

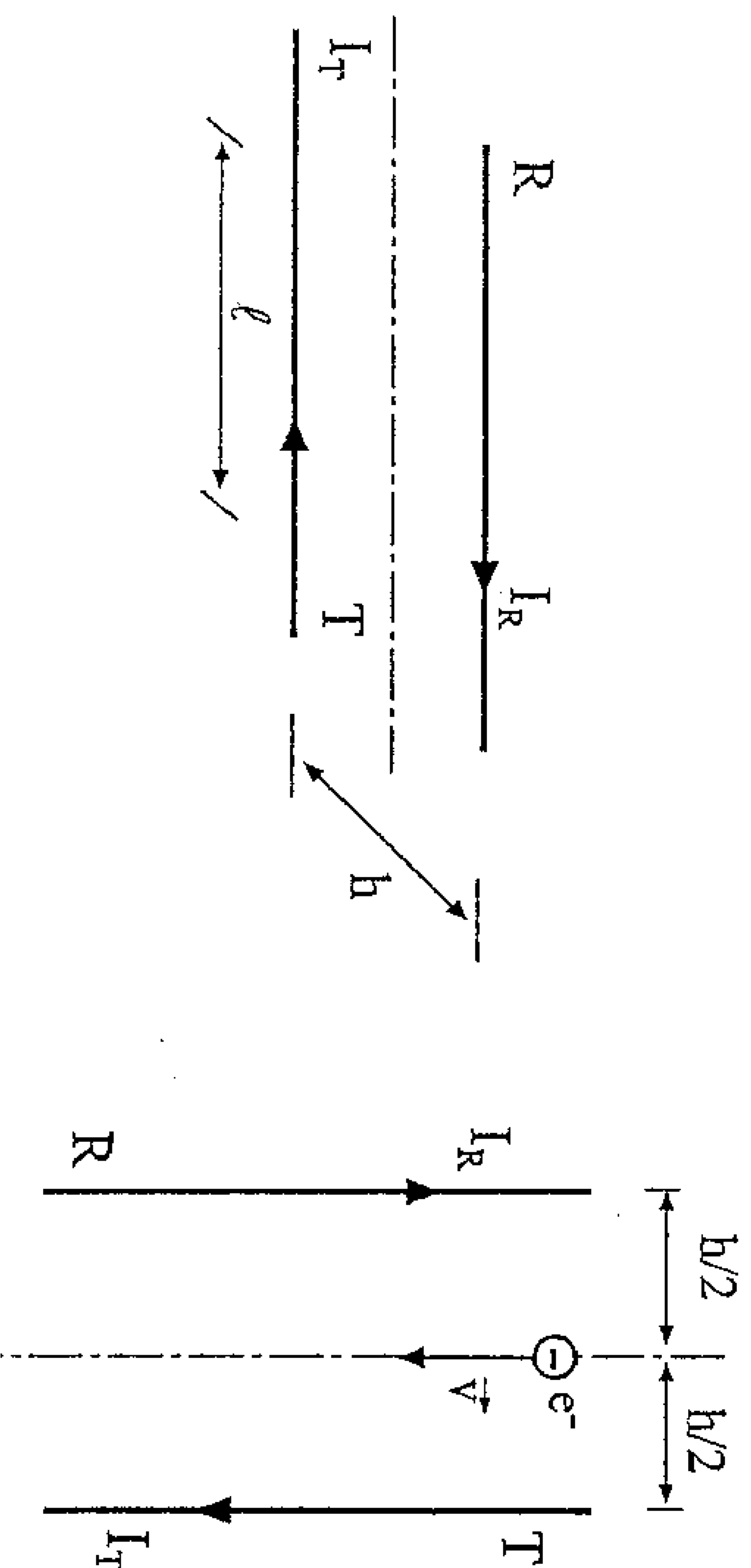
1.- Dos alambres conductores de cobre, el conductor R y el conductor T, rectos, paralelos, están separados una distancia h . La longitud de los alambres se considera infinita. Si por el conductor R circula una corriente eléctrica de intensidad I_R , y por el conductor T circula otra corriente de intensidad I_T , de sentido contrario, calcular:

a) la fuerza de origen magnético, \vec{F}_T , a la que está sometido un trozo de longitud ℓ del alambre T. (1 pto.)

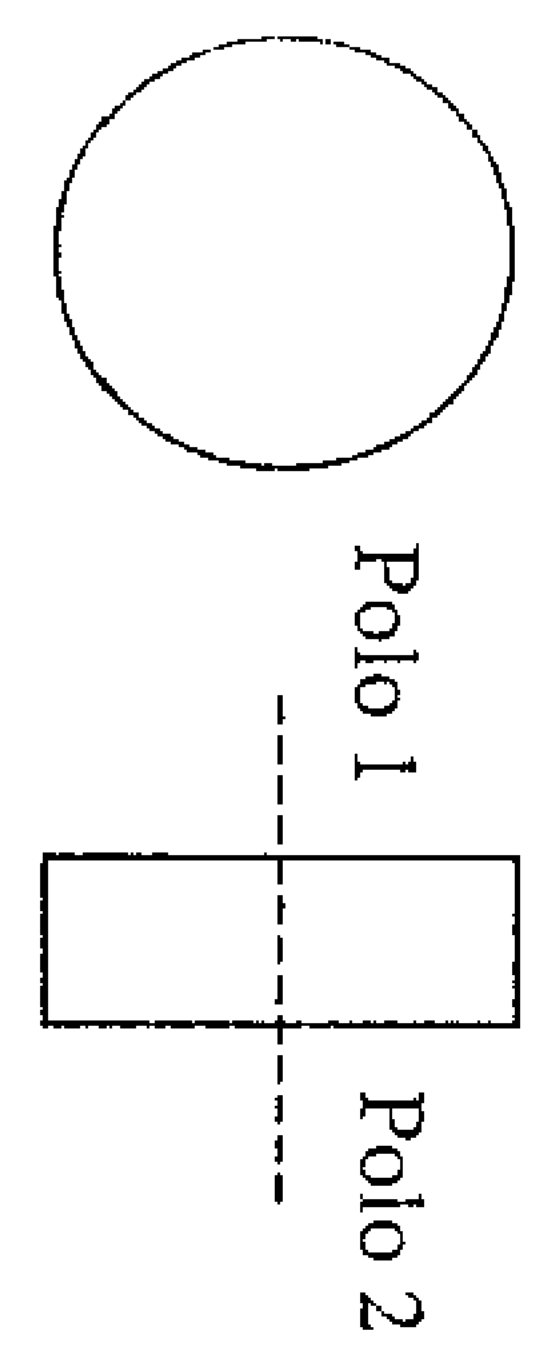
Un electrón se encuentra inicialmente en reposo en un punto del plano definido por los alambres y equidistante de ellos. Si se lanza con velocidad \vec{v} paralela a los alambres y en sentido de la corriente que circula por el alambre T, calcular:

b) la fuerza de origen magnético, \vec{F}_e , a la que se verá sometido el electrón. (1 pto.)

Datos: $I_R = 250$ A, $I_T = 433$ A, $h = 20$ cm, $\ell = 3$ m, $e^- = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C, $v = 6 \cdot 10^6$ m/s

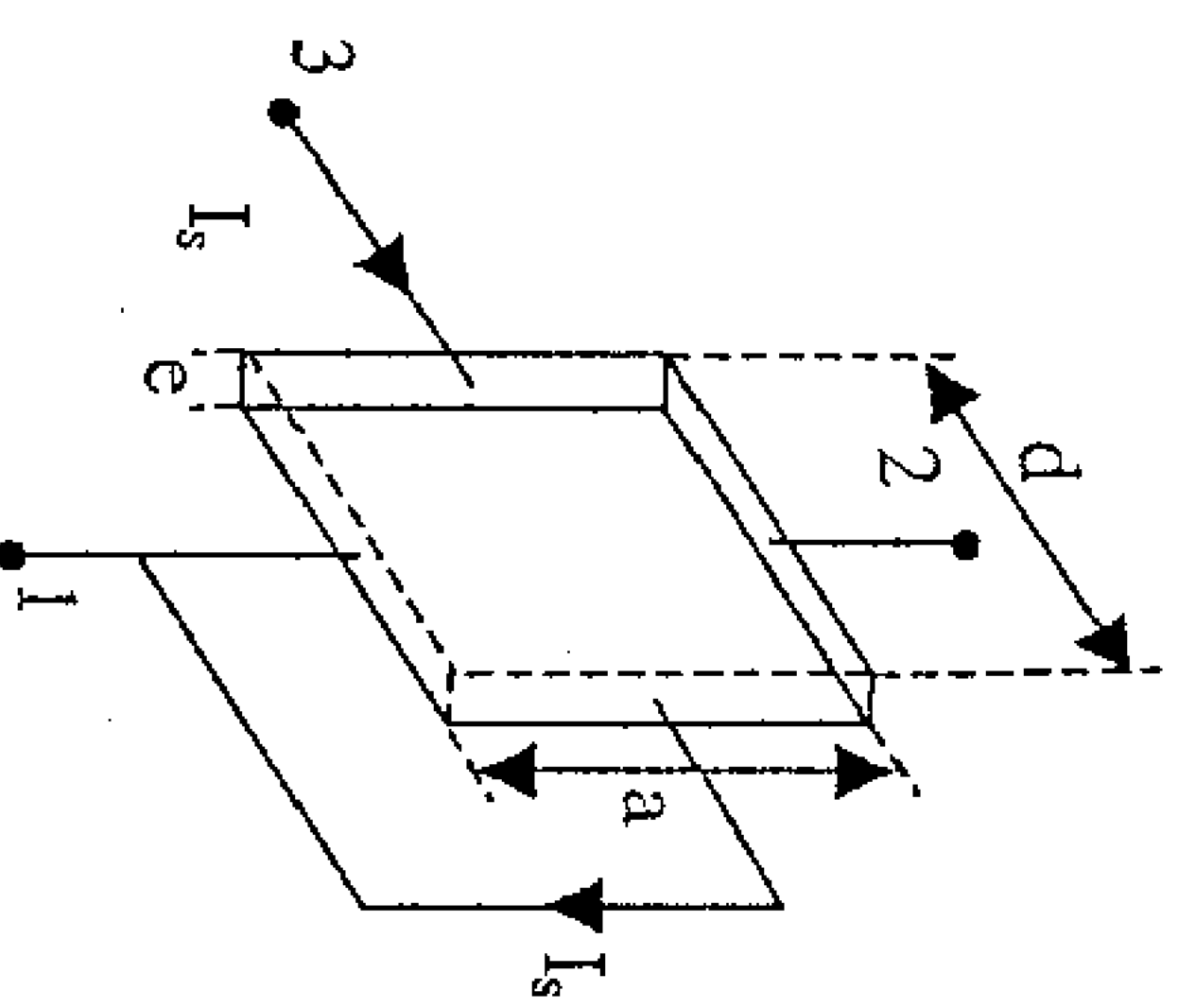


2.- Disponemos de un imán en forma de disco magnetizado axialmente como se muestra en la figura. Además tenemos un sensor Hall de las características geométricas marcadas en la figura. (El resto de sus parámetros característicos se indican en el apartado de datos.) Puede suponerse que el sensor es suficientemente pequeño como para que el campo magnético sea constante en todos sus puntos. La vista lateral del sensor Hall de la figura 2 será la utilizada en todos los casos representados en la figura 3.



Vista frontal

Vista Lateral



Vista en perspectiva



Vista lateral

Figura 1: Imán cilíndrico

Figura 2: Sensor Hall

Si colocamos el sensor en la posición 1, representada en la figura 3, y cambiamos su distancia x_0 al extremo del imán a los valores especificados en la tabla, obtenemos las diferencias de potencial $V_H = V_2 - V_1$, indicadas en la tabla. En ellas se ha incluido su signo adecuado.

