



Física 12.º ano
01 MEDEA 17
Relatório das atividades propostas e
Atividades idealizadas para a fase 2

versão: 1,1

RADII0

Mafalda Sales, Miguel Ortigão Costa, David Nunes-Viciosa,
José Pedro do Amaral (professor)

6 de março de 2026

Índice

1	Relatório das atividades propostas	2
1.1	Objectivos	2
1.2	Métodos	2
1.3	Resultados	3
1.3.1	Cabos juntos	3
1.3.2	Cabos afastados	4
1.4	Discussão	5
1.4.1	Região próxima e região longínqua	5
1.4.2	Impacto de correntes de muito alta tensão	5
1.4.3	Limites de exposição da OMS	5
2	Actividades idealizadas para a fase 2	7
2.1	Objectivos	7
2.2	Métodos	7
2.3	Análise SIG	7

1. Relatório das atividades propostas

1.1 Objectivos

Nesta actividade, mapeou-se o campo magnético produzido por dois cabos eléctricos percorridos por correntes antiparalelas, usando um medidor de campos magnéticos (Spectran NF-5010), e representou-se a sua distribuição espacial em termos absolutos e vectoriais.

A natureza vectorial dos campos electromagnéticos dificulta tanto a sua representação como a compreensão tridimensional da sua distribuição. Por essa razão, o mapeamento incidiu sobretudo no módulo do campo ($|B|$), sem prejuízo de uma interpretação qualitativa da sua estrutura vectorial ou da exploração das medições direccionais disponíveis no Spectran.

1.2 Métodos

A experiência consistiu em medir o módulo do campo magnético $|B|$ à volta de dois cabos de cobre de $2,5 \text{ mm}^2$ com corrente alterna de 230 V sob carga de um secador de cabelo de potência variável. O campo foi medido ao longo de um transecto ortogonal ao eixo dos cabos, sobre a superfície de uma bancada de madeira, deslocando o Spectran NF-5010 ao longo de uma régua com passos de 1 cm. O sensor triaxial do aparelho foi configurado em modo 3D e modo POWER (banda 45–65 Hz) de forma a isolar a componente a 50 Hz da rede eléctrica e suprimir interferências a outras frequências. Para cada posição foram registadas três repetições, a partir das quais se calculou a média para cada posição.

A experiência foi realizada em duas etapas: na primeira, os cabos estavam o mais juntos possível (encostados, com separação efectiva da ordem de poucos milímetros determinada pela espessura do isolamento); na segunda, os cabos estavam afastados 10 cm um do outro, percorrendo o transecto ao longo de toda a largura do par de cabos, incluindo as regiões exteriores a cada um deles.

A corrente eficaz no circuito foi estimada a partir da potência medida com um medidor de watts doméstico e da tensão RMS da rede eléctrica (230 V):

$$I = \frac{P}{V}$$

Para a potência máxima utilizada ($P = 1388,7 \text{ W}$), obtém-se $I \approx 6,04 \text{ A}$.

Para modelar os dados experimentais, partimos da lei de Biot-Savart aplicada ao caso especial de um fio rectilíneo infinito, que se reduz à lei de Ampère para geometria cilíndrica:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

onde r é a distância perpendicular ao fio. O campo magnético é perpendicular ao plano definido pelo fio e pelo ponto de observação.

Para dois fios com correntes opostas, aplica-se o princípio de sobreposição — o campo total é a soma vectorial dos campos individuais de cada fio. Com a geometria da experiência, em que o sensor se desloca a uma altura h acima do plano dos cabos ao longo de um transecto, as componentes horizontal e vertical do campo resultante são:

$$|B(x)| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{h}{(x-x_1)^2 + h^2} - \frac{h}{(x-x_2)^2 + h^2} \right)^2 + \left(\frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + h^2} - \frac{x-x_2}{(x-x_2)^2 + h^2} \right)^2}$$

onde x_1 e x_2 são as posições dos dois cabos no transecto, h é a altura do sensor acima dos cabos e I é a corrente eficaz.

