r = \frac{\mu_o (2r^2 - z^2)}{4\pi(r^2 + z^2)^{5/2}}, \quad (13)$$

$$B_z = \frac{3\mu_o r z}{4\pi(r^2 + z^2)^{5/2}}. \quad (14)$$

O campo total devido a um dipolo transversal, mostrado na Figura 14, é fortemente concentrado horizontalmente nas proximidades do dipolo. Assim, este dipolo tem um bom potencial para investigação de camadas finas com boa resolução. Além disso, o campo devido a este dipolo possui discriminação azimutal. Entretanto, sofre um grande efeito de zona lavada e invadida.

A Figura 15 mostra a componente radial deste dipolo no plano rz o que confirma a análise realizada no parágrafo anterior. Este campo tem forte direcionamento horizontal e azimutal. Na linha $r=2^{1/2} z = 1.414 z$, o campo radial é nulo. Entretanto, a componente vertical é nula nos planos ($z=0, r$) e ($r=0, z$) ver Figura 16.

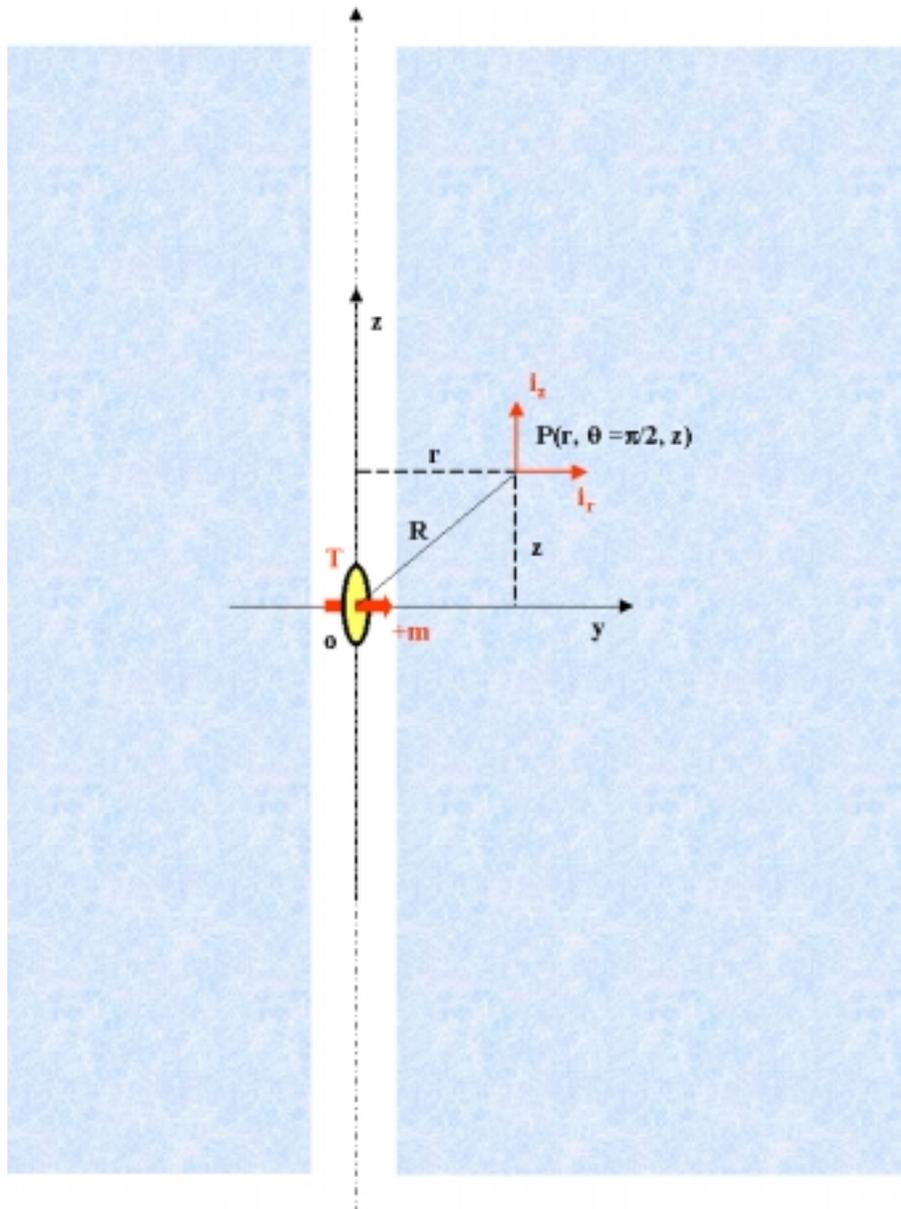


Figura 13 – Diagrama esquemático de um dipolo transversal ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.

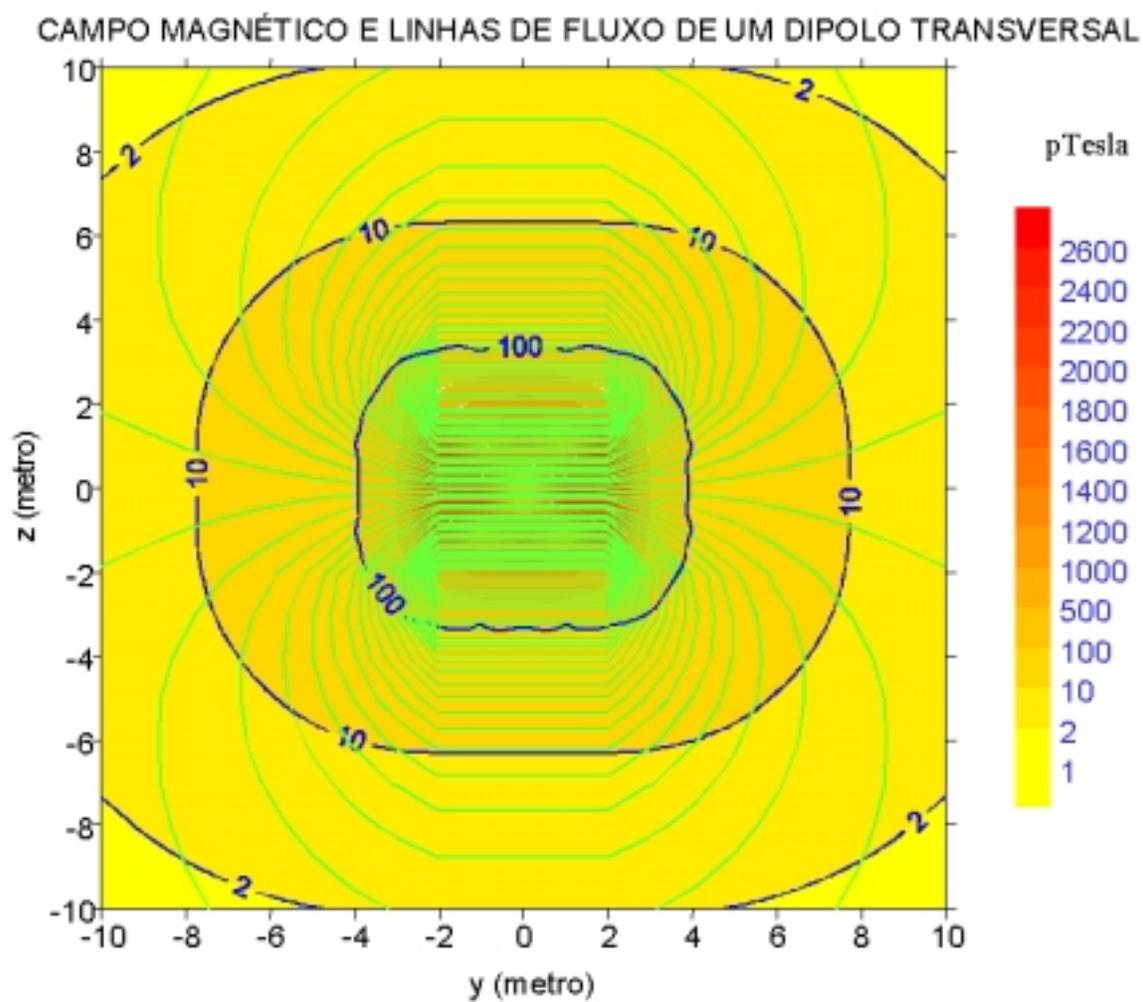


Figura 14 – Campo magnético e linhas de fluxo de um dipolo transversal. O dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0$).

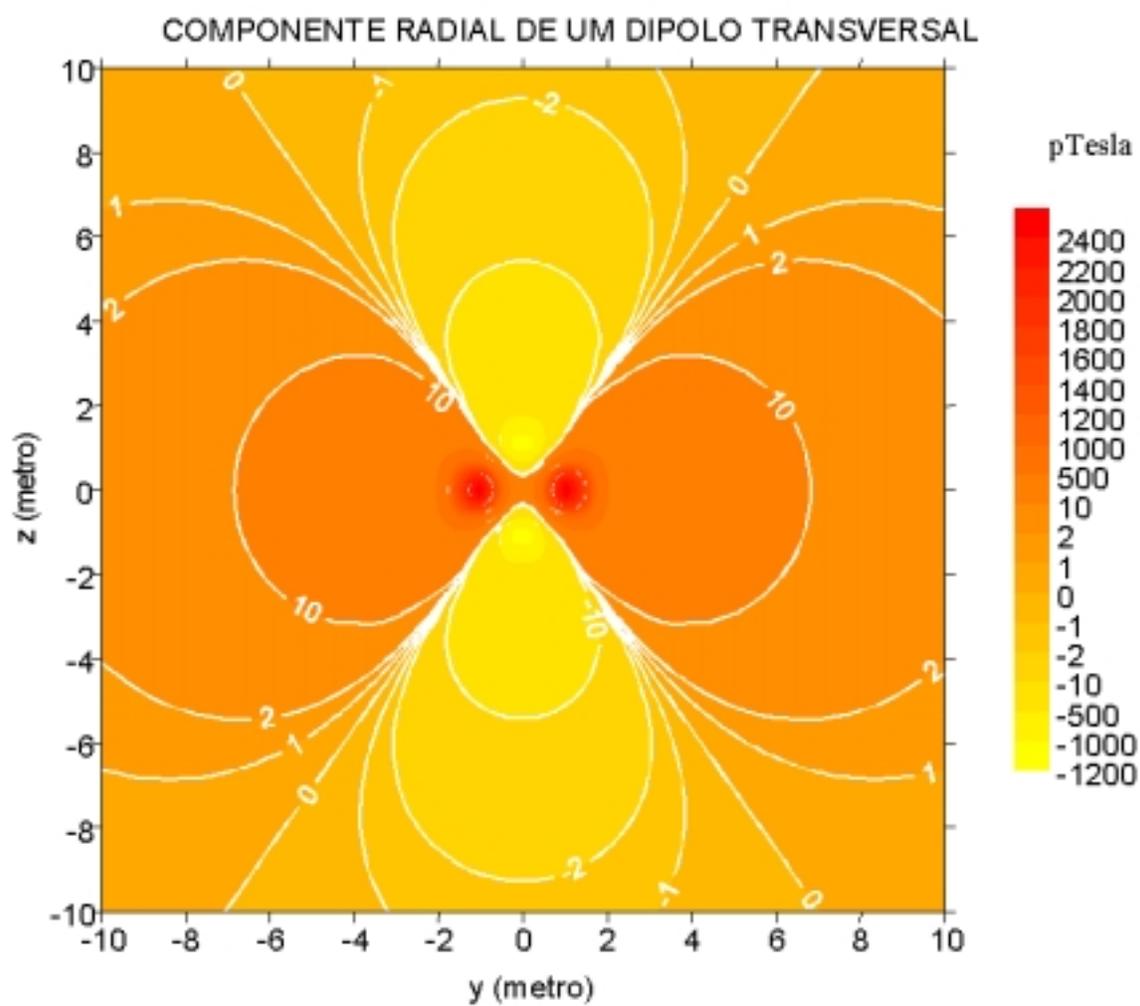


Figura 15 – Componente radial do campo magnético de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço posicionado no ponto ($r=0$, $z=0$).