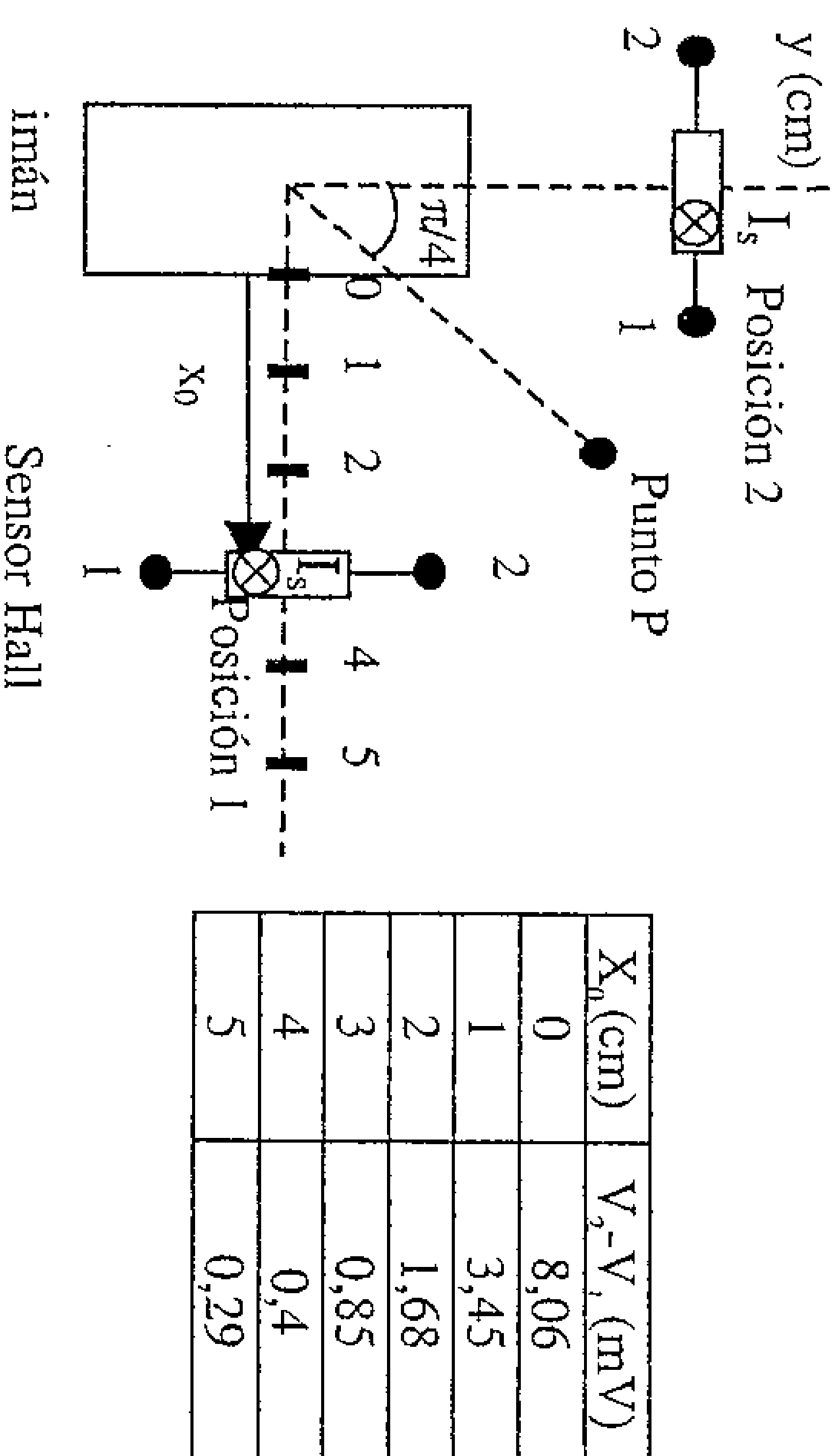


Figura 3

a) Calcular el módulo de B en cada punto x_0 e indicar si la cara del imán próxima al sensor es la norte o la sur. (1 punto)

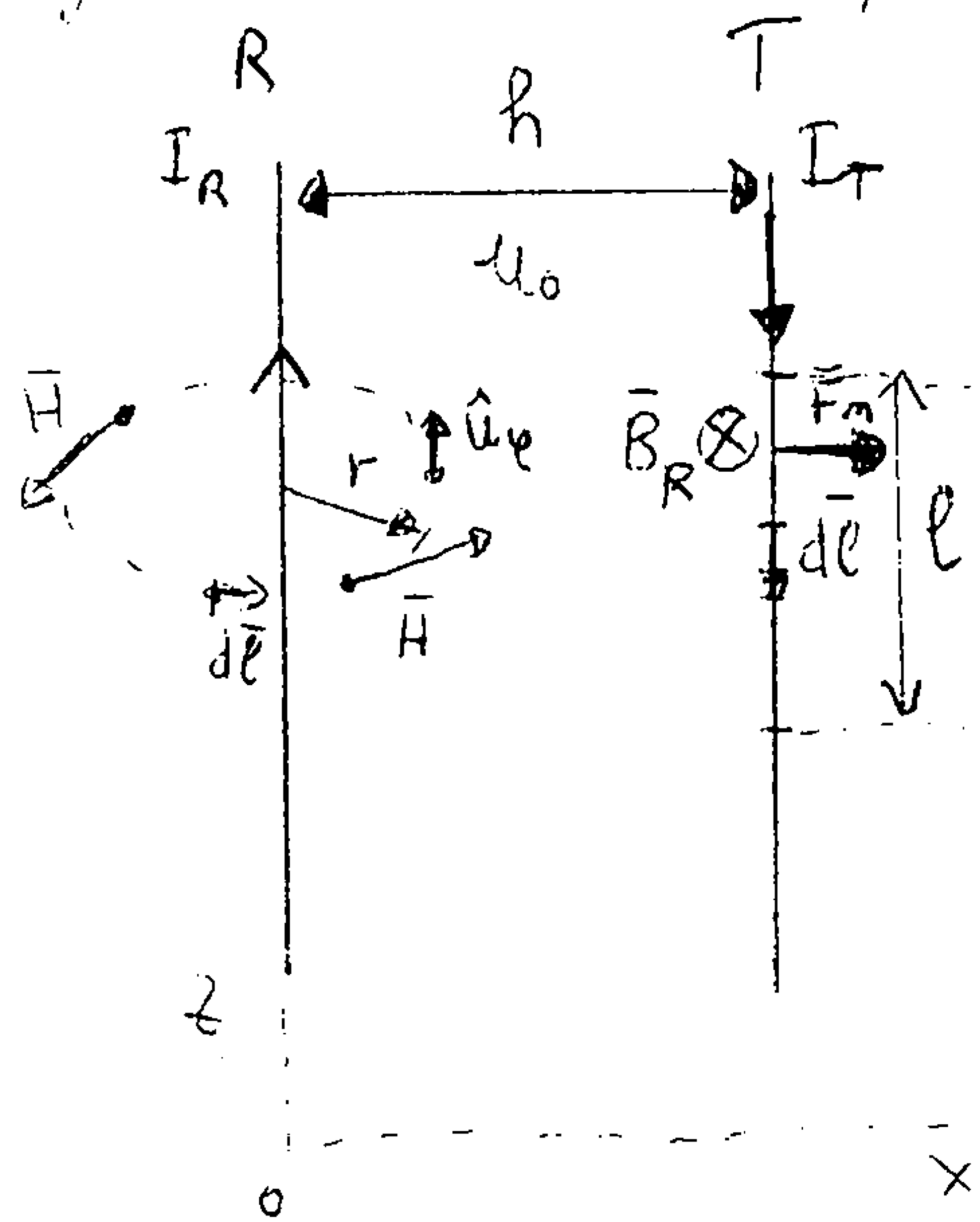
b) Si colocamos el sensor en la posición 2, representada en la figura (prestar especial atención a la colocación del sensor) calcular el valor de V_H sabiendo que en ese punto el módulo del campo magnético vale $B = 200$ G ($10000\text{G} = 1\text{T}$) (1 punto)

c) Si en el punto P representado en la figura colocamos una brújula, razonar cualitativamente la dirección en que se orientará, indicando claramente la posición de su lado norte. (1 punto)

Datos Sensor Hall: Constituido por un material semiconductor del tipo P. La corriente I_s inyectada por el terminal 3 del sensor está relacionada con la velocidad de los portadores \vec{v} así: $I_s = k_f \cdot |\vec{v}|$ siendo $k_f = 12,41 \cdot 10^3$ C/m, $I_s = 20$ mA; $e = 1$ mm; $a = 10$ mm; $d = 5$ mm.

CODIGO 5000
ESP. ELECTRÓNICAS
PRECIO 10'55 2/€

① Para resolver la parte a) del ejercicio supondremos que el cable R crea campo magn en la zona donde está el cable T y debido a éste aparece una fuerza magnética, a calcular.



Campo magnético creado por R.

(Aplicaré Ampere $\oint \vec{H} d\vec{\ell} = I_{\text{abr}}$)

Tomaré una trayect circular, de radio genérico r contrada en el cable R y en el plano \perp a su eje. El sentido de circulación será el dibujado.

$$\Rightarrow \oint \vec{H} d\vec{\ell} = \oint H dl = H \oint dl = H 2\pi r$$

$$I_{\text{abr}} = I_R$$

$$\vec{H}_R = \frac{I_R}{2\pi r} \hat{u}_\varphi$$

$$\vec{B}_R = \frac{\mu_0 I_R}{2\pi r} \hat{u}_\varphi$$

En los pto donde se encuentra el cable T el campo \vec{B} creado por R es \perp al plano del dibujo y su módulo vale $|\vec{B}_R(r=h)| = \frac{\mu_0 I_R}{2\pi h} = 0,25 \text{ mT}$

Para calcular la fuerza que ejerce este campo sobre el tramo de cable pedido usaremos la expresión: $d\vec{F} = I_T d\vec{\ell} \times \vec{B}_R$