Para implementar os modelos, analisar os dados e produzir os gráficos, utilizou-se a plataforma estatística R, tendo o ajuste sido realizado por minimização directa da soma dos quadrados dos resíduos (RSS) com o método L-BFGS-B implementado na função `optim()`.

1.3 Resultados

1.3.1 Cabos juntos

Começámos as medições com uma recolha de dados exploratória que serviu para a preparação das outras medições (Fig. 1). Nesta recolha, o aparelho foi regulado para a potência mínima e os valores medidos ao longo de um transecto longo com 31 medições afastadas 1 cm entre si. As figuras 1 e 2 mostram que, com os cabos juntos, o perfil de $|B|$ ao longo do transecto exhibe um máximo único e bem definido junto à posição dos cabos, decaindo monotonicamente para ambos os lados. Este comportamento é consistente com o de um dipolo magnético linear cuja separação entre condutores é muito inferior à distância de medição. Na região longínqua (distâncias muito superiores à separação entre cabos), o campo decai aproximadamente como $1/r^2$, muito mais rapidamente do que o $1/r$ de um condutor isolado. Na região próxima (distâncias comparáveis ou inferiores à separação entre cabos), o campo de cada condutor domina individualmente e o decaimento aproxima-se de $1/r$.

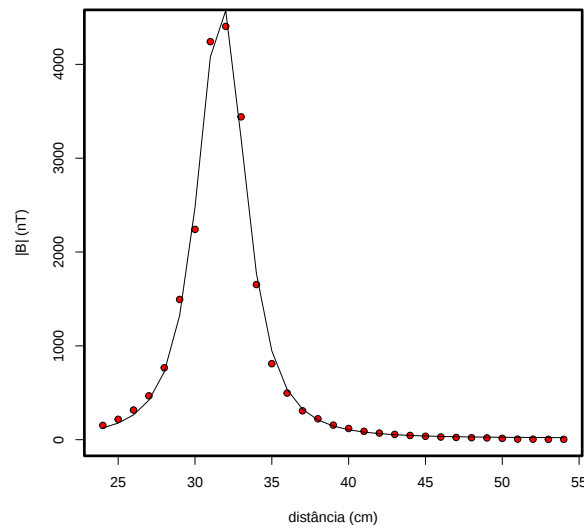


Figura 1. Módulo do campo magnético ($|B|$) de dois cabos eléctricos de cobre de $2,5 \text{ mm}^2$ juntos. $|B|$ foi medido ao longo de um transecto ortogonal ao correr dos cabos e sobre a superfície de uma bancada de madeira. O aparelho ligado ao sistema estava regulado para uma potência mínima (419,7 W). Os pontos vermelhos representam as médias dos valores medidos e a linha preta um ajuste ao modelo teórico. Esta recolha de dados serviu sobretudo de manobra exploratória para a preparação das outras medições.

A comparação entre as três potências revela que $|B|$ escala linearmente com a corrente, como previsto pelo modelo teórico, confirmando a validade da lei de Ampère nas condições experimentais.