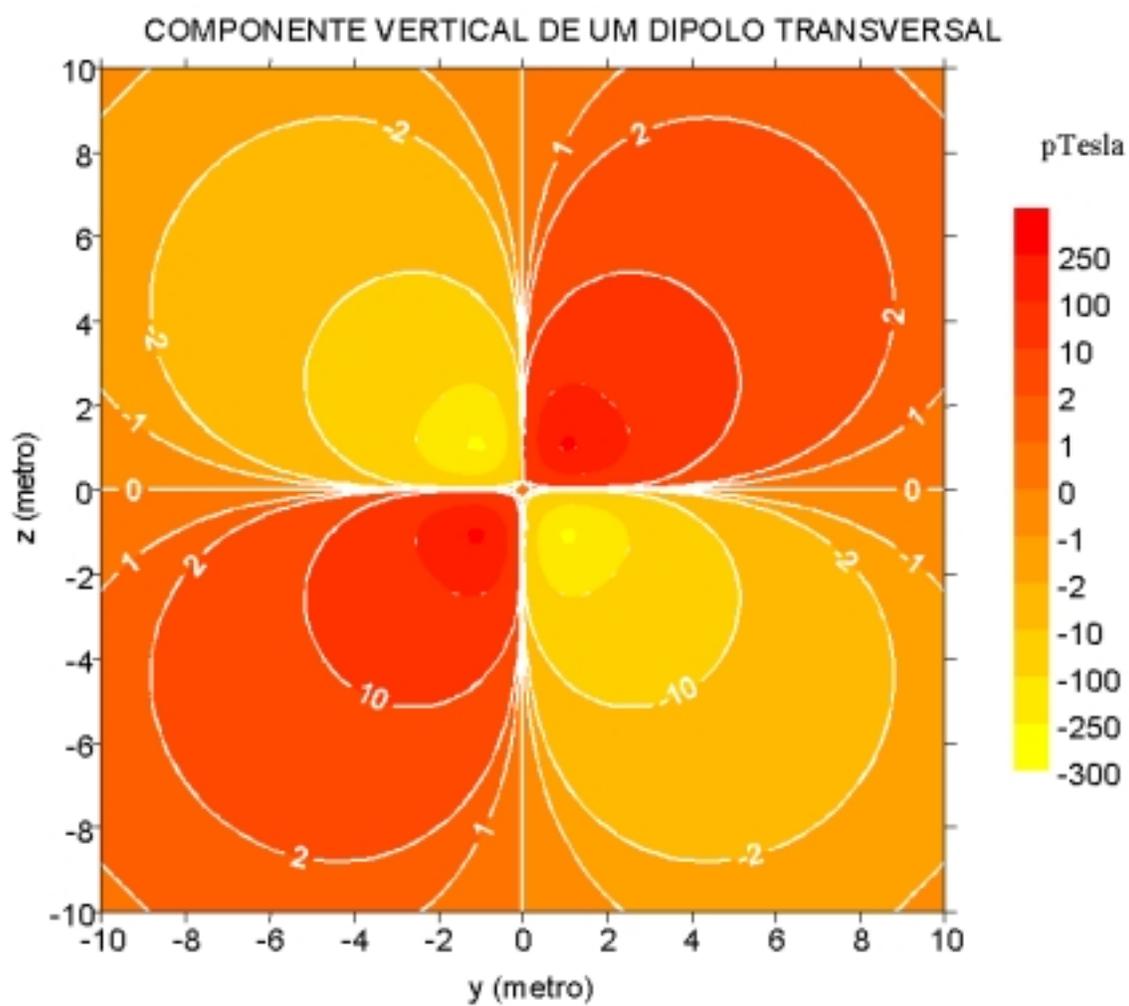


Figura 16 – Componente vertical do campo magnético de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço posicionado no ponto ($r=0$, $z=0$).

2.2.2- Dois dipolos magnéticos transversais paralelos e antiparalelos.

A Figura 17 mostra o esquema do cálculo do campo magnético de um par de dipolos transversais paralelos. O campo e as componentes radial e vertical destes dois dipolos são definidos por

$$\begin{aligned} \vec{B}_T = & \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{[2r^2 - (z - z_1)^2]}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} + \frac{[2r^2 - (z - z_2)^2]}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right] \vec{i}_r + \\ & + \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} + \frac{(z - z_2)}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right] \vec{i}_z, \end{aligned} \quad (15)$$

$$B_r = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2r^2 - (z - z_1)^2}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} + \frac{2r^2 - (z - z_2)^2}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right], \quad (16)$$

$$B_z = \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} + \frac{(z - z_2)}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right]. \quad (17)$$

A Figura 18 mostra as linhas de fluxo e o campo magnético no plano $(r, z, \theta=90^\circ)$ do par de dipolos paralelos transversais ao eixo do poço. Na parte central do conjunto as linhas de fluxo são horizontalmente dispostas. Isto significa que a configuração gera um feixe estreito de campo horizontal, um aspecto desejável na perfilagem de indução de poço. Este comportamento do campo é apresentado pelas suas componentes radial (Figura 19) e vertical (Figura 20).

O campo de um par de dipolos antiparalelos transversais ao eixo do poço e suas componentes são definidos por

$$\vec{B}_T = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2r^2 - (z - z_1)^2}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} - \frac{2r^2 - (z - z_2)^2}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right] \vec{i}_r +$$

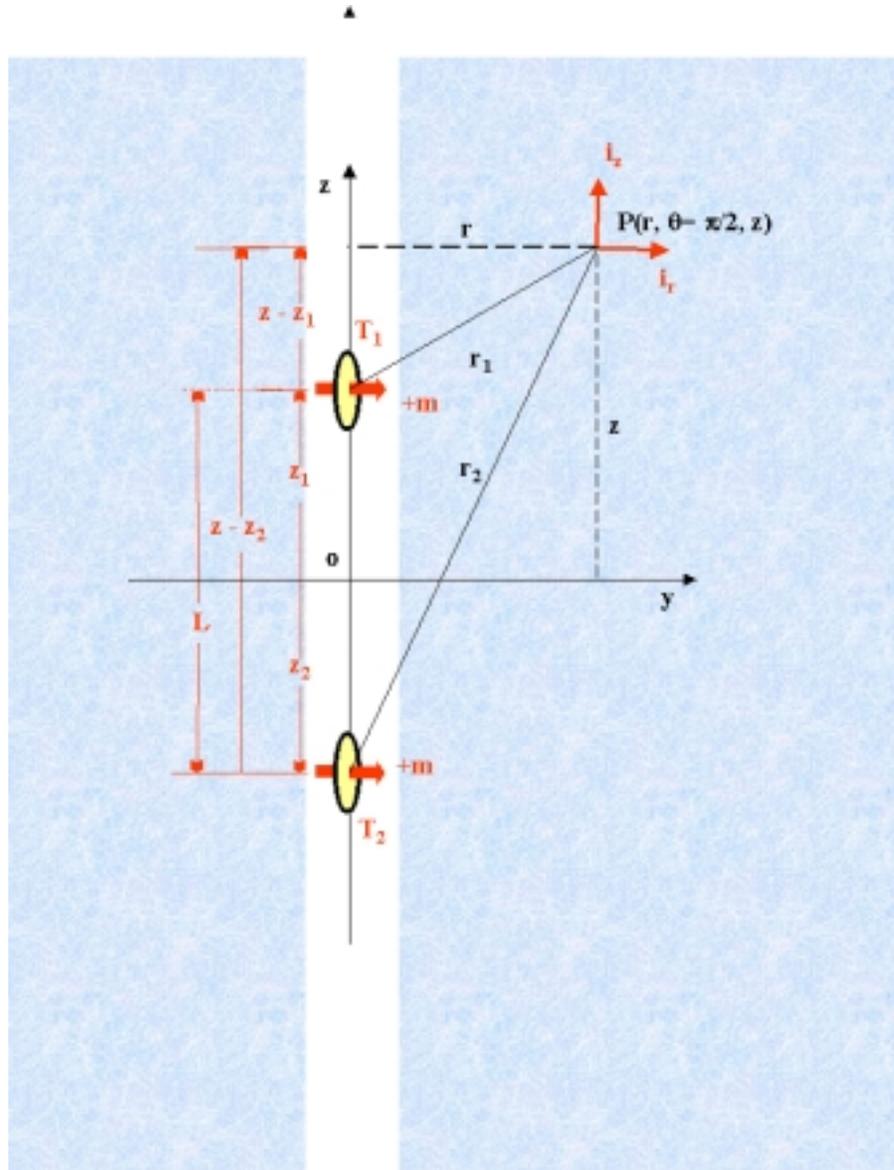


Figura 17 – Diagrama esquemático de um par de dipolos magnéticos transversais paralelos ao eixo do poço em coordenadas cilíndricas.