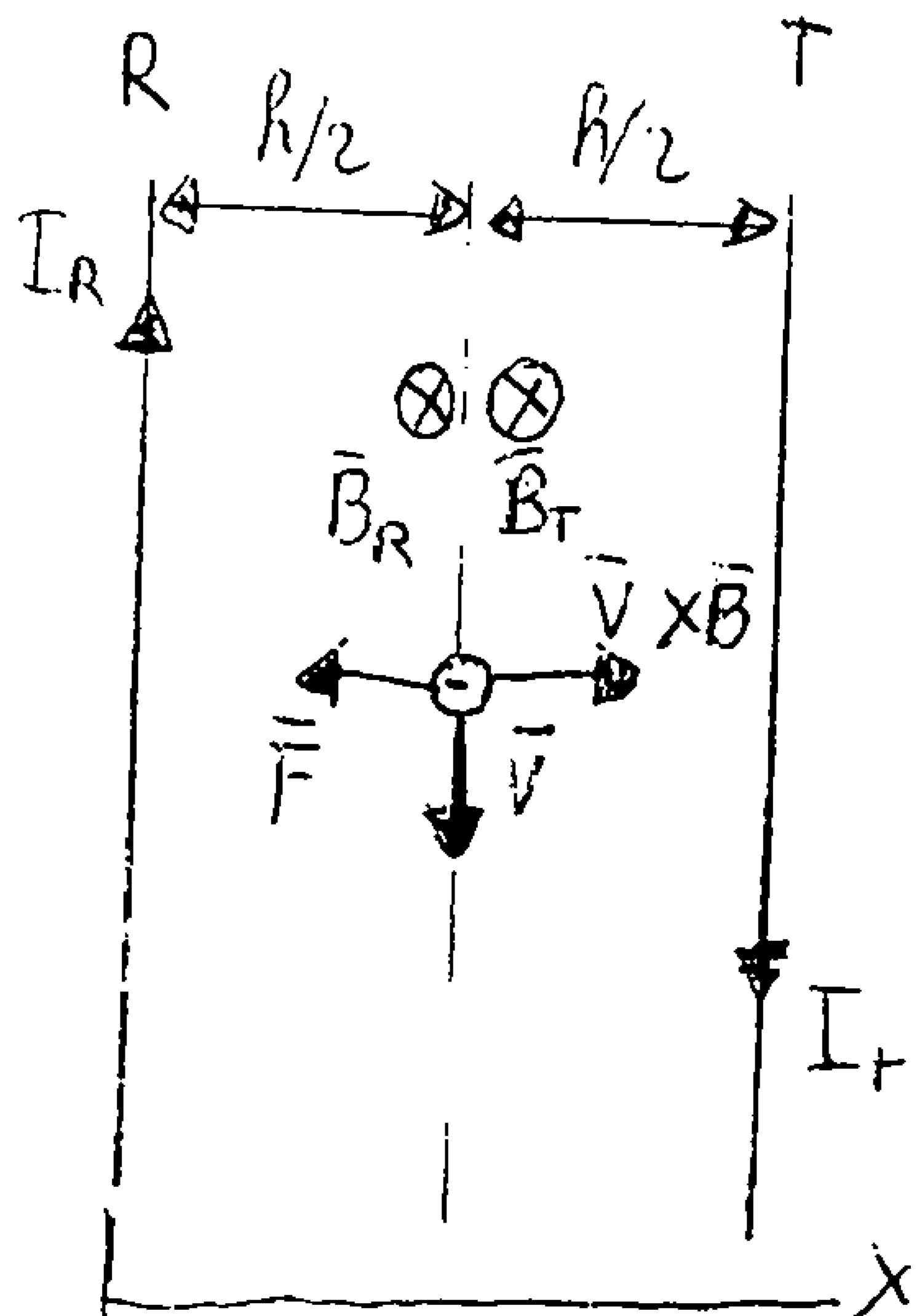
En todos los puntos del cable $d\vec{\ell} \perp \vec{B}_R$ y $d\vec{F}$ eleva la misma dirección \hat{u}_x . Por tanto, la fuerza total será:

$$\vec{F} = \int_0^l d\vec{F} = \int_0^l I_T d\vec{\ell} \times \vec{B}_R = I_T \int_0^l B_R dl \hat{u}_x = I_T \hat{u}_x \int_0^l \frac{\mu_0 I_R}{2\pi h} dl =$$

$$= \hat{u}_x \frac{\mu_0 I_R I_T}{2\pi h} \int_0^l dl = \hat{u}_x \frac{\mu_0 I_R I_T}{2\pi h} l = \hat{u}_x I_T B_R \cdot l$$

$$\vec{F} = \hat{u}_x \cdot (433\text{A}) \cdot (0,25\text{mT}) \cdot (3\text{m}) = 0,33 \text{ N } (\hat{u}_x)$$

e) Para resolver esta parte consideraremos el campo que crean ambos cables en la línea donde se encuentra el electrón.



Ambos campos son \perp al plano del dibujo y entrantes en la zona de interés. Su módulo se calculará usando la ley de Ampere como en el apartado anterior y por tanto

$$|B_R(r=\frac{R}{2})| = \frac{\mu_0 I_R}{2\pi} \frac{1}{R/2}; \quad |B_T(r=\frac{R}{2})| = \frac{\mu_0 I_T}{2\pi} \frac{1}{R/2}$$

El campo total tendrá un módulo igual a la suma de ambos y dirección entrante al plano del dibujo:

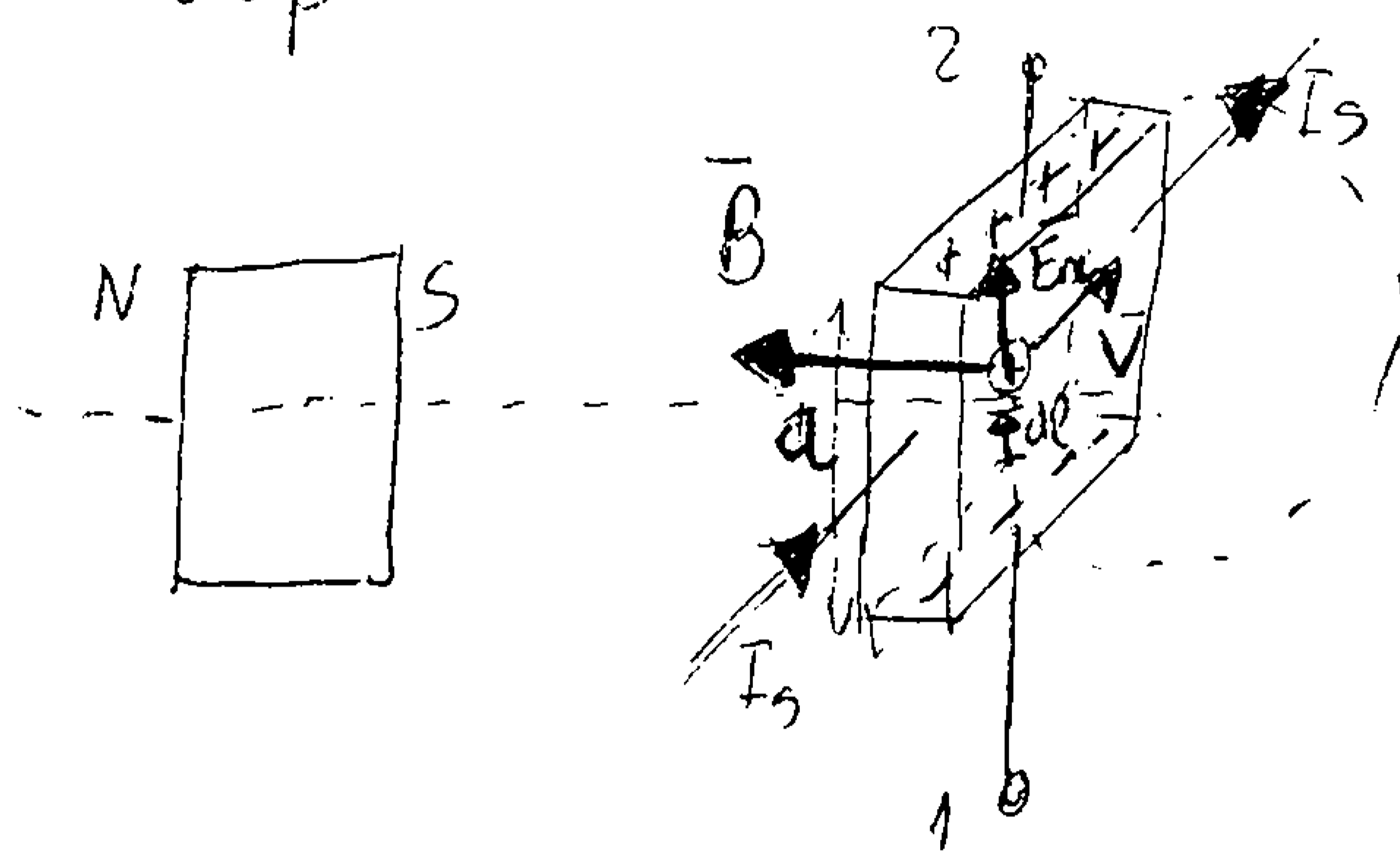
$$\text{así: } |B_{\text{total}}| = \frac{\mu_0}{\pi R} (I_R + I_T) = 1,37 \text{ mT}$$

La fuerza sobre el electrón se calcula usando: $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$
 por tanto tendrá dirección $(-\hat{u}_x)$, acercándose al cable R

$$\text{Así: } \vec{F} = q_e \vec{v} \times \vec{B} \underset{\substack{\perp \\ v \perp B}}{=} |q_e| v B (-\hat{u}_x) = |q_e| \cdot v \cdot \frac{\mu_0}{\pi R} (I_R + I_T) (-\hat{u}_x)$$

$$\vec{F} = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) (6 \cdot 10^6 \text{ m/s}) (1,37 \text{ mT}) (-\hat{u}_x) = 1,30 \cdot 10^{-15} \text{ N } (-\hat{u}_x)$$

2º a) Para calcular el campo \vec{B} en cada uno de los pts que me piden tengo que obtener la relación entre la ddp en bornes del sensor Hall y el campo B



como me dicen que el sensor está formado por una lámina de semiconductor tipo P \Rightarrow las portadoras libres de carga son \oplus y por tanto se mueven en la dirección de \vec{I}_s

El campo sabemos que era en la direcc del eje aunque no sabemos en que sentido. Este hay que deducirlo del signo de $V_2 - V_1 > 0$

El signo $\Rightarrow \vec{E}_{nc}$ es como el dibujado, y un campo $\vec{E}_{nc} = \vec{v} \times \vec{B}$ como el dibujado \Rightarrow un campo \vec{B} en el sentido representado

\Rightarrow El polo del imán del lado del sensor es el Sur

Por otra parte $V_2 - V_1 = E_R$ si andamos en la dirección del dl dibujado

en la figura $\Rightarrow E_R = \oint \vec{E}_{nc} d\vec{l} = \int_0^a \vec{E}_{nc} d\vec{l} = \int_0^a E_{nc} dl = E_{nc} \cdot a$
 $\vec{E}_{nc} dl = E_{nc} = cte$

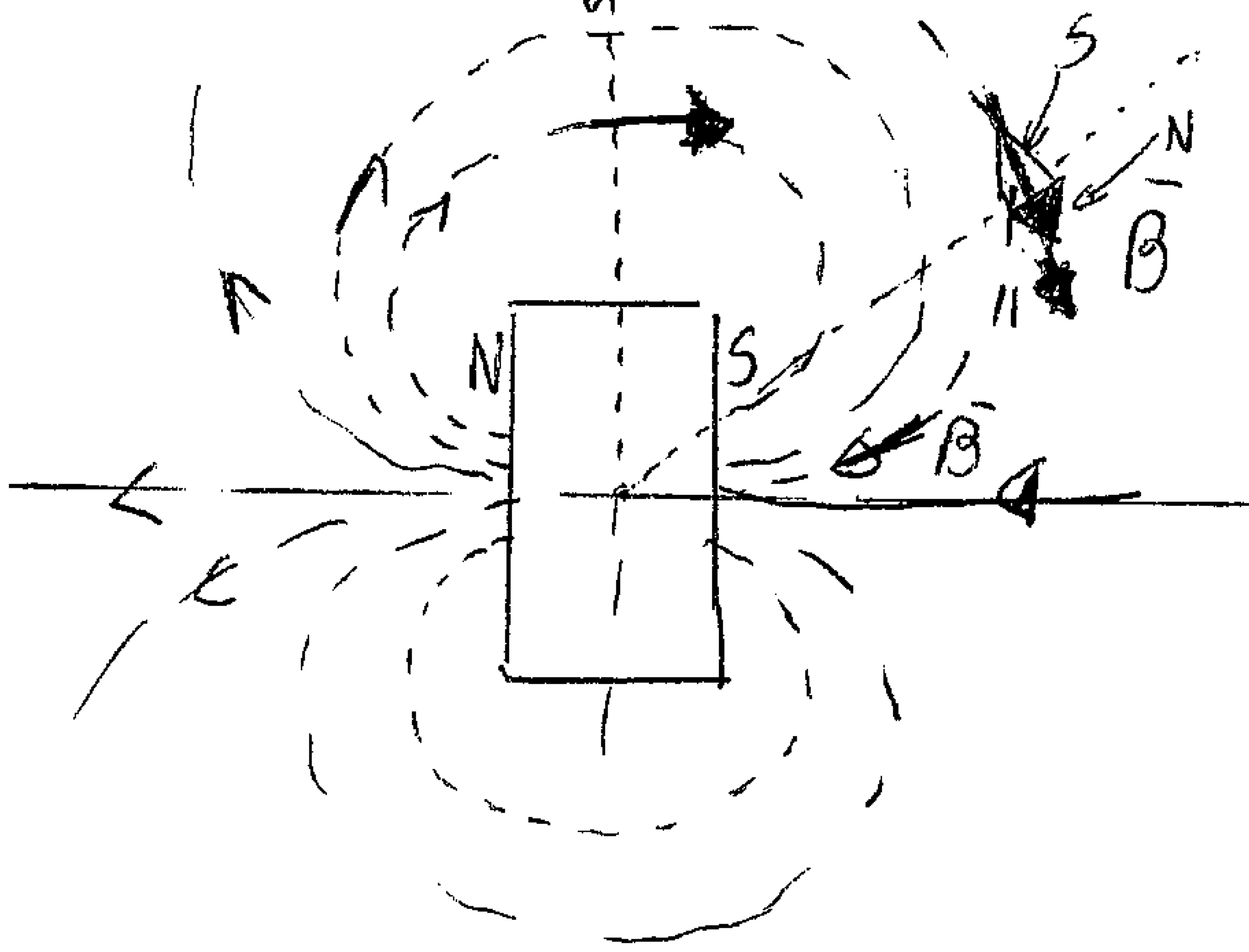
$|\vec{E}_{nc}| = |\vec{v} \times \vec{B}| = vB$
 $\frac{v}{v \perp B}$