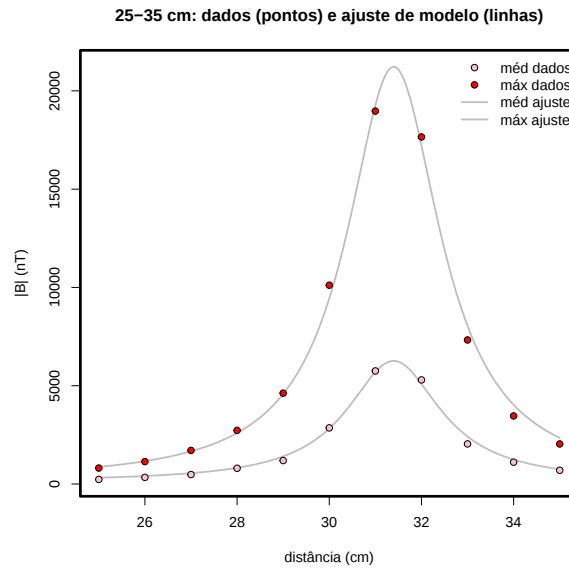


Figura 2. Módulo do campo magnético ($|B|$) de dois cabos eléctricos de cobre de $2,5 \text{ mm}^2$ juntos. $|B|$ foi medido ao longo de um transecto ortogonal ao correr dos cabos e sobre a superfície de uma bancada de madeira. O teste foi feito com o aparelho ligado ao sistema regulado para uma potência média (420,9 W) e para uma potência máxima (1388,7 W).

1.3.2 Cabos afastados

A figura 3 ilustra o perfil de $|B|$ com os cabos afastados 10 cm. Observam-se dois máximos locais correspondentes às posições dos dois cabos, separados por um mínimo relativo na região intermédia onde os campos dos dois condutores se subtraem parcialmente. Para além de cada cabo, o campo decresce rapidamente devido ao cancelamento progressivo entre as contribuições de sentido oposto dos dois condutores.

O ajuste do modelo teórico aos dados experimentais ($R^2 = 0,990$, $\text{RMSE} = 2,45 \text{ } \mu\text{T}$) recupera as posições dos cabos ($x_1 = 12,4 \text{ cm}$, $x_2 = 22,5 \text{ cm}$, separação = $10,1 \text{ cm}$) e a altura efectiva do sensor acima dos cabos ($h = 1,52 \text{ cm}$), consistente com a posição interna do magnetómetro triaxial no interior do Spectran.

A simetria do problema é evidente na figura 3: o perfil de $|B|$ é aproximadamente simétrico em relação ao ponto médio entre os dois cabos, reflectindo a simetria geométrica e eléctrica do sistema. Os dois máximos têm amplitudes ligeiramente diferentes ($\sim 74,6 \text{ } \mu\text{T}$ e $\sim 83,5 \text{ } \mu\text{T}$), o que se atribui a pequenas assimetrias na posição do sensor relativamente aos cabos durante as medições.

A figura 4 representa o campo vectorial $\vec{B}$ num plano perpendicular aos cabos. As setas evidenciam a estrutura dipolar do campo: entre os dois cabos, as contribuições de ambos os condutores somam-se, resultando num campo intenso; nas regiões exteriores, os campos de sentido oposto cancelam-se progressivamente. Abaixo da mesa ($y < 0$), o campo espelha o da região superior, como se esperaria por simetria. Esta representação permite uma interpretação qualitativa da distribuição tridimensional do campo que não é acessível a partir do simples perfil de $|B|$ ao longo do transecto.

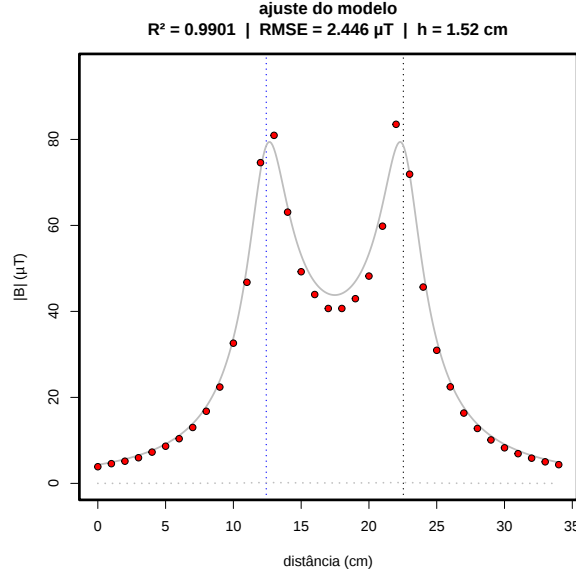


Figura 3. Módulo do campo magnético ($|B|$) de dois cabos eléctricos de cobre de $2,5 \text{ mm}^2$ afastados 10 cm um do outro. $|B|$ foi medido ao longo de um transecto ortogonal ao correr dos cabos e sobre a superfície de uma bancada de madeira. O teste foi feito com o aparelho ligado ao sistema regulado para uma potência máxima (1388,7 W). Os pontos representam a média dos valores medidos e a linha representa o ajuste ao modelo teórico. As linhas pontilhadas verticais representam a posição relativa dos cabos eléctricos.