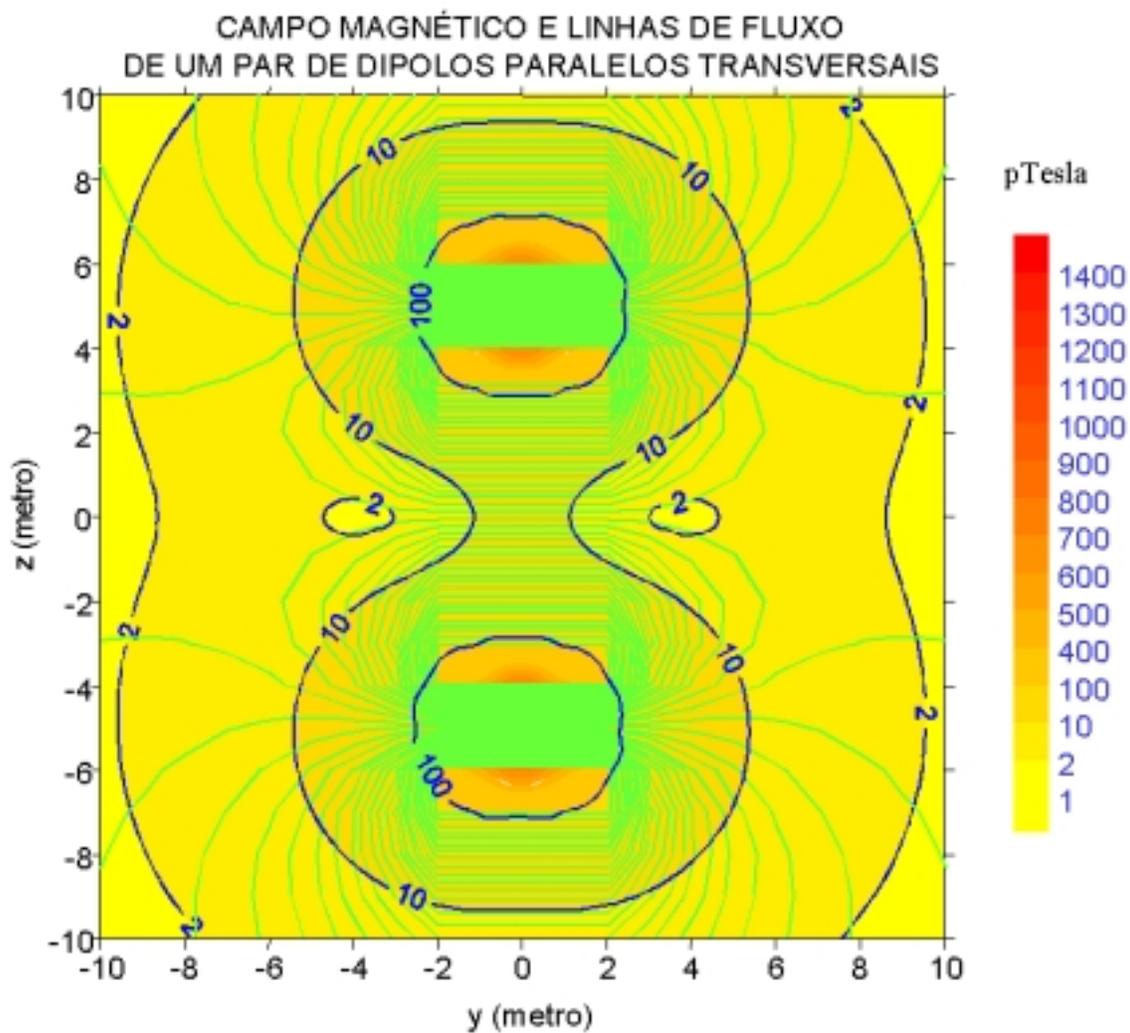


Figura 18 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais paralelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=5\text{m})$. O segundo dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=-5\text{m})$.

COMPONENTE RADIAL DE UM PAR DE DIPOLOS PARALELOS TRANSVERSAIS

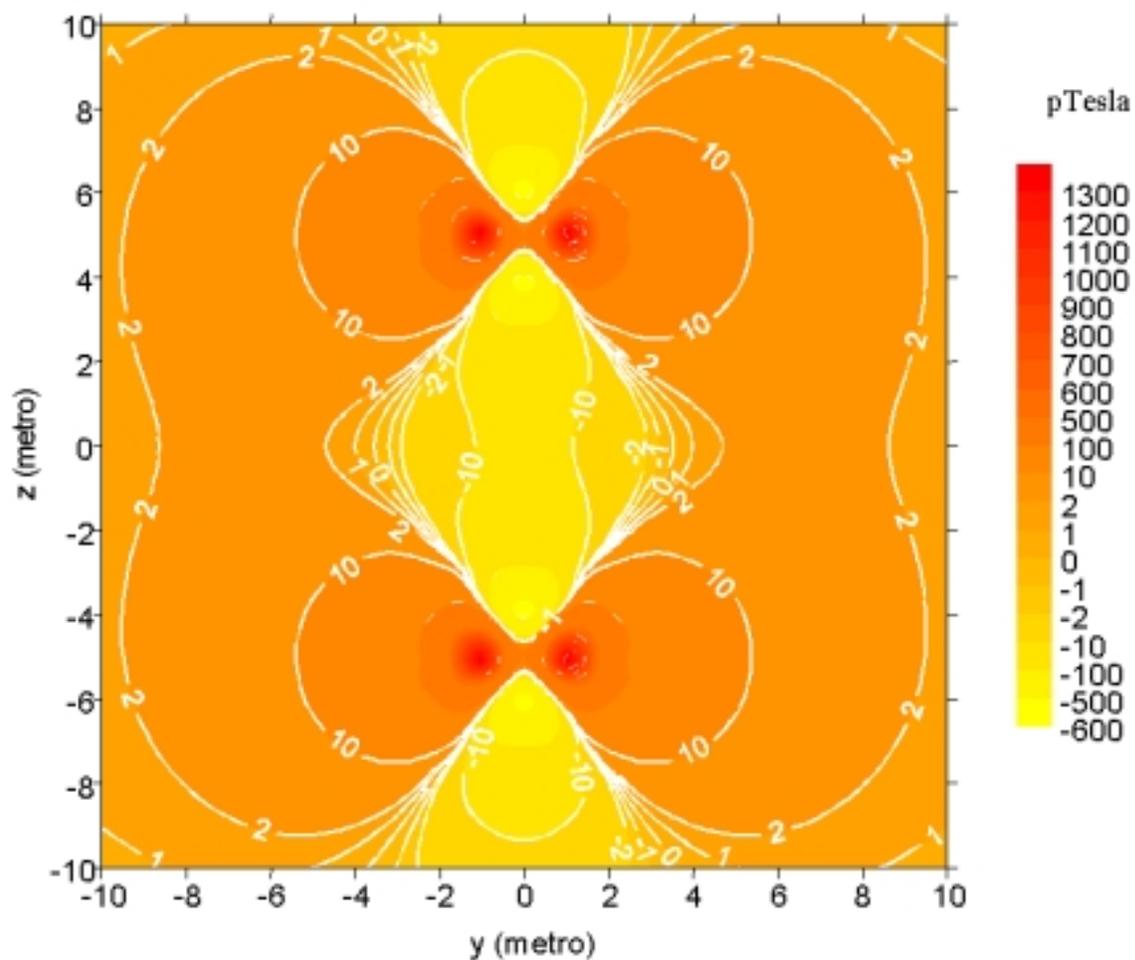


Figura 19 - Componente radial de um par de dipolos transversais paralelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0, z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0, z=-5\text{m}$).

COMPONENTE VERTICAL DE UM PAR DE DIPOLOS PARALELOS TRANSVERSAIS

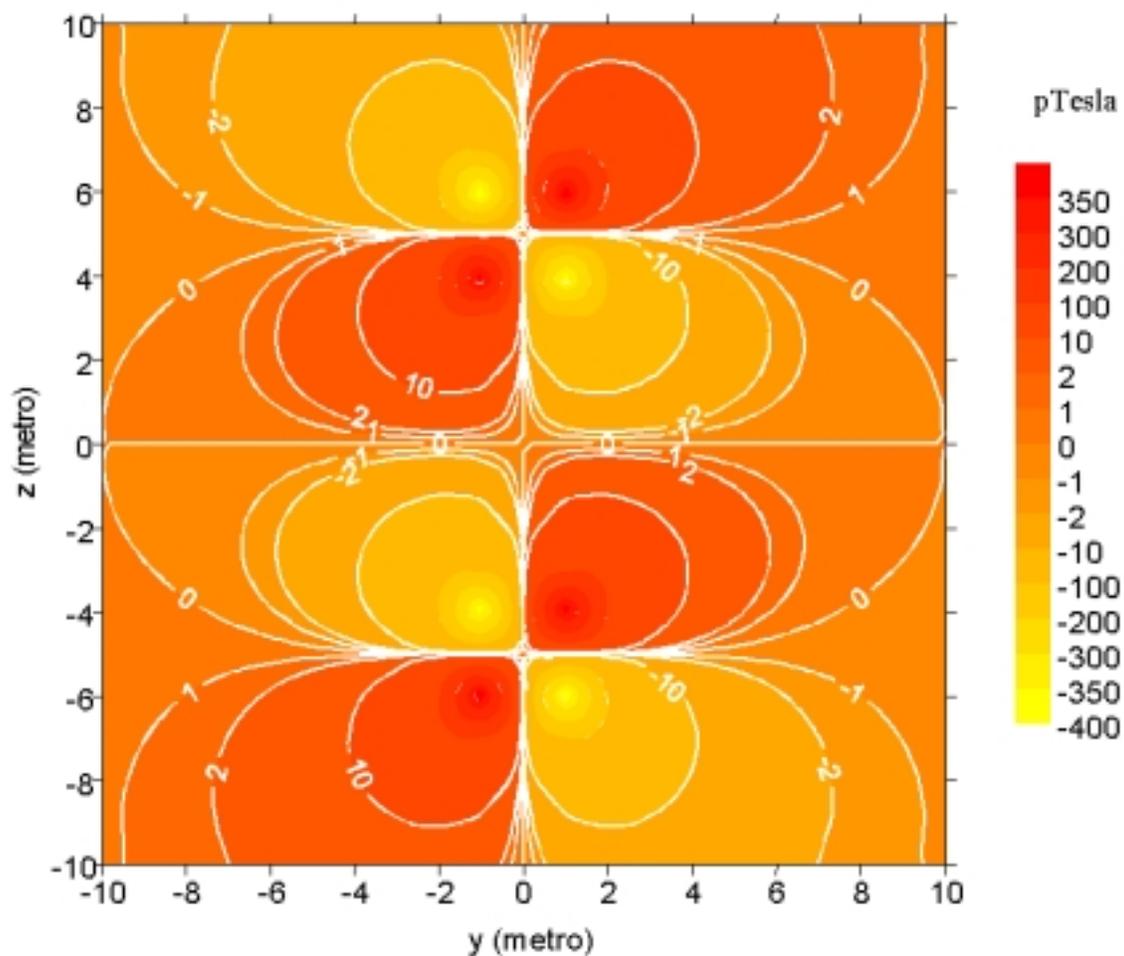


Figura 20 - Componente vertical de um par de dipolos transversais paralelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5\text{m}$).

$$+ \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} - \frac{(z - z_2)}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right] \vec{i}_z, \quad (18)$$

$$B_r = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[\frac{2r^2 - (z - z_1)^2}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} - \frac{2r^2 - (z - z_2)^2}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right], \quad (19)$$

$$B_z = \frac{3\mu_o r}{4\pi} \left[\frac{(z - z_1)}{(r^2 + (z - z_1)^2)^{5/2}} - \frac{(z - z_2)}{(r^2 + (z - z_2)^2)^{5/2}} \right]. \quad (20)$$

O campo magnético devido aos dois dipolos antiparalelos transversais é mostrado na Figura 21, o fluxo magnético é disposto verticalmente na parte central da configuração ao contrário dos dipolos paralelos transversais. Assim, não há importância do seu uso na perfilagem de indução. Esse comportamento do campo é apresentado nas suas componentes radial (Figura22) e vertical (Figura23).