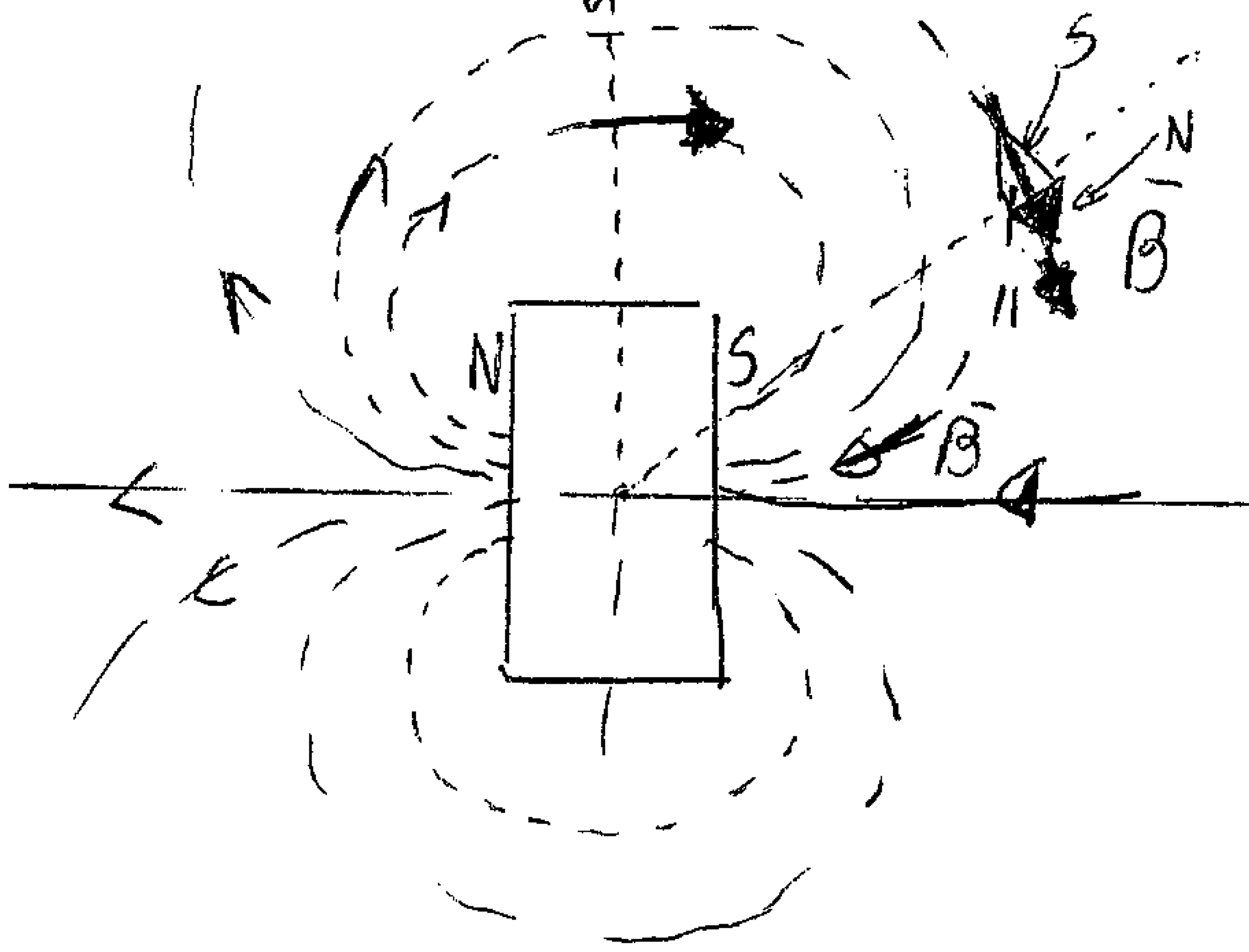
$I_s = K_H I V$

$\Rightarrow V_R = V_2 - V_1 = E_R = vB a = \frac{I_s B a}{K_H} \Rightarrow B = \frac{K_H}{I_s a} \cdot V_R = 62,05 \left(\frac{I}{V}\right) \cdot V_R$

Esta es la relación entre B y V_R buscada, luego:

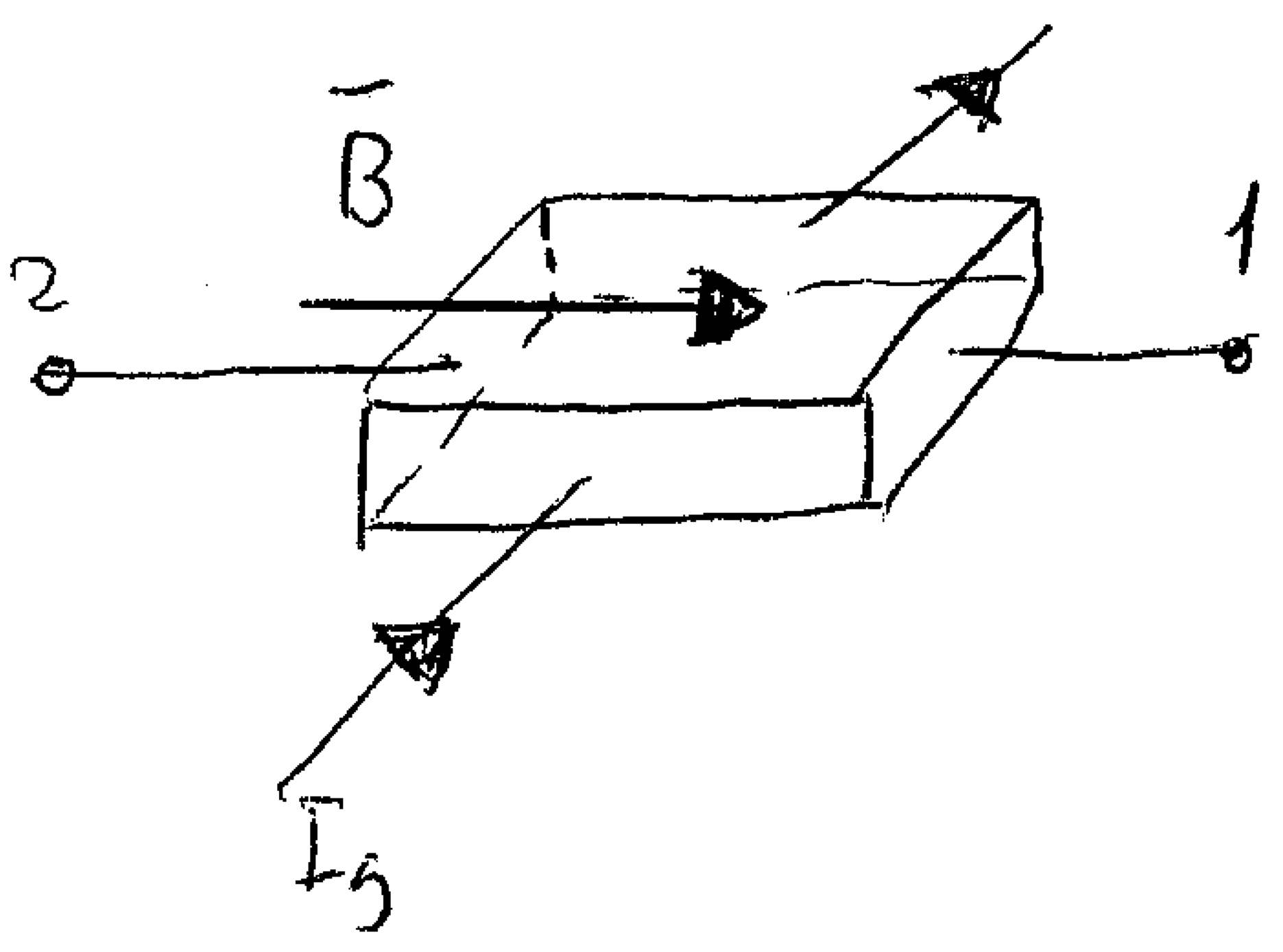
X_0 (cm)	V_R (mV)	B (T)	B (G)
0	8,06	0,5	5000
1	3,45	0,21	2141
2	1,68	0,1	1042
3	0,85	52,7mT	527,4
4	0,4	24,8 mT	248,2
5	0,29	18 mT	179,9

b) Los líneas del campo \vec{B} en torno al imán serán como  los dibujados \vec{B}



Por tanto en el punto marcado como posición 2 el campo tiene dirección axial.

La posición relativa del campo \vec{B} y el sensor en Posición 2 se detallan en la figura de abajo. Como el campo \vec{B} no tiene componente en la dirección