1.4 Discussão

1.4.1 Região próxima e região longínqua

A fronteira entre a região próxima e a região longínqua é definida pela distância característica d de separação entre os cabos. Para $r \ll d$, o campo de cada condutor domina individualmente e o decaimento é aproximadamente $1/r$; para $r \gg d$, os dois campos cancelam-se quase completamente e o campo resultante decai como $1/r^2$. Para os cabos juntos (separação de poucos mm), a região longínqua começa praticamente à distância de contacto com o isolamento. Para os cabos afastados 10 cm, a transição ocorre a distâncias da ordem de 5–10 cm, sendo claramente visível na figura 3 como a inflexão no perfil de $|B|$ nas regiões exteriores a cada cabo.

1.4.2 Impacto de correntes de muito alta tensão

Os cabos de muito alta tensão (MAT) transportam correntes da ordem do kA. Escalando os resultados experimentais linearmente com a corrente, uma linha de 400 kV com $I = 1000 \text{ A}$ produziria, a 1 m dos condutores com separação típica de vários metros, campos da ordem de dezenas a centenas de μT — valores que podem aproximar-se ou superar os limites de exposição recomendados para o público geral.

1.4.3 Limites de exposição da OMS

A Organização Mundial de Saúde recomenda, para exposição crónica do público geral a campos magnéticos de 50 Hz, um limite de $|B| = 100 \mu\text{T}$. Para os cabos juntos com separação efectiva $d \approx 3,5 \text{ mm}$ (diâmetro de cabo de $2,5 \text{ mm}^2$), o campo a $r = 1 \text{ m}$ é aproximadamente:

$$|B|_{1\text{m}} \approx \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{d}{r^2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times I}{\pi} \cdot \frac{0,0035}{1^2} = 1,4 \times 10^{-9} I \quad [\text{T}]$$