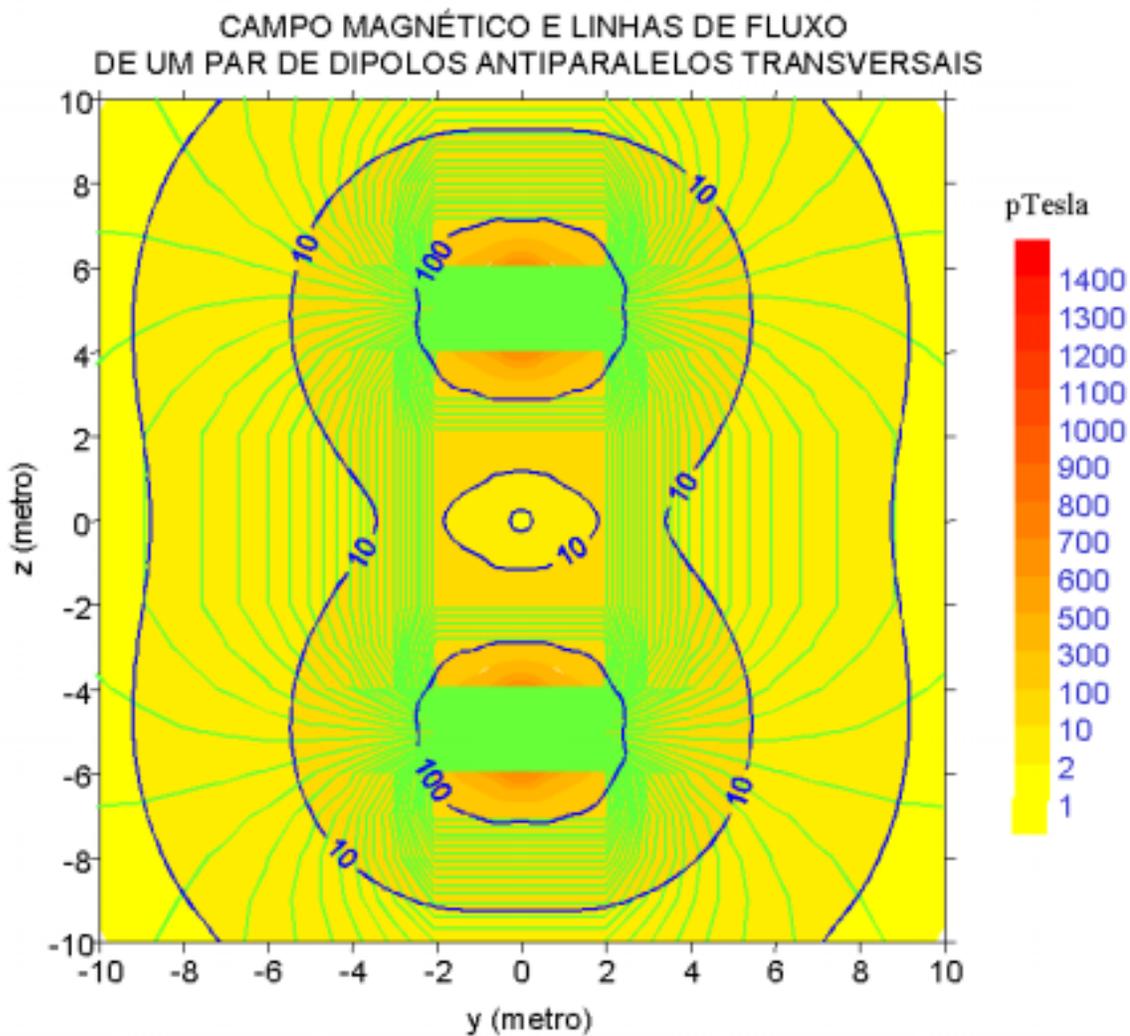


Figura 21 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos transversais antiparalelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=5\text{m})$. O segundo dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=-5\text{m})$.

COMPONENTE RADIAL DE UM PAR DE DIPOLOS ANTIPARALELOS TRANSVERSAIS

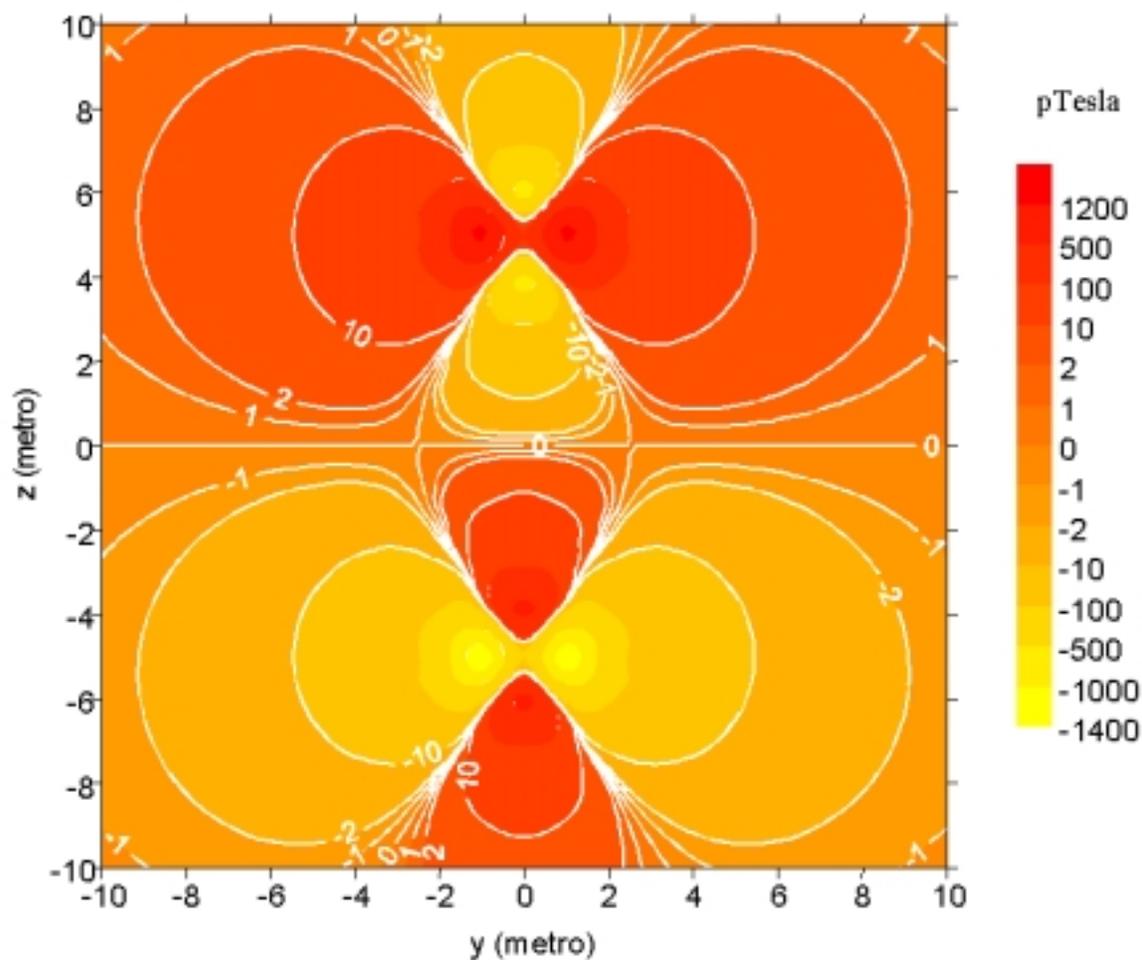


Figura 22 - Componente radial de um par de dipolos transversais antiparalelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5\text{m}$).

COMPONENTE VERTICAL DE UM PAR DE DIPOLOS ANTIPARALELOS TRANSVERSAIS

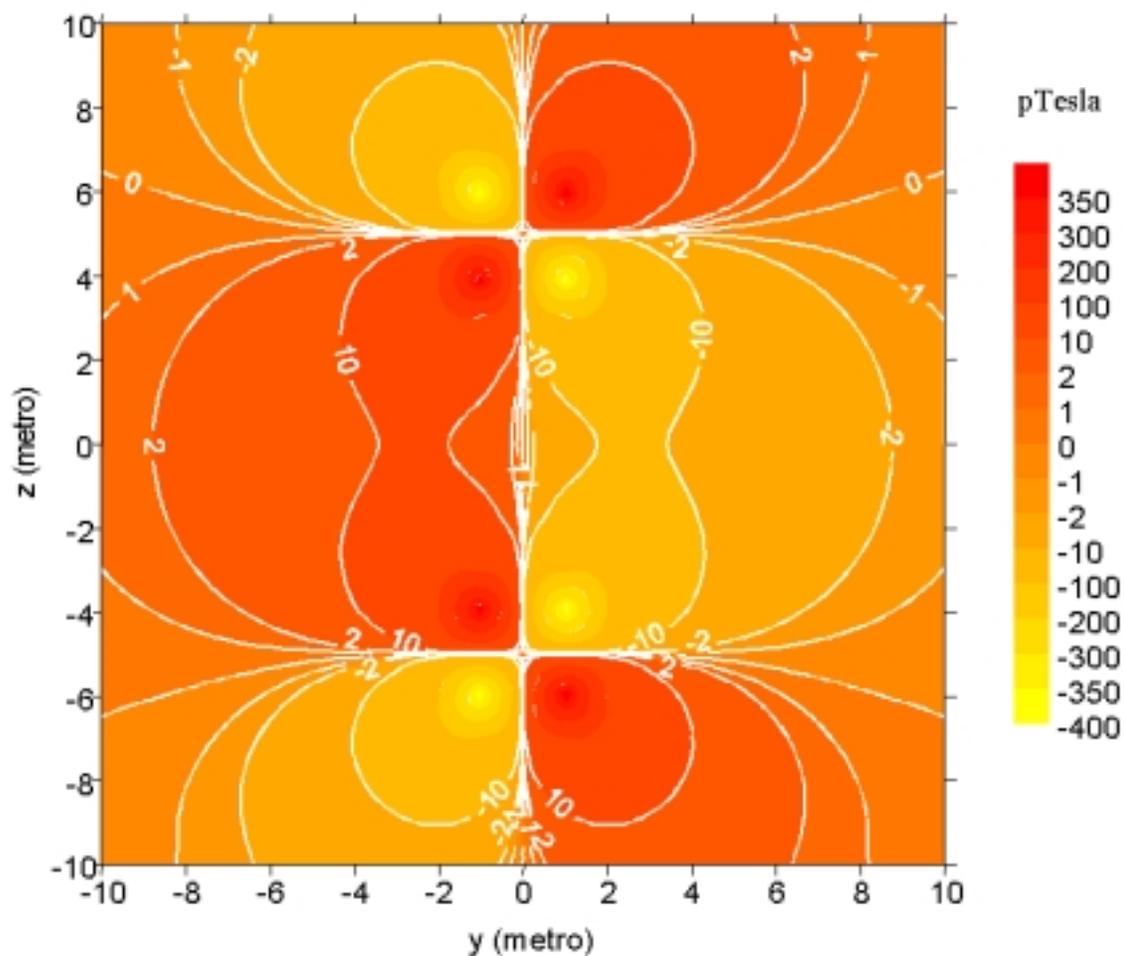


Figura 23 - Componente vertical de um par de dipolos transversais antiparalelos. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-5\text{m}$).

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo anterior foram apresentados os campos magnéticos devido a dipolos coaxiais e transversais isolados, pares de dipolos coaxiais e antioaxiais, e pares de dipolos paralelos e antiparalelos transversais. Uma situação desejável na perfilagem de poço é que os feixes do campo magnético sejam horizontalmente dispostos. Estes feixes foram gerados por pares de dipolos antioaxiais e paralelos transversais ao eixo do poço. Neste capítulo estudaremos a mudança deste feixe do campo pela variação do espaçamento entre os dipolos magnéticos.