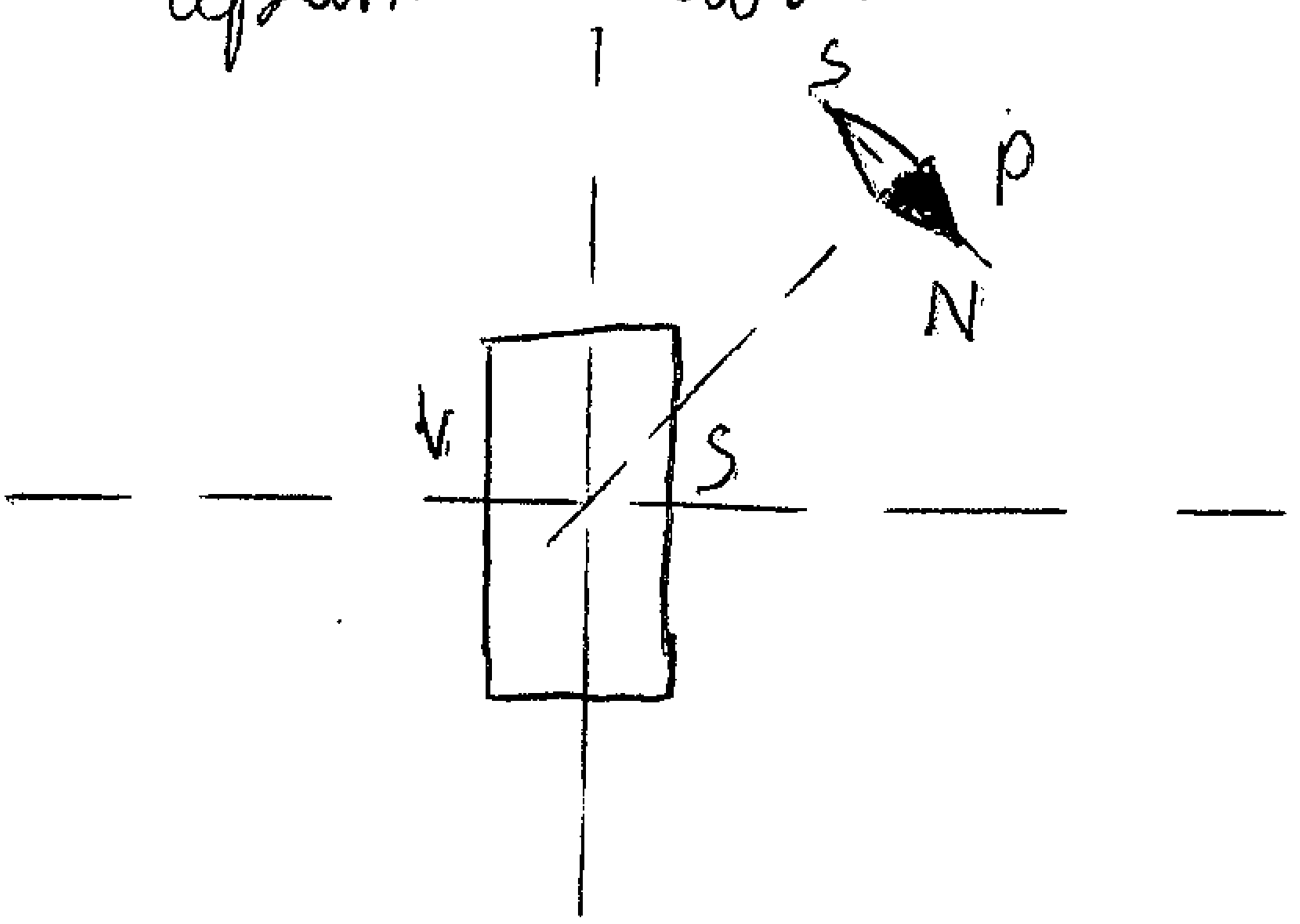


Posición 2

\perp a la cara grande no crea \vec{E}_{nc} en la dirección de los terminales 1 y 2 \Rightarrow no hay d. d. p. entre ellos debido al efecto Hall.

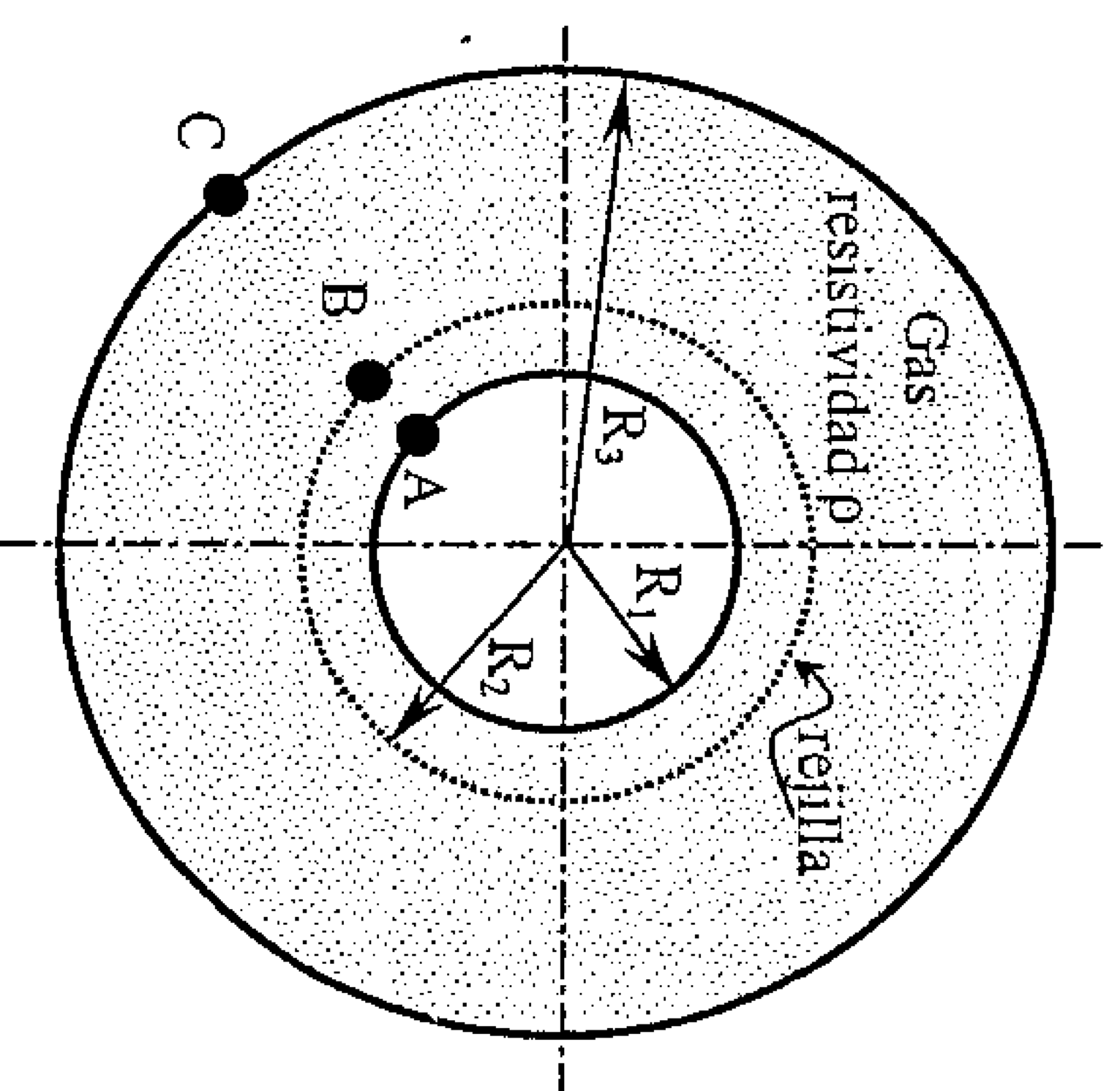
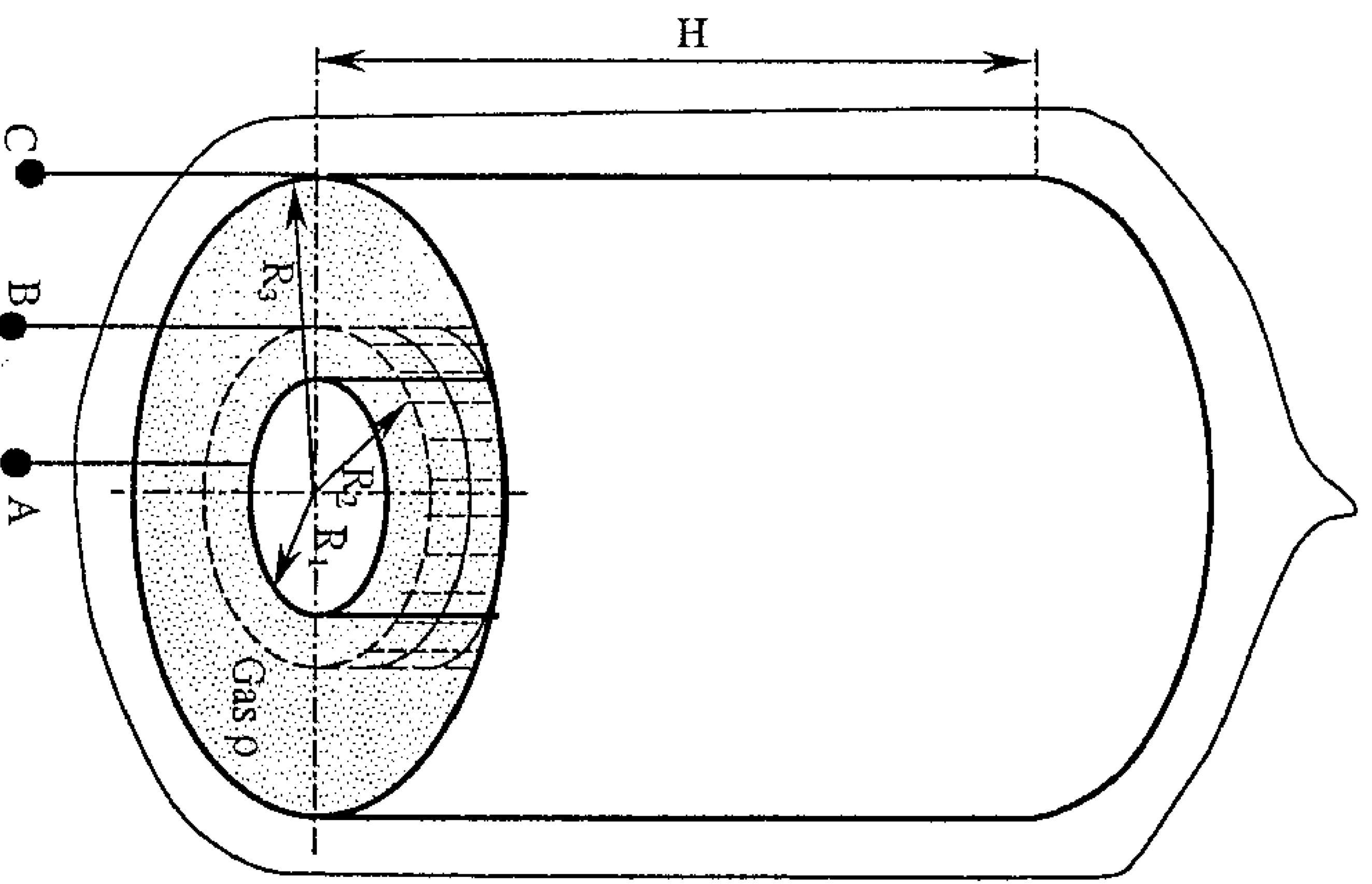
En conclusión, tal como está colocado el sensor en la posición 2, $V_H = 0V$, debido a la dirección que lleva el campo \vec{B} relativa al sensor.

c) Sabiendo que una brújula tiende a orientarse en cualquier punto en la dirección del campo \vec{B} presente allí, apuntando su lado Norte en el sentido de \vec{B} , no hay más que deducir que dirección y sentido llevara \vec{B} en el punto P. Ésta se ha representado en el dibujo. y por tanto la brújula en ese pto apuntará así:



3.- Una válvula de vacío está formada por dos electrodos A y C. Entre ellos se coloca una fina rejilla metálica, que tiene la particularidad de que deja pasar la corriente a través de ella, sin absorber ni ceder cargas al sistema. Dicha rejilla se conecta a un potencial que se quiere amplificar.

- a) Si la rejilla se encuentra a un potencial $V_B - V_A = V_0$, calcular la intensidad I que circula por la válvula y la diferencia de potencial entre los electrodos, $V_C - V_A$ (1 punto).
- b) Calcular la potencia disipada en la región del espacio entre el electrodo A y la rejilla B (1 punto).



Datos: $R_1 = 1 \text{ mm}$, $R_2 = 1,5 \text{ mm}$, $R_3 = 4 \text{ mm}$, $V_0 = 50 \text{ V}$, $H = 1 \text{ cm}$,
 $\rho = 10 \Omega \text{ m}$ (resistividad debida a los gases residuales en la válvula).