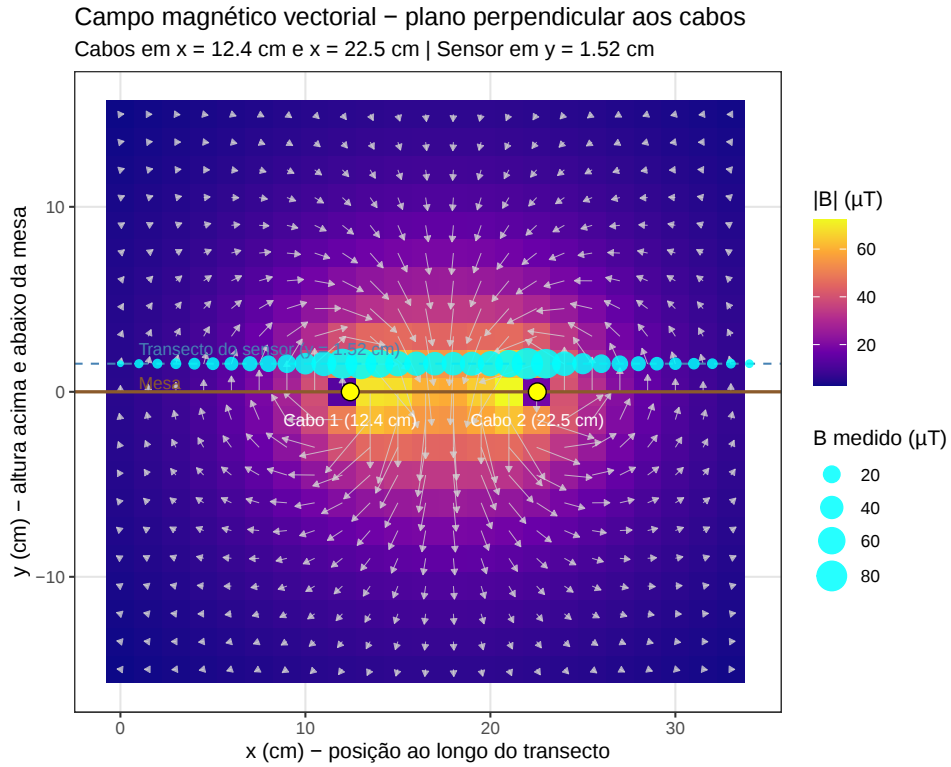


Figura 4. Simulação didáctica de uma fatia do campo magnético $\vec{B}$ num plano perpendicular aos dois cabos afastados 10 cm. Esta simulação foi produzida a partir dos parâmetros ajustados ao modelo teórico. As setas indicam a direcção e sentido do campo vectorial; a escala cromática representa o módulo $|B|$. Os círculos azul-ciano representam os valores medidos experimentalmente ao longo do transecto do sensor (linha tracejada azul, a $y = 1,52$ cm acima da mesa).

Para atingir $100 \mu\text{T} = 10^{-4} \text{ T}$, seria necessária uma corrente:

$$I = \frac{10^{-4}}{1,4 \times 10^{-9}} \approx 71\,000 \text{ A}$$

Ou seja, com cabos domésticos juntos, seriam necessárias correntes da ordem de dezenas de kA para atingir o limite da OMS a 1 m — valores completamente fora do alcance de instalações domésticas e mesmo da grande maioria das instalações industriais, o que ilustra a eficácia do cancelamento de campo entre condutores antiparalelos próximos como medida de mitigação da exposição a campos electromagnéticos.

2. Actividades idealizadas para a fase 2

2.1 Objectivos

O Colégio de São Tomás possui uma instalação eléctrica complexa que inclui painéis fotovoltaicos com cablagem localizada acima de salas de ocupação humana intensa. Pretende-se mapear o campo magnético de baixa frequência nos vários andares e espaços do colégio, correlacioná-lo com o padrão de uso humano e estimar a exposição efectiva integrada no tempo, por comparação com os limites da OMS ($|B| \leq 100 \mu\text{T}$ a 50 Hz). A componente inovadora consiste na integração dos dados numa plataforma SIG tridimensional que combine o mapeamento electromagnético com o uso humano do espaço.

2.2 Métodos

A amostragem combina duas abordagens. Numa primeira etapa, aplicar-se-á uma grelha de pontos com amostragem aleatória a todos os andares e espaços abertos, obtendo uma caracterização exploratória de base. Numa segunda etapa, nas zonas de maior interesse — inversores fotovoltaicos, cablagem DC, quadros eléctricos — realizar-se-á uma amostragem de granularidade fina com transectos regulares, aplicando o modelo teórico desenvolvido na fase 1.

As medições serão realizadas com o Spectran NF-5010 em modo 3D e modo POWER (45–65 Hz), com três repetições por ponto. Para isolar a contribuição fotovoltaica, mediremos com o sistema activo e inactivo. A cablagem DC será também analisada em modo Spectrum, dado o seu espectro de alta frequência associado à comutação do inversor.

Em cada ponto registar-se-ão as coordenadas tridimensionais, o espaço correspondente e o índice de exposição humana:

$$E = |B|_{\text{médio}} \times t_{\text{ocupação}}$$

2.3 Análise SIG

Os dados serão integrados em QGIS com extensão 3D, georreferenciados na planta do colégio. A sobreposição do mapa de $|B|$ com o mapa de uso humano permitirá identificar as zonas de maior exposição efectiva — que podem não coincidir com as de campo mais intenso — e produzir um mapa tridimensional de exposição visualizável em corte por andar. Este produto constitui uma ferramenta inédita aplicada a um edifício escolar, reutilizável pelo colégio para decisões futuras sobre localização de equipamentos e gestão de espaços.