3.1 FEIXE DO CAMPO DE DIPOLOS ANTIOAXIAIS.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 mostram os feixes do campo para espaçamentos entre os dipolos de $L=2, 1, 0.5$ e 0.2 m. Observa-se que a penetração e a espessura do feixe na direção vertical diminui com o decréscimo de L . Isto significa que o comportamento do feixe pode ser controlado pela variação do espaçamento entre os dipolos magnéticos transmissores ou bobinas transmissoras.

3.2 FEIXE DO CAMPO DE DIPOLOS PARALELOS TRANSVERSAIS.

Na faixa de espaçamento estudada não ocorre uma mudança perceptível no feixe do campo magnético com variação do espaçamento entre os dipolos (ver Figuras 28, 29, 30 e 31). Entretanto, o feixe criado por esta configuração tem maior profundidade de penetração radial que da configuração de dipolos antioaxiais. Assim, a utilização desta configuração é recomendada na perfilagem de indução de poço.

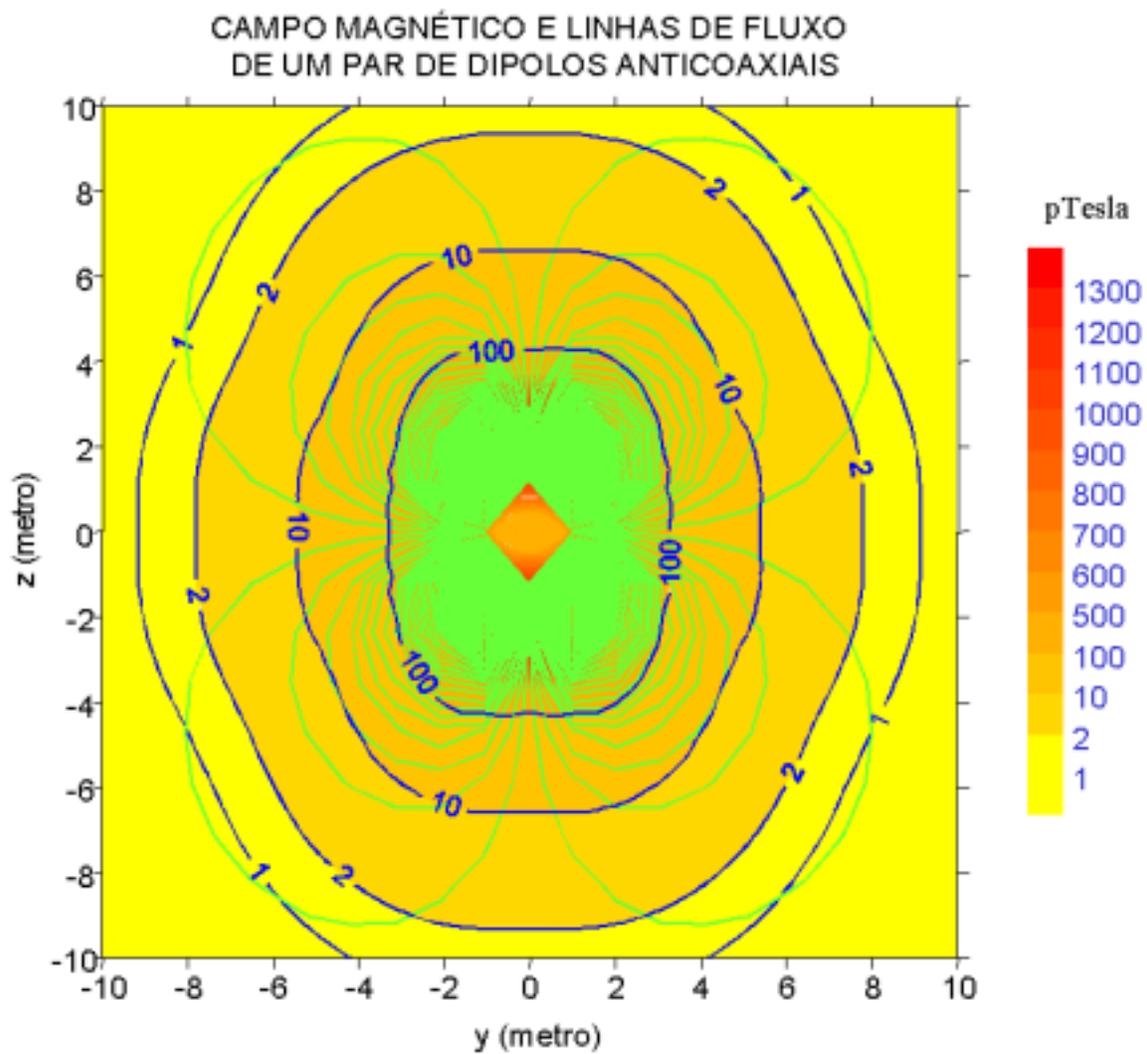


Figura 24 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=1\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-1\text{m}$).

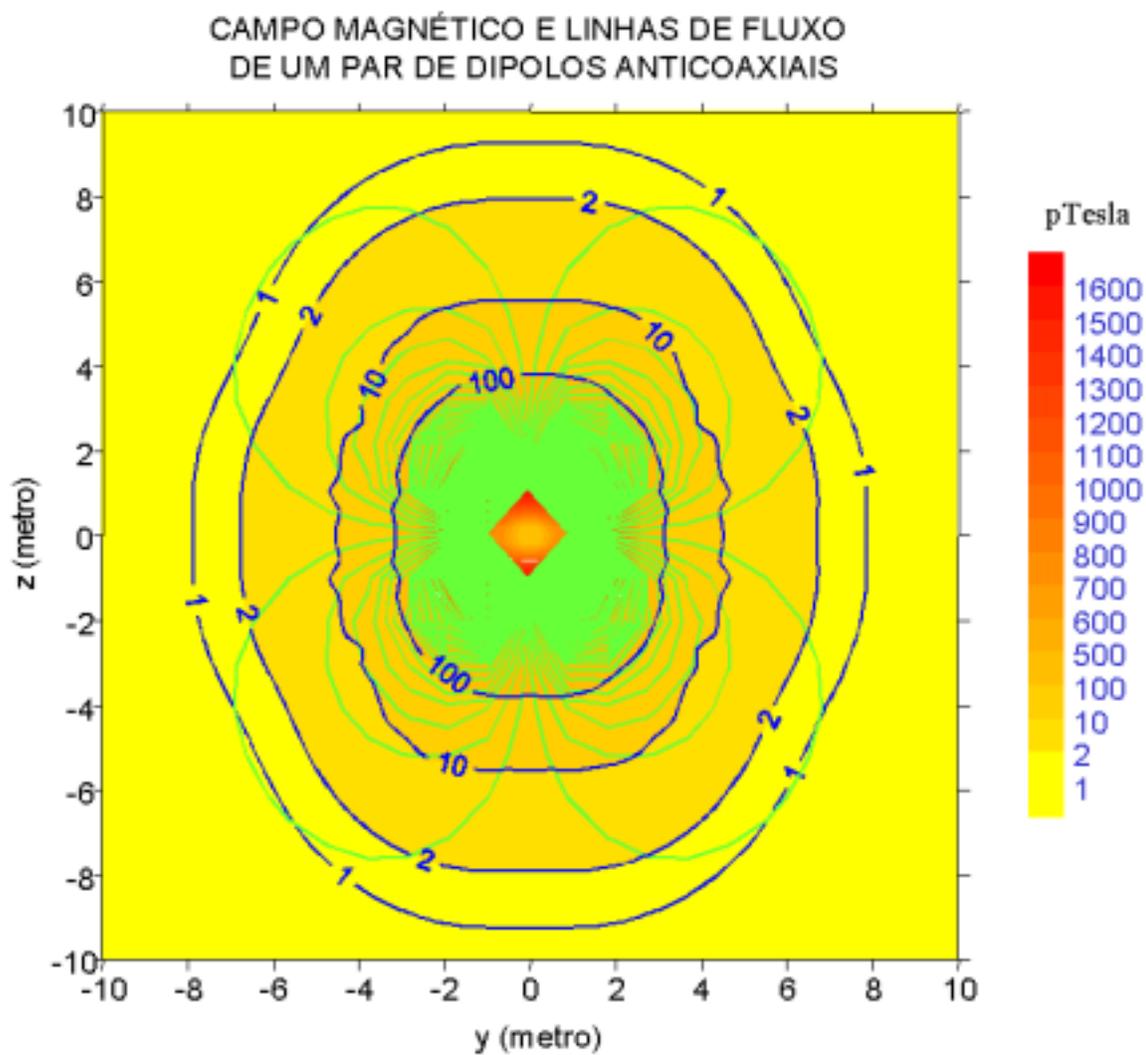


Figura 25 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.5\text{m}$).

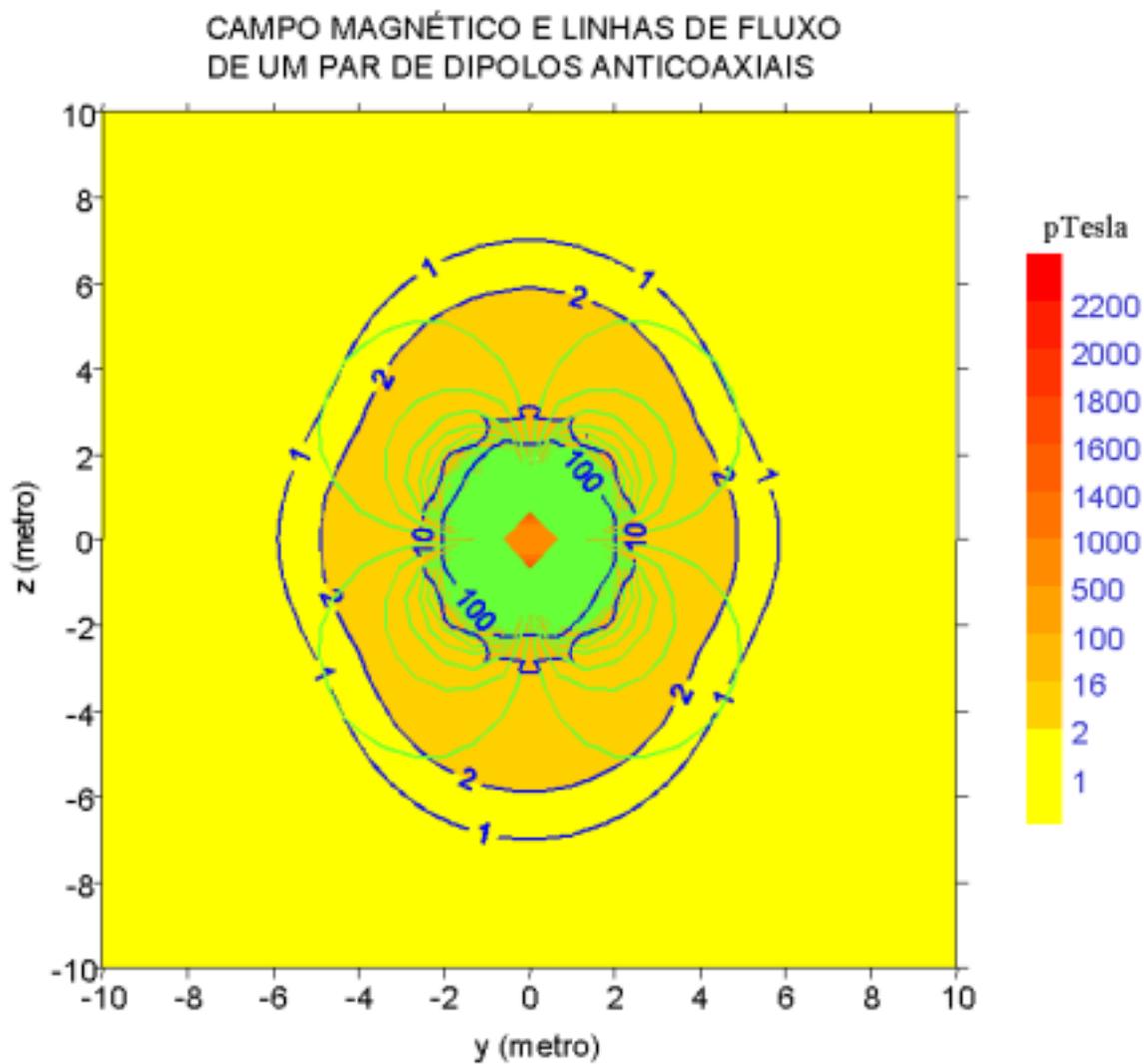


Figura 26 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.25\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.25\text{m}$).