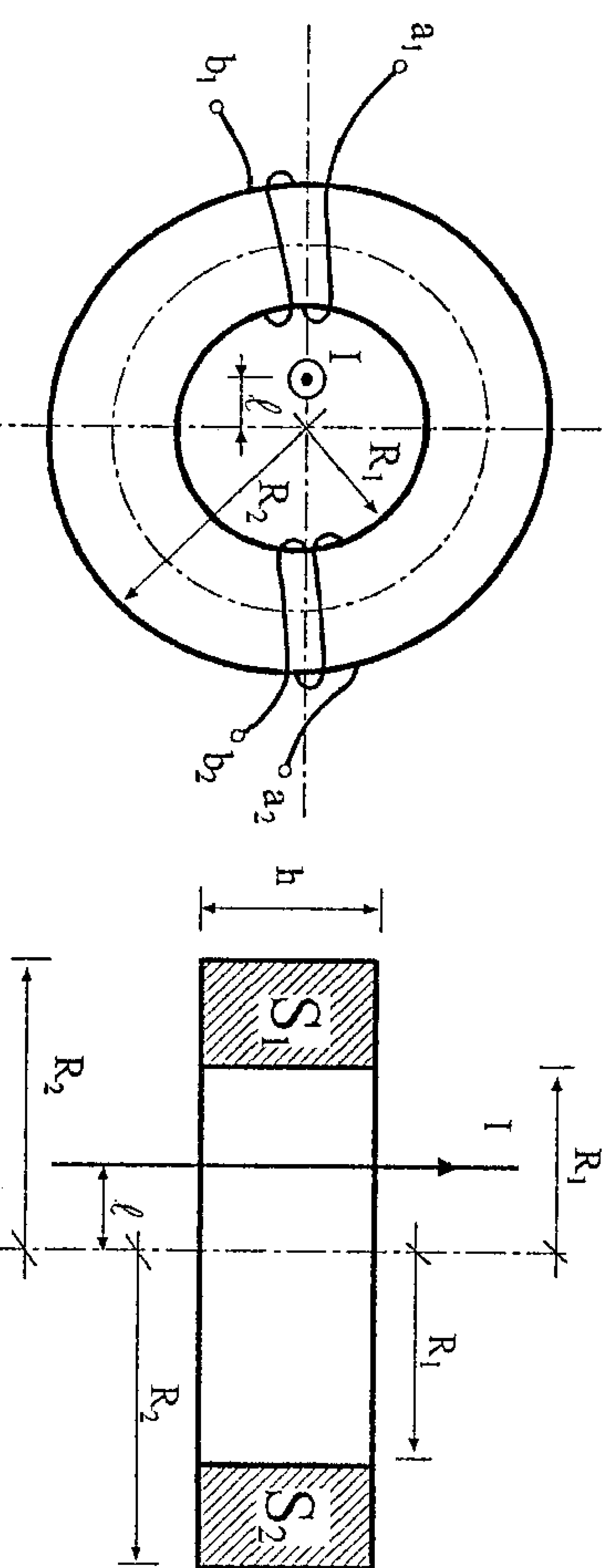
4.- Las pinzas amperimétricas son instrumentos que permiten medir la corriente eléctrica que circula por un cable sin necesidad de conectar resistencias u otros elementos en serie con el cable. Un sensor transforma el valor de la corriente en un valor de fuerza electromotriz, que se mide con un voltímetro. Cuando la corriente eléctrica es continua incorporan sensores Hall, pero si solo es necesario medir corriente alterna su funcionamiento se basa en la ley de inducción de Faraday. Un modelo de pinza amperimétrica para medir corriente alterna está constituido por un núcleo toroidal de nylon de sección rectangular. Alrededor de dos secciones del toroide, S_1 y S_2 , separadas π radianes, se construyen dos bobinas sensoras, iguales, de N vueltas cada una. El cable por donde circula la corriente eléctrica I es perpendicular al toroide y su eje debería coincidir con el eje del toroide. Por un error de posicionamiento, los ejes se encuentran desplazados una distancia ℓ , permaneciendo paralelos.

Calcular:

- a) Los vectores \vec{H} , \vec{B} y \vec{M} en cualquier punto de las superficies S_1 y S_2 de las bobinas sensoras. (1 pto.)
- b) El flujo total del vector \vec{B} a través de cada una de las bobinas sensoras. (1 pto.)
- c) la diferencia de potencial en cada una de las bobinas sensoras en función de I_0 , medidas con un voltímetro, $V_{a1} - V_{b1}$ y $V_{a2} - V_{b2}$, en el semiperíodo desde 5 ms ($\omega t = \pi/2$) hasta 15 ms ($\omega t = 3\pi/2$), y representartas gráficamente. (1 pto.)

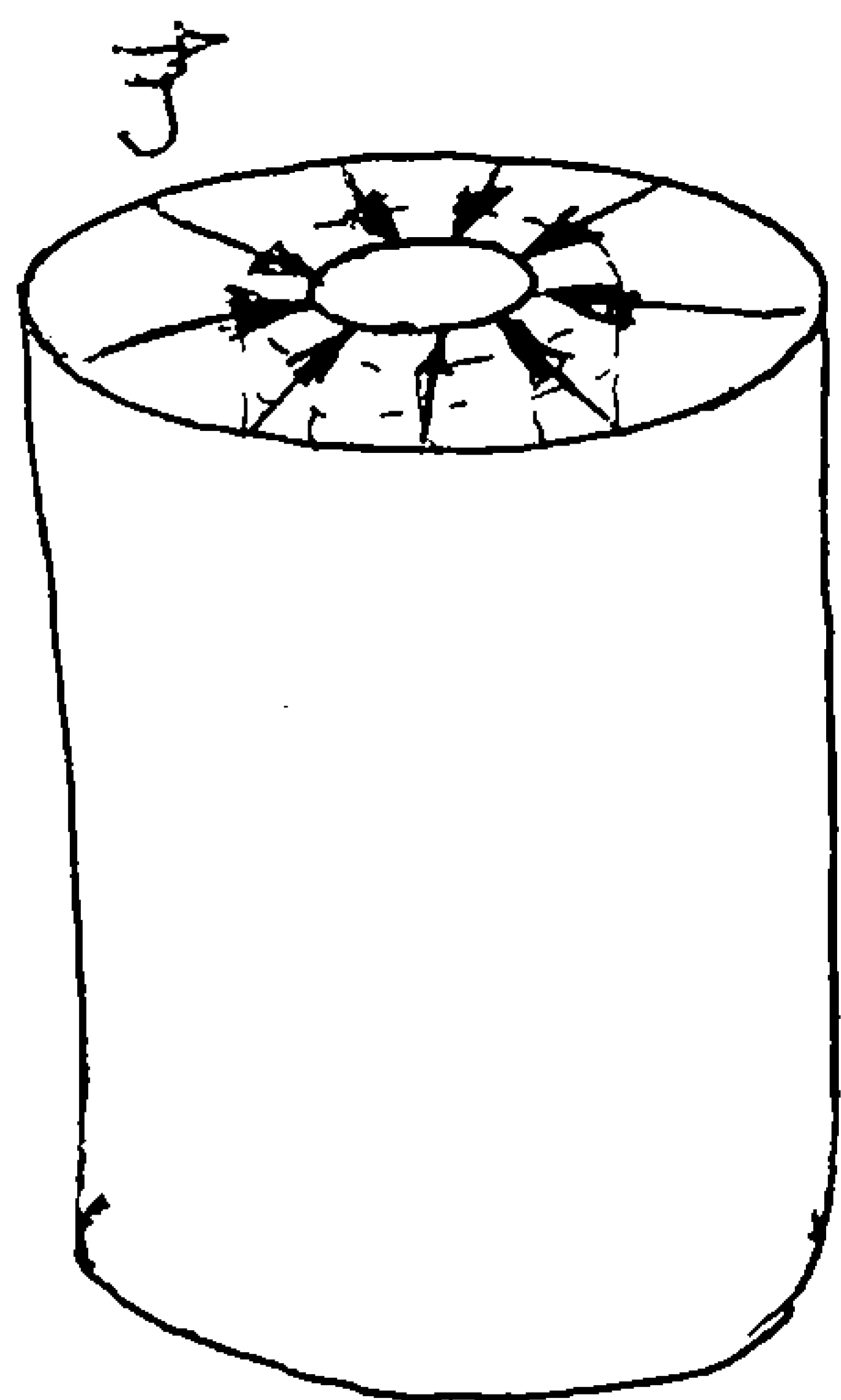
Datos: $I = I_0 \cos(\omega t)$, $I_0 = 500 \text{ A}$, $\omega = 100\pi$, $N = 200$, $R_1 = 2 \text{ cm}$, $R_2 = 5 \text{ cm}$, $h = 1,5 \text{ cm}$, $\ell = 1 \text{ cm}$

El nylon es un material no magnético de permeabilidad $\mu \cong \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$



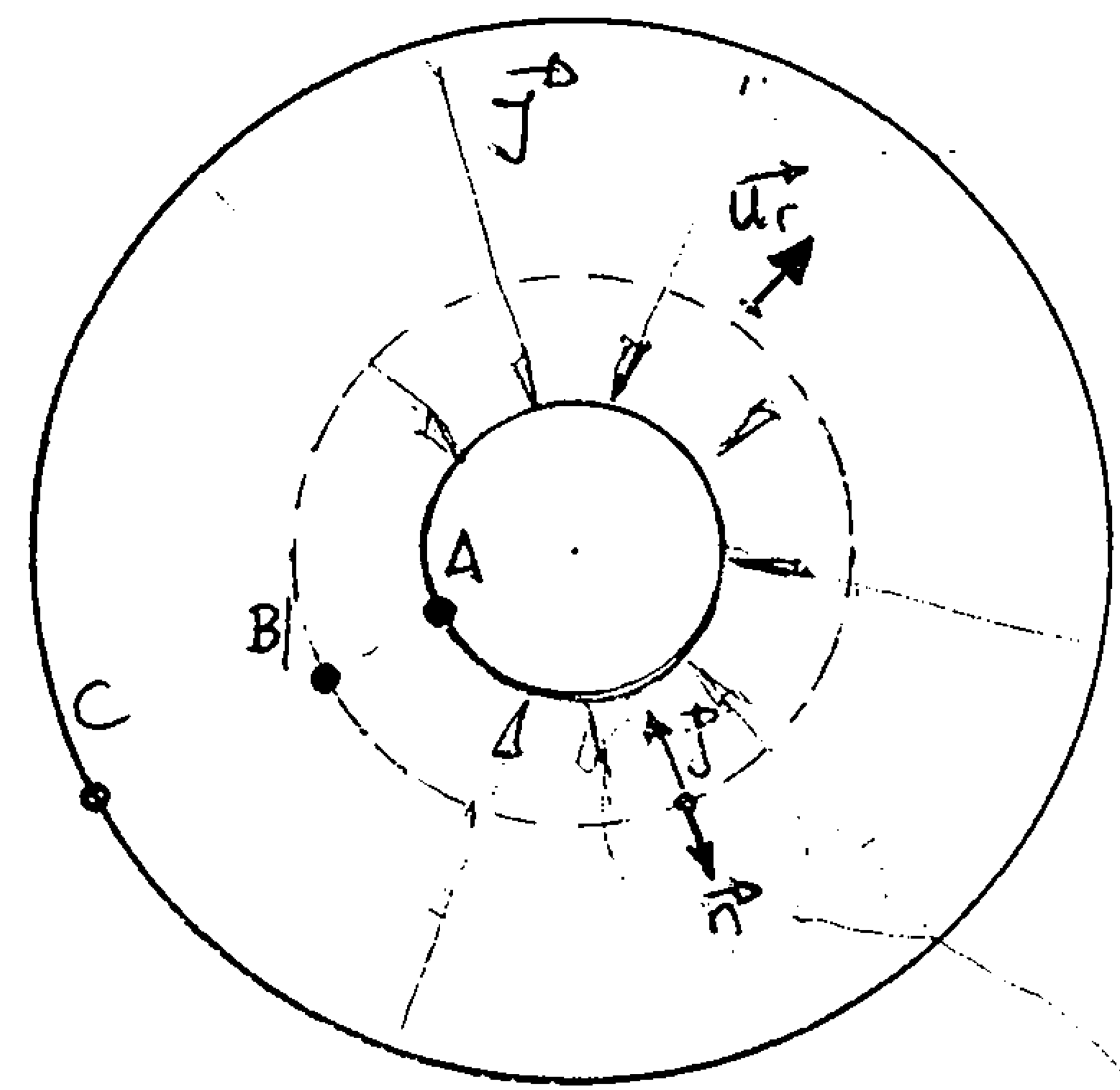
3-

a) la válvula tiene simetría cilíndrica: la corriente en un material resistivo irá desde el terminal + hacia el -. Es decir, como $V_B - V_A = V_0 > 0$, la corriente tendrá dirección $-\vec{u}_r$



$$\vec{J} = |\vec{J}| \cdot (-\vec{u}_r)$$

$|\vec{J}|$ depende sólo de r.
(por simetría)