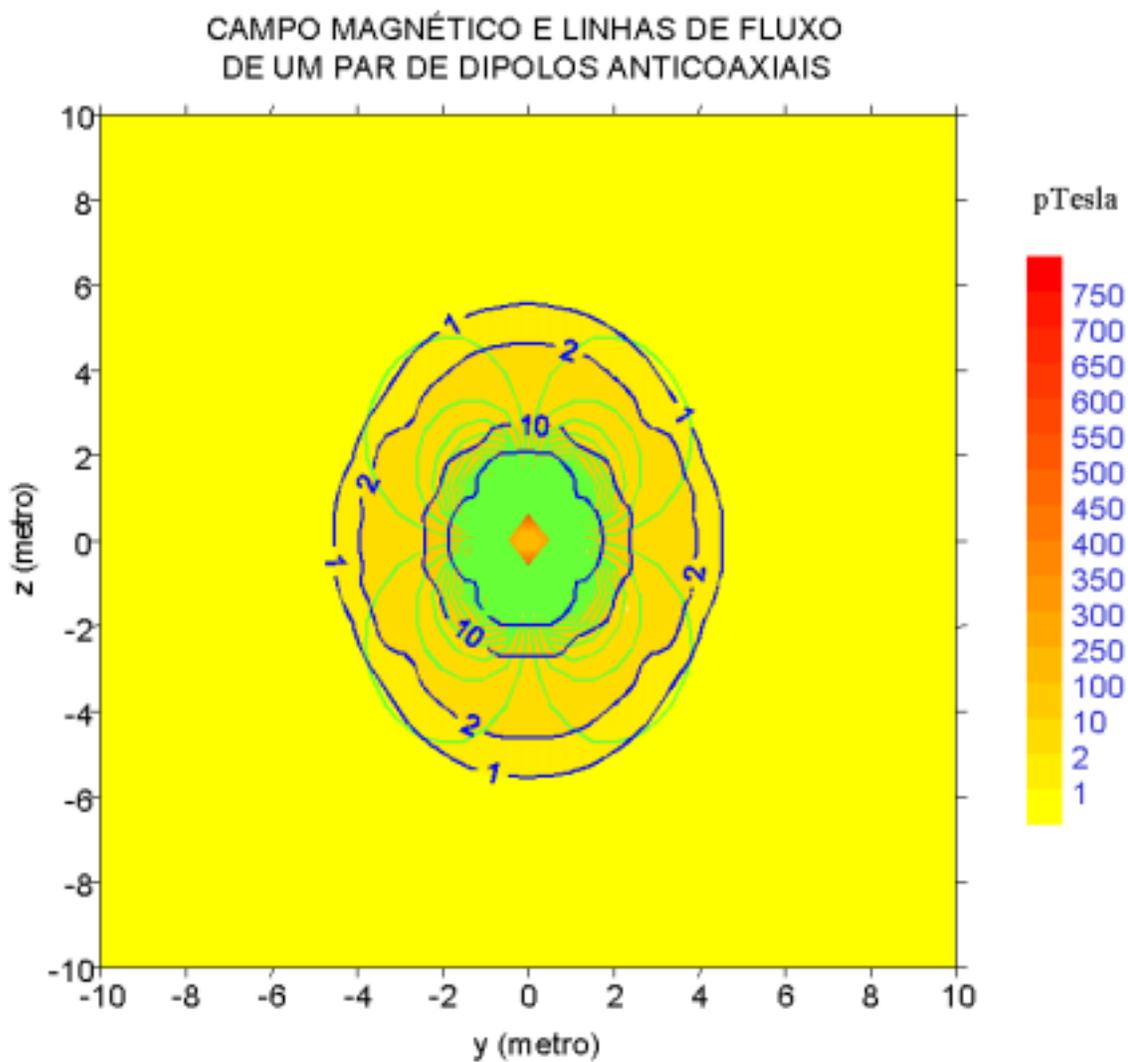


Figura 27 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos antiaxiais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.1\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.1\text{m}$).

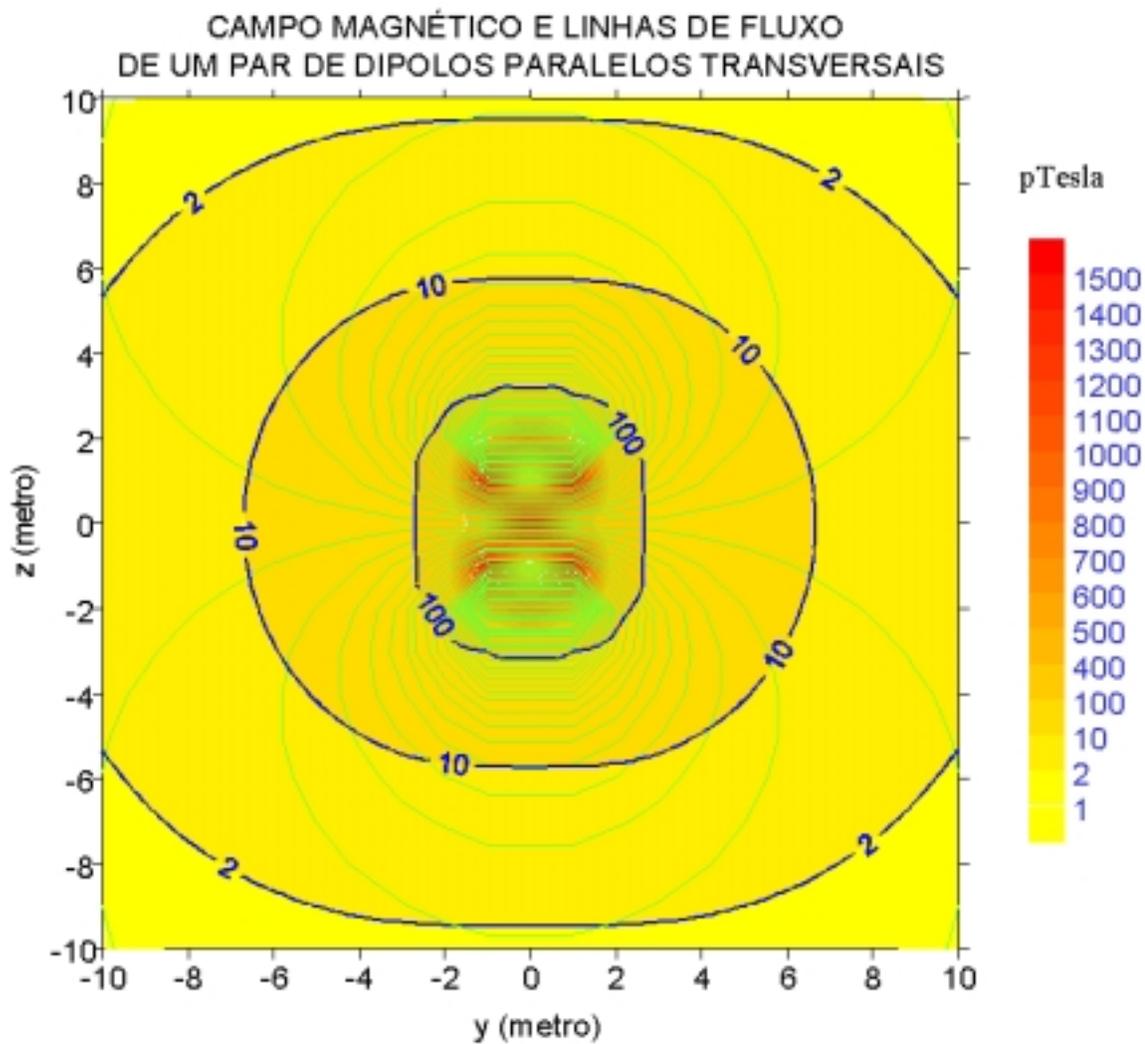


Figura 28 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos paralelos transversais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=1\text{m})$. O segundo dipolo está posicionado no ponto $(r=0, z=-1\text{m})$.

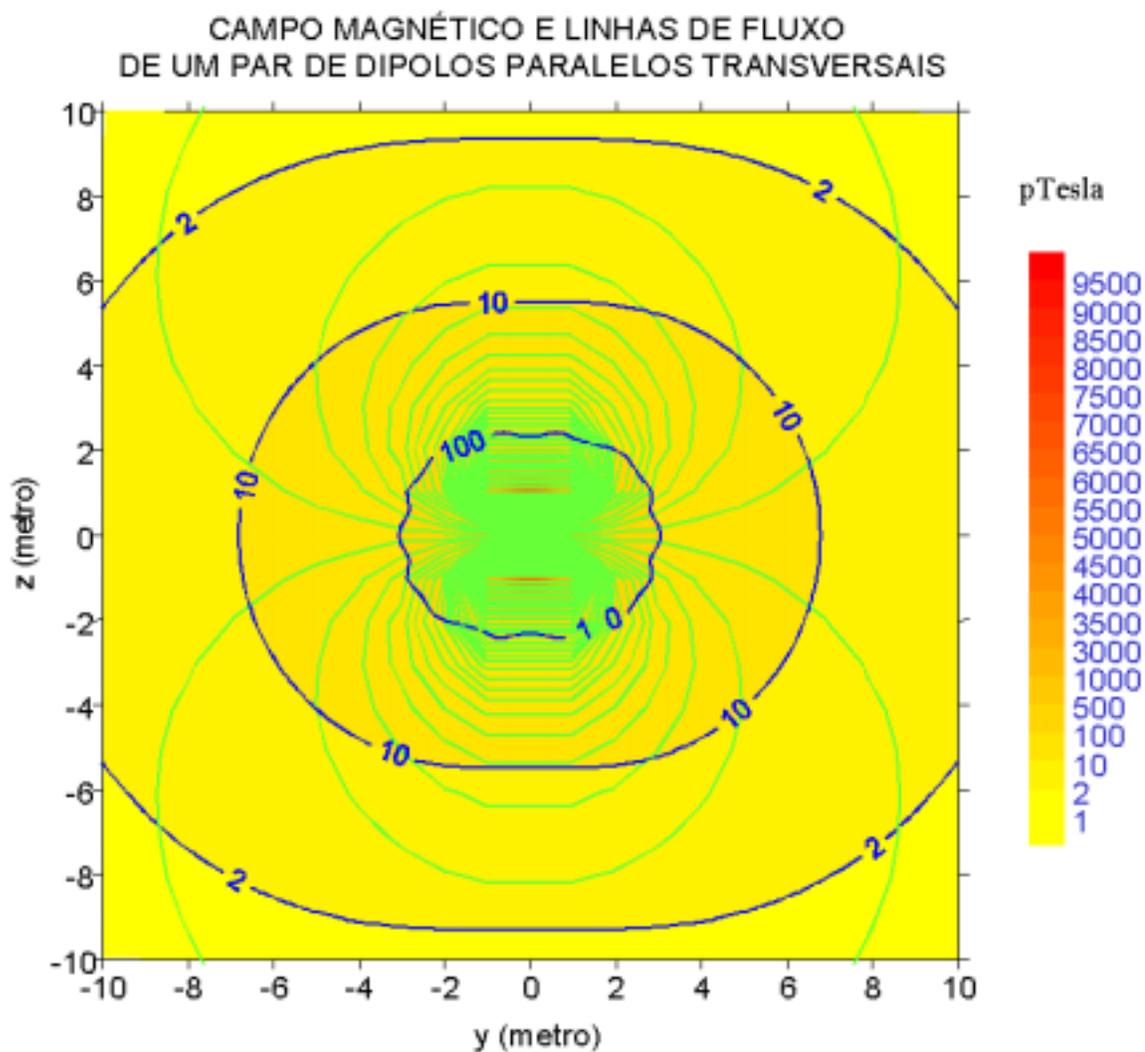


Figura 29 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos paralelos transversais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.5\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.5\text{m}$).

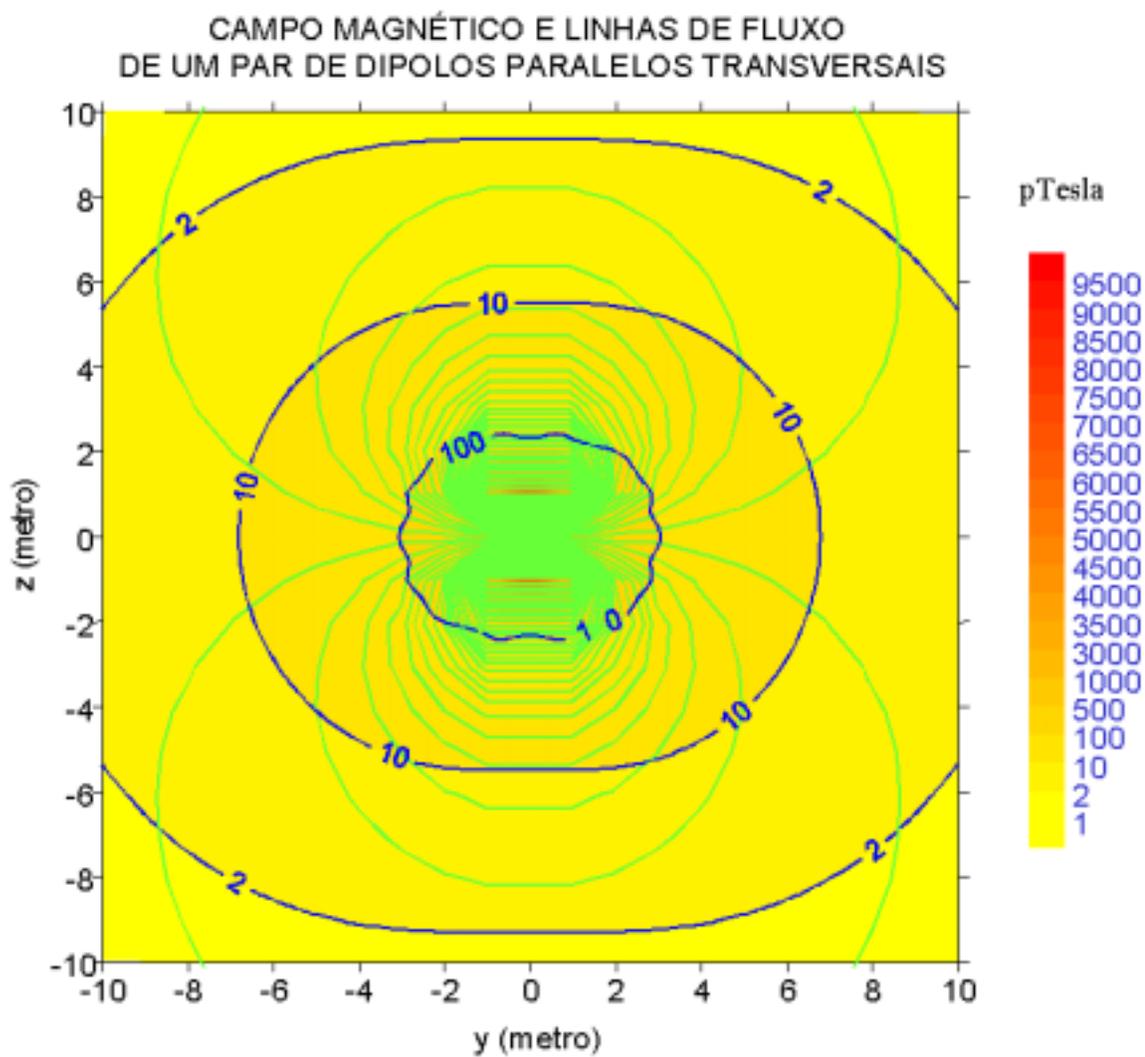


Figura 30 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos paralelos transversais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.25\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.25\text{m}$).

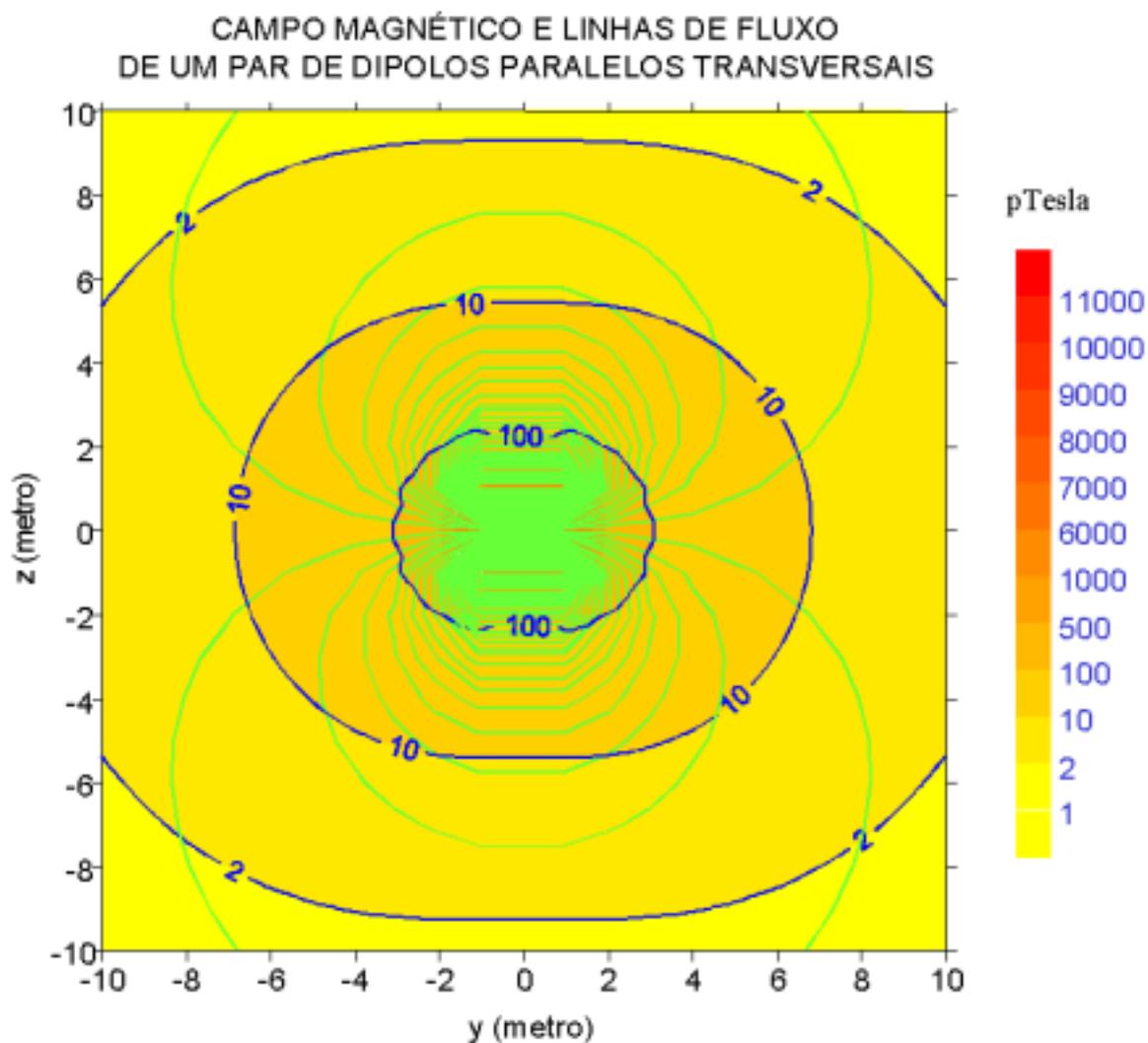


Figura 31 - Campo magnético e linhas de fluxo de um par de dipolos paralelos transversais. O primeiro dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=0.1\text{m}$). O segundo dipolo está posicionado no ponto ($r=0$, $z=-0.1\text{m}$).

.4 - CONCLUSÃO

O método EM de indução de poço que utiliza dois transmissores na sonda de indução oferece vantagens sobre o transmissor convencional com um único transmissor. Dependendo da aplicação, por exemplo, esta sonda de indução convencional tem um bom acoplamento com camadas grossas. Entretanto o sistema duplo de transmissores tem um bom potencial para acoplamento com finas camadas.

Primeiramente, as configurações de pares de dipolos coaxiais e antiparalelos transversais ao eixo do apresentam na região central ao redor do poço contribuição da componente vertical para o campo magnético que irá sofrer influência principalmente da lama do poço, zona lavada e zona invadida. Estes sistemas terão pouca resolução radial. Deste modo, o uso destes sistemas nos perfis de indução não são desejáveis.

Em contraste, as configurações de pares de dipolos transversais e dipolos anticoaxiais ao eixo do poço apresentam na região central um feixe estreito de campo magnético. Pelas suas características, estas configurações são recomendadas na perfilagem de indução de poço por oferecer maior profundidade de investigação e melhor resolução vertical. Entretanto o feixe dos dipolos paralelos transversais apresenta melhores características em relação ao feixe dos dipolos anticoaxiais.