⊛ Para obtener cómo varía la densidad de corriente con la distancia al eje, debo aplicar la ley de continuidad, o bien darme cuenta de que la intensidad que circula a través de la válvula es la misma independientemente de la superficie que tome para calcularla.

$$I_{\text{válvula}} = \int_{\text{cilindro que encierra el electrodo interior}} \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_{\text{sup. lateral}} \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_{\text{sup. lateral}} |\vec{J}| |\vec{n}| \cdot dS \cdot \cos \pi =$$

$$= - \int_{\text{sup. lateral}} |\vec{J}| \cdot dS \quad \vec{n} \uparrow \quad |\vec{J}| = \text{cte en el cil.} \quad = -|\vec{J}| \int_{\text{sup. lateral}} dS = -|\vec{J}| \cdot \text{Sup. lat. cilindro} = -|\vec{J}| 2\pi r H$$

$$\Rightarrow |\vec{J}| = -\frac{I}{2\pi r H}$$

$$\vec{J} = \left(-\right) \frac{I}{2\pi r H} (-\vec{u}_r) = \frac{|I|}{2\pi r H} (-\vec{u}_r)$$

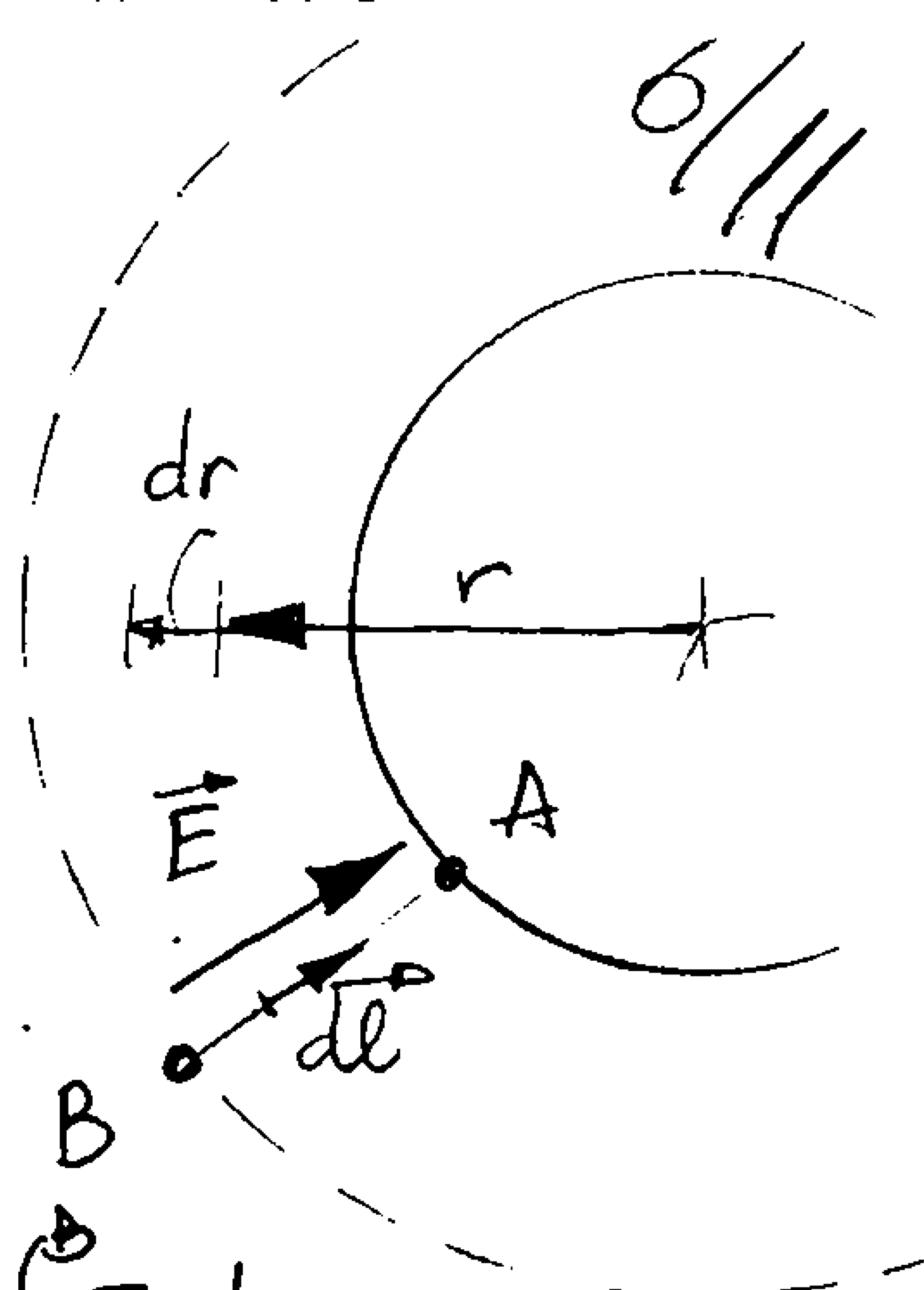
⌋ el signo depende del sentido tomado para la $I_{\text{válvula}}$.

$$\vec{J} = \frac{|I|}{2\pi r H} (-\vec{u}_r)$$

Aplicamos la ley de Ohm en forma local

$$\vec{E} = \rho \vec{J} = \rho \frac{|I|}{2\pi r H} (-\vec{u}_r) \quad (\vec{E} \parallel \vec{J})$$

\vec{E} antiparalelo a \vec{u}_r



Ahora podemos relacionar I con V_0

$$V_0 = V_B - V_A = \frac{W_{A \rightarrow B}^*}{q} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_A^B |\vec{E}| |d\vec{l}| = + \int_A^B E dr$$

$\vec{E} \parallel d\vec{l}$ $d\vec{l} = -dr$

$$V_0 = \int_A^B \rho \frac{|I|}{2\pi r H} dr = \rho \frac{|I|}{2\pi H} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \rho \frac{|I|}{2\pi H} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

$$\Rightarrow |I| = \frac{V_0 2\pi H}{\rho \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{50 \text{ V} \cdot 2\pi \cdot 0.001 \text{ m}}{10 \Omega \text{ m} \ln \frac{1.5 \text{ mm}}{1 \text{ mm}}} = 0.775 \text{ A}$$

Si calculamos $V_C - V_B$ de forma análoga a como hemos calculado $V_B - V_A$ obtenemos:

$$V_C - V_B = - \int_B^C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \dots = \rho \frac{|I|}{2\pi H} \ln \frac{R_3}{R_2}$$

$$\text{Por tanto } V_C - V_A = (V_C - V_B) + (V_B - V_A) = \rho \frac{|I|}{2\pi H} \left(\ln \frac{R_3}{R_2} - \ln \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$V_C - V_A = \rho \frac{|I|}{2\pi H} \ln \frac{R_3}{R_1} = 10 \Omega \text{ m} \frac{0.775 \text{ A}}{2\pi \cdot 0.001 \text{ m}} \ln \frac{4 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 171 \text{ V}$$

b) El cálculo de la potencia disipada entre el electrodo interior y la rejilla lo podemos calcular de dos formas:

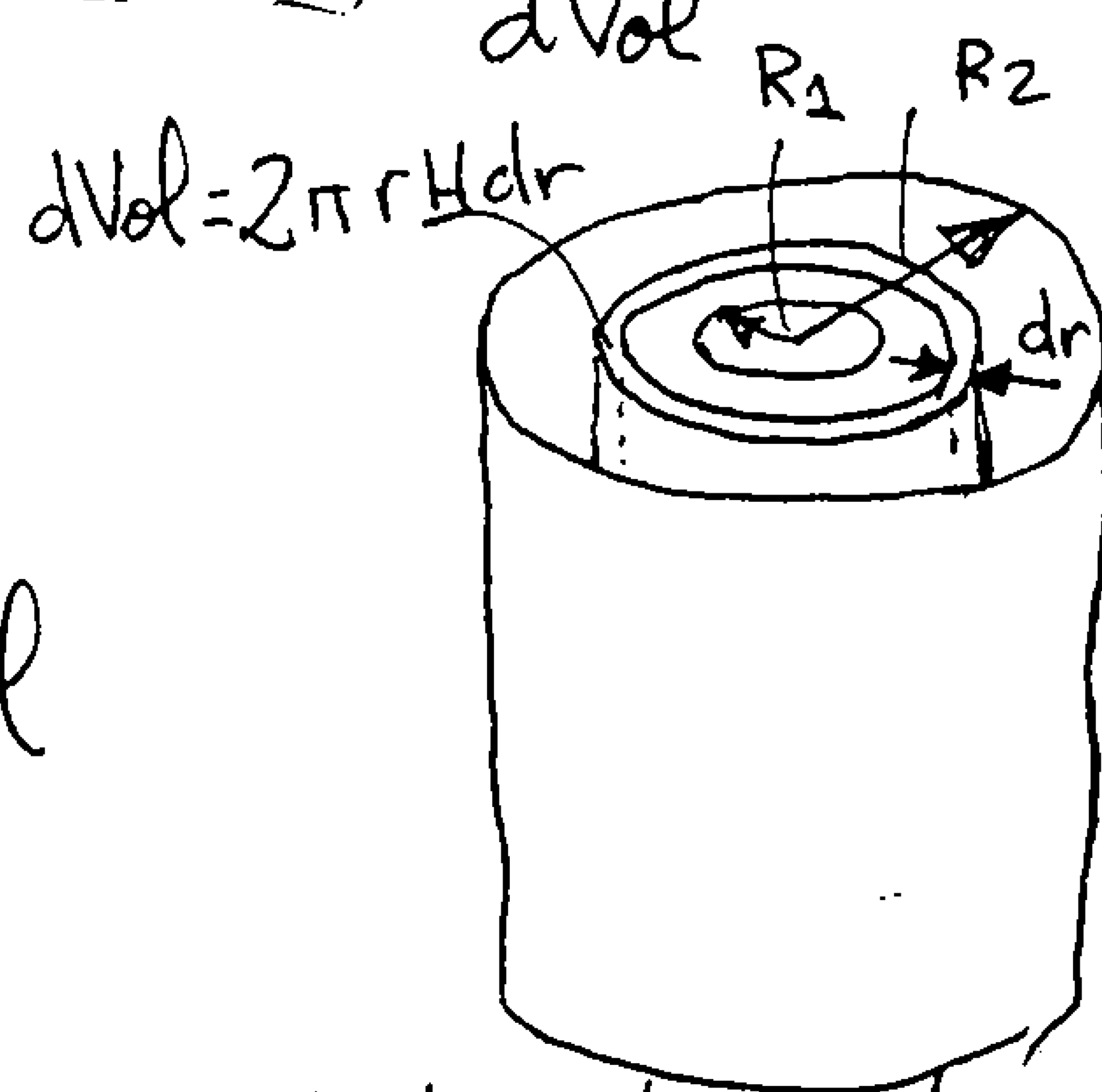
- A través de la densidad de potencia $\frac{dP}{dVol}$ e integrando en el volumen entre la rejilla y el electrodo interior.