Deste modo, a indução magnética e as linhas de indução para as configurações de dois dipolos magnéticos paralelos transversais ao eixo do poço e dois dipolos magnéticos anticoaxiais ao eixo do poço são analisadas com alguns espaçamentos entre os dois dipolos magnéticos transmissores e as linhas de indução são agrupadas desde a distância entre os dipolos magnéticos $L=2$ m até a distância $L=0.2$ m. Logo, quanto mais próximos os dois dipolos magnéticos mais

agrupadas estarão as linhas de indução magnética como também as suas direções serão mais transversais ao eixo do poço. Deste modo, a distância entre os dipolos magnéticos pode ser mínima e o feixe será direcional transversal ao eixo do poço. Se a distância entre os dipolos for maior, por exemplo, $L=10$ m as linhas de indução são transversais ao eixo do poço, entretanto perde agrupamento decrescendo a intensidade da indução magnética.

A configuração de dois dipolos magnéticos paralelos transversais ao eixo do poço tem a propriedade de investigação azimutal podendo distinguir a posição que se encontra um corpo.

Finalmente, as configurações de dois dipolos magnéticos paralelos transversais ao eixo do poço e dois dipolos magnéticos antiaxiais ao eixo do poço focalizam as linhas de indução transversalmente ao eixo do poço gerando um feixe fino e direcional concentrando energia em uma porção de volume estreita a partir dos transmissores tendo um bom potencial para melhorar a resolução vertical da sonda de indução EM.

O fato de diminuirmos a potência dos transmissores minimiza o problema de camadas adjacentes e também de fontes de ruídos.

Como a configuração com dois transmissores EM apresenta um bom potencial para melhorar a resolução vertical da sonda de indução, futuros trabalhos têm que ser implementados com a presença de um receptor que pode ser posicionado no ponto central entre os dois transmissores porque neste ponto o campo magnético resultante dos dois transmissores tem pouca intensidade não tendo uma grande contribuição para causar sinais de campo primário indesejáveis à recepção do sinal.

Estes sistemas duplos de transmissores EM podem ser empregados tanto no poço como na superfície com a escolha da direção do campo e sua focalização dependendo da geometria dos corpos alvos e seu ambiente geológico. Estudos posteriores devem ser realizados colocando-se corpos condutivos e camadas para uma avaliação das respostas dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, P. R. de 1993. *Estudo da resposta de perfilagem de indução de camadas finas com diferentes arranjos de bobinas: modelamento analógico*. Belém : Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 74p. (Tese de Mestrado).
- HAGIWARA, T. 1985. A focused very high frequency induction log. In: ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 55. Houston. *Anais do Annual Meeting of SEG Houston* : SEG Extended abstracts, p. 79-81.
- MONTENEGRO, J.F.B. 1991. *Estudo da resposta de diferentes arranjos de bobinas na perfilagem de indução de poço: modelamento analógico*. Belém : Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 64p. (Tese de Mestrado).
- SCHLUMBERGER. 1989. *Log Interpretation Principles/ Applications*. Houston, Schlumberger Educational Services. 13-19p.
- SOUZA, N.P.R. de 1992. *Deteção de fraturas no poço usando ferramenta de indução coplanar: modelamento analógico*. Belém : Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 63p. (Tese de Mestrado).
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press. 843p.

APÊNDICE

O campo magnético \vec{B} nas vizinhanças de uma pequena bobina localizada no plano xy ou de um dipolo magnético localizado no ponto $P(r=0, z=0)$ e suas componentes radial r e vertical z em coordenadas cilíndricas (ver Figura 2) é dado pela equação (3) (Telford et al 1976). Na Figura 32 o sistema de coordenadas para um dipolo coaxial é $x'y'z'$. Este sistema é rotacionado de 90° em torno do eixo x' gerando um novo sistema de coordenadas $x y z$. A relação entre os dois sistemas é: $x'=x, y'=-z$ e $z'=y$. Para $\theta'=\pi/2$ temos em coordenadas cilíndricas que $r'=-z, z'=r, \vec{i}'_r = -\vec{i}_z$ e $\vec{i}'_z = \vec{i}_r$.

Na Figura 32 o campo magnético é

$$\vec{B} = \frac{m \mu_o}{4 \pi ((r')^2 + (z')^2)^{5/2}} \left\{ 3 r' z' \vec{i}'_r + (2 (z')^2 - (r')^2) \vec{i}'_z \right\},$$

e se rotacionarmos sobre o eixo x' de 90° , o campo magnético para o novo sistema de coordenadas será:

ROTAÇÃO

$$\lambda_{11} = \cos(x, x') = \cos 0^\circ = 1,$$

$$\lambda_{12} = \cos(x, y') = \cos 90^\circ = 0,$$

$$\lambda_{13} = \cos(x, z') = \cos 90^\circ = 0,$$

$$\lambda_{21} = \cos(y, x') = \cos 90^\circ = 0,$$

$$\lambda_{22} = \cos(y, y') = \cos 90^\circ = 0,$$

$$\lambda_{23} = \cos(y, z') = \cos 0^\circ = 1,$$

$$\lambda_{31} = \cos(z, x') = \cos 90^\circ = 0,$$

$$\lambda_{32} = \cos(z, y') = \cos 180^\circ = -1,$$

$$\lambda_{33} = \cos(z, z') = \cos 90^\circ = 0$$

e

$$x = \lambda_{11} x' + \lambda_{21} y' + \lambda_{31} z' = x',$$

$$y = \lambda_{21} x' + \lambda_{22} y' + \lambda_{23} z' = z', \quad (\text{I})$$

$$z = \lambda_{31} x' + \lambda_{32} y' + \lambda_{33} z' = -y', \quad (\text{II})$$

em coordenadas cilíndricas

$$x' = r' \cos \theta' ,$$

$$y' = r' \sin \theta' ,$$

$$z' = z' ,$$

$$(r')^2 = (x')^2 + (y')^2 ,$$

e

$$x = r \cos \theta ,$$

$$y = r \sin \theta ,$$

$$z = z ,$$

$$r^2 = x^2 + y^2 .$$

Para o caso de $\theta' = \pi/2$ e depois disso realizarmos a rotação sobre o eixo x' de 90° , o ângulo entre x e r é $\theta = \pi/2$ (ver Figura 32) assim

$$x' = 0 ,$$

$$y' = r' , \tag{III}$$

$$x = 0 ,$$

$$y = r , \tag{IV}$$

de (II) e (III) temos

$$r' = -z$$

e de (I) e (IV) temos

$$z' = r ,$$

Para os vetores unitários temos que $\vec{i}'_r = -\vec{i}_z$ e $\vec{i}'_z = \vec{i}_r$, ver Figura 32.

Assim o campo magnético de um dipolo transversal ao eixo do poço não é simétrico em coordenadas cilíndricas mas pode ser calculado para o plano yz em que $\theta = \pi/2$.

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi((-z)^2 + r^2)^{5/2}} \left\{ 3(-z)r(-\vec{i}_z) + (2r^2 - (-z)^2)\vec{i}_r \right\} ,$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \left\{ (2r^2 - z^2)\vec{i}_r + 3rz\vec{i}_z \right\} .$$

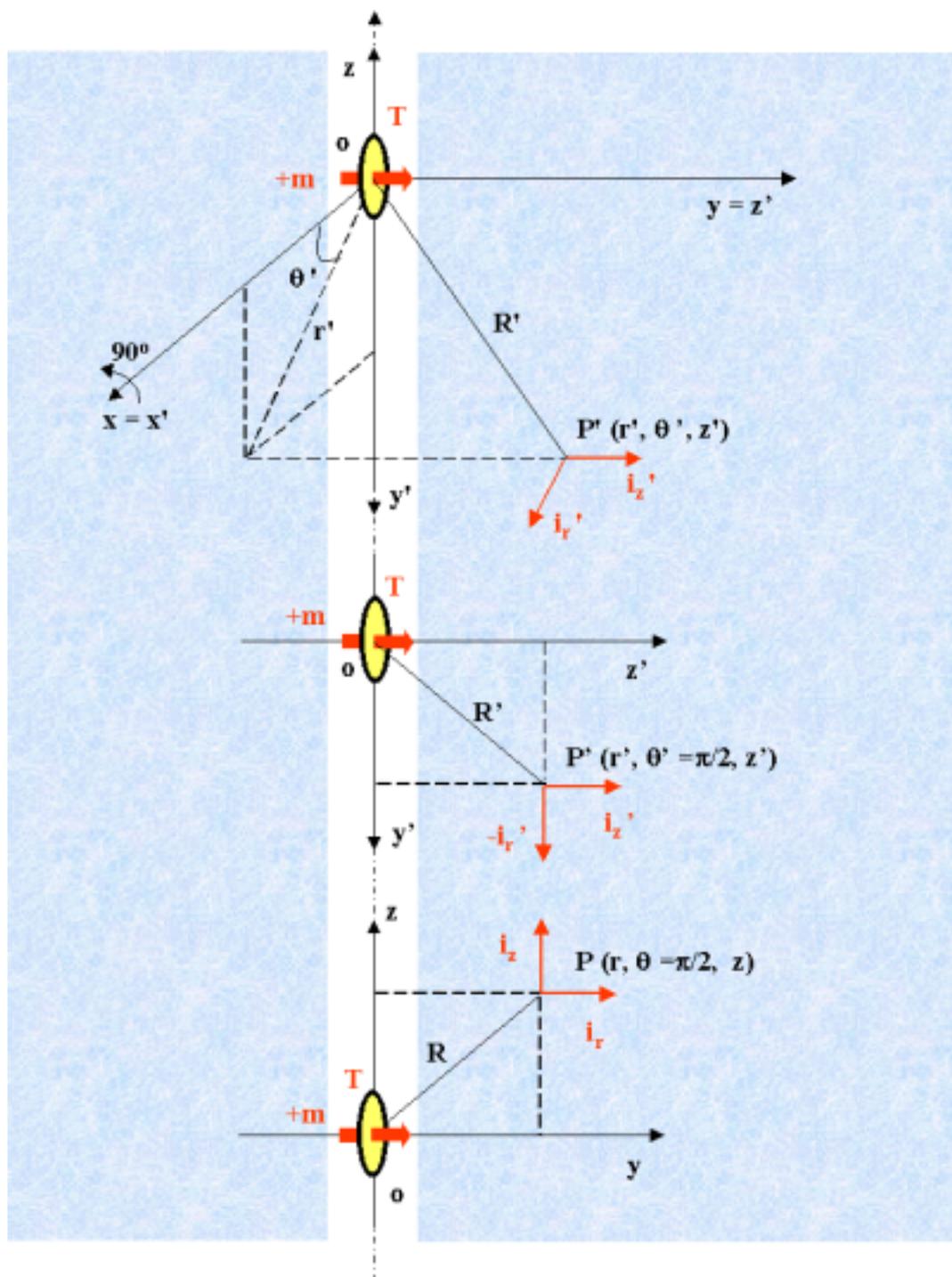


Figura 32 – Diagrama esquemático de um dipolo magnético transversal ao eixo do poço no plano yz .