- Calculando la resistencia equivalente entre A y B, R_{AB} , y aplicando $P_{AB} = R_{AB} I^2$

7/11

⊗ Cálculo a través de la densidad de potencia, $\frac{dP}{dVol}$

$$\frac{dP}{dVol} = \vec{J} \cdot \vec{E} = \rho |\vec{J}|^2 = \rho \left(\frac{|I|}{2\pi r H} \right)^2$$



$$P = \int_{\text{volumen entre } R_1 \text{ y } R_2} \frac{dP}{dVol} \cdot dVol = \int \rho \left(\frac{|I|}{2\pi H} \right)^2 \frac{1}{r^2} \cdot dVol$$

Tomo un volumen diferencial correspondiente a un tubo de radio r y grosor dr , donde la densidad de potencia es etc.

$$P = \int_{R_1}^{R_2} \rho \left(\frac{|I|}{2\pi H} \right)^2 \frac{1}{r^2} 2\pi r H \cdot dr = \int_{R_1}^{R_2} \rho \frac{|I|^2}{2\pi H} \frac{dr}{r}$$

$$P = \rho \frac{|I|^2}{2\pi H} \ln \frac{R_2}{R_1} = 10 \Omega \cdot m \frac{(0.775 \text{ A})^2}{2\pi \cdot 0.01 \text{ m}} \ln \frac{15 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 38.74 \text{ W}$$

⊗ Cálculo alternativo a través de la resistencia equivalente

$$R_{AB} = \frac{V_B - V_A}{|I|} = \frac{\rho}{2\pi H} \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{10 \Omega \cdot m}{2\pi \cdot 0.01 \text{ m}} \ln \frac{15 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 64.5 \Omega$$

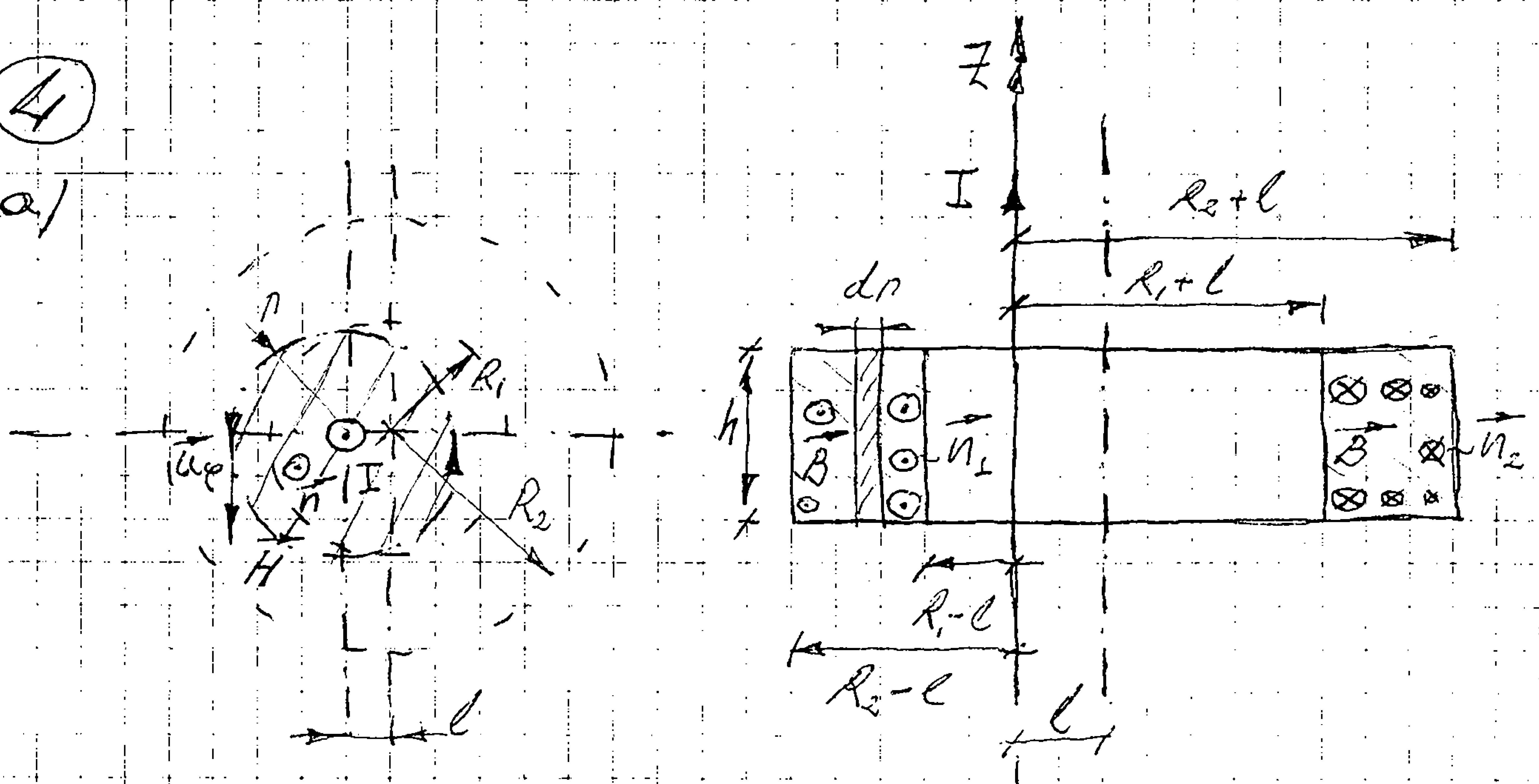
$$P = I^2 R_{AB} = (0.775 \text{ A})^2 \cdot 64.5 \Omega = 38.74 \text{ W}$$

Incluso podemos calcular la potencia sin calcular la resistencia equivalente:

$$P = (V_B - V_A) \cdot I = 50 \text{ V} \cdot 0.775 \text{ A} = 38.74 \text{ W}$$

4

a)



Ley de Ampere en medios materiales.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{REAL \text{ ABRAZADA POR } C}$$

\vec{H} y \vec{B} son creados únicamente por la corriente I , que se tomará como eje de simetría y eje $z z'$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_0^{2\pi} H(r=r) r \cdot d\varphi = 2\pi r \cdot H(r=r)$$

$$I_{REAL \text{ ABRAZADA POR } C} = I > 0$$

$$H(r=r) = \frac{I}{2\pi r} \quad \Rightarrow \quad \vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \vec{u}_\varphi, \quad \forall 0 < r < \infty$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \vec{u}_\varphi, \quad \forall 0 < r < \infty$$

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} = \vec{0} \quad \frac{A}{m} \quad (\text{mat. no magnético})$$

$$\vec{H} = \frac{79,58 \cos \omega t}{r} \vec{u}_\varphi \quad \frac{A}{m}; \quad \vec{B} = \frac{10^{-4} \cos \omega t}{r} \vec{u}_\varphi \quad T$$

9/11

$$b) \Phi_{S_1} = N \int_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{S}_1 = N \int_{R_1-l}^{R_2-l} B(r=l) \cdot dS_1 \cdot |\vec{n}_1| \cos 0 =$$

$$= N \int_{R_1-l}^{R_2-l} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} h \cdot dr = N \mu_0 \frac{I}{2\pi} h \int_{R_1-l}^{R_2-l} \frac{dr}{r} =$$

$$= N \mu_0 \frac{I}{2\pi} h \ln \frac{R_2-l}{R_1-l} =$$

$$= 200 \mu_0 \frac{I_0 \cos \omega t}{2\pi} h \ln \frac{4}{1} =$$

$$= 831,77 \cdot 10^{-9} \cdot I_0 \cos \omega t \text{ [Wb]}$$

$$\Phi_{S_2} = N \int_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{S}_2 = N \int_R^{R_2+l} B(r=l) \cdot dS_2 \cdot |\vec{n}_2| \cos 0 =$$

$$= N \int_{R_1+l}^{R_2+l} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} h \cdot dr = N \mu_0 \frac{I}{2\pi} h \int_{R_1+l}^{R_2+l} \frac{dr}{r} =$$

$$= 200 \mu_0 \frac{I_0 \cos \omega t}{2\pi} h \ln \frac{R_2+l}{R_1+l} =$$

$$= 415,88 \cdot 10^{-9} \cdot I_0 \cos \omega t \text{ [Wb]}$$

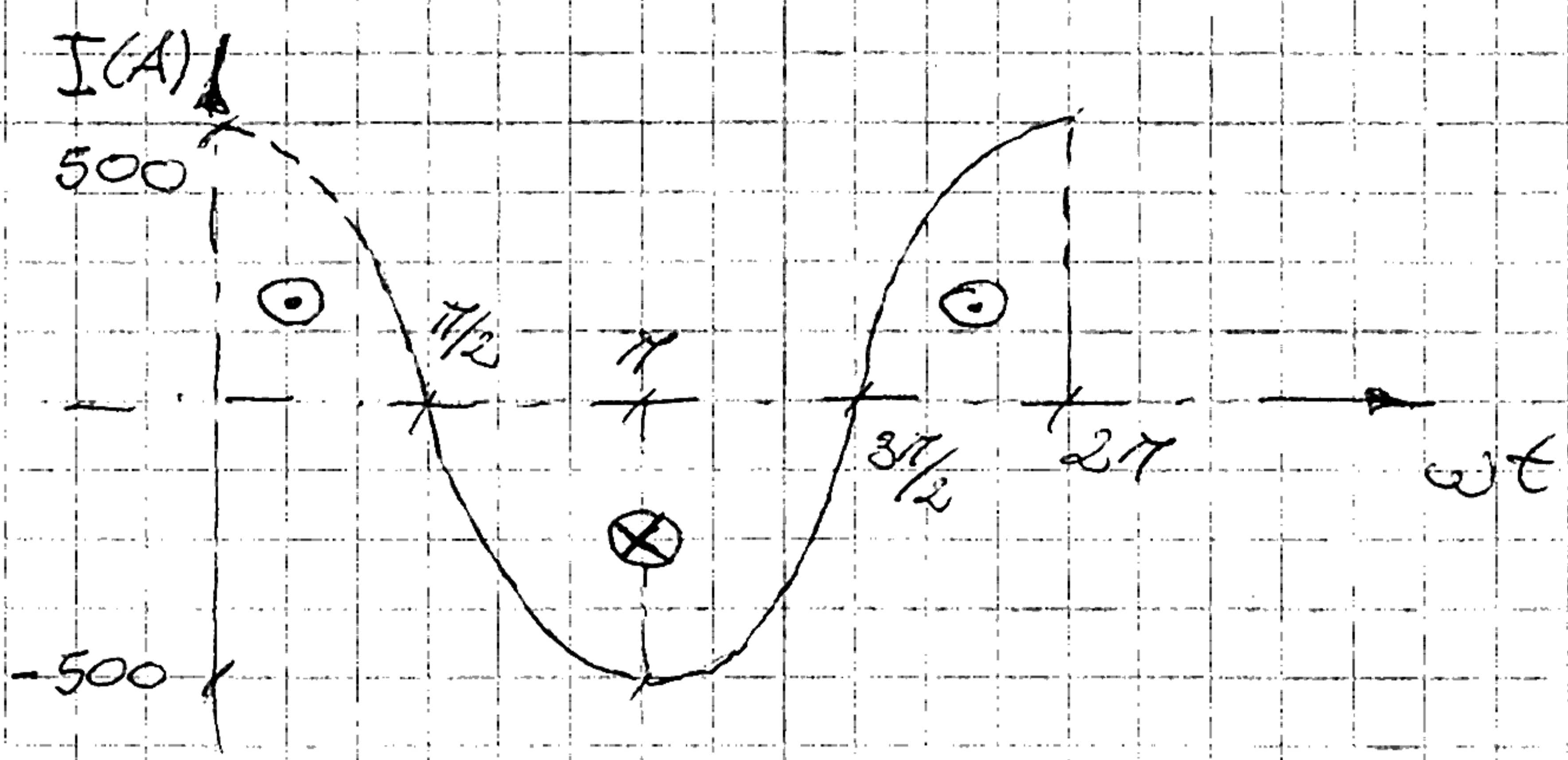
c) * BOBINA 1

$$|E_{s1}| = \left| - \frac{d\Phi_{S1}}{dt} \right| = \left| - 831,77 \cdot 10^{-9} \cdot I_0 \frac{d \cos \omega t}{dt} \right| =$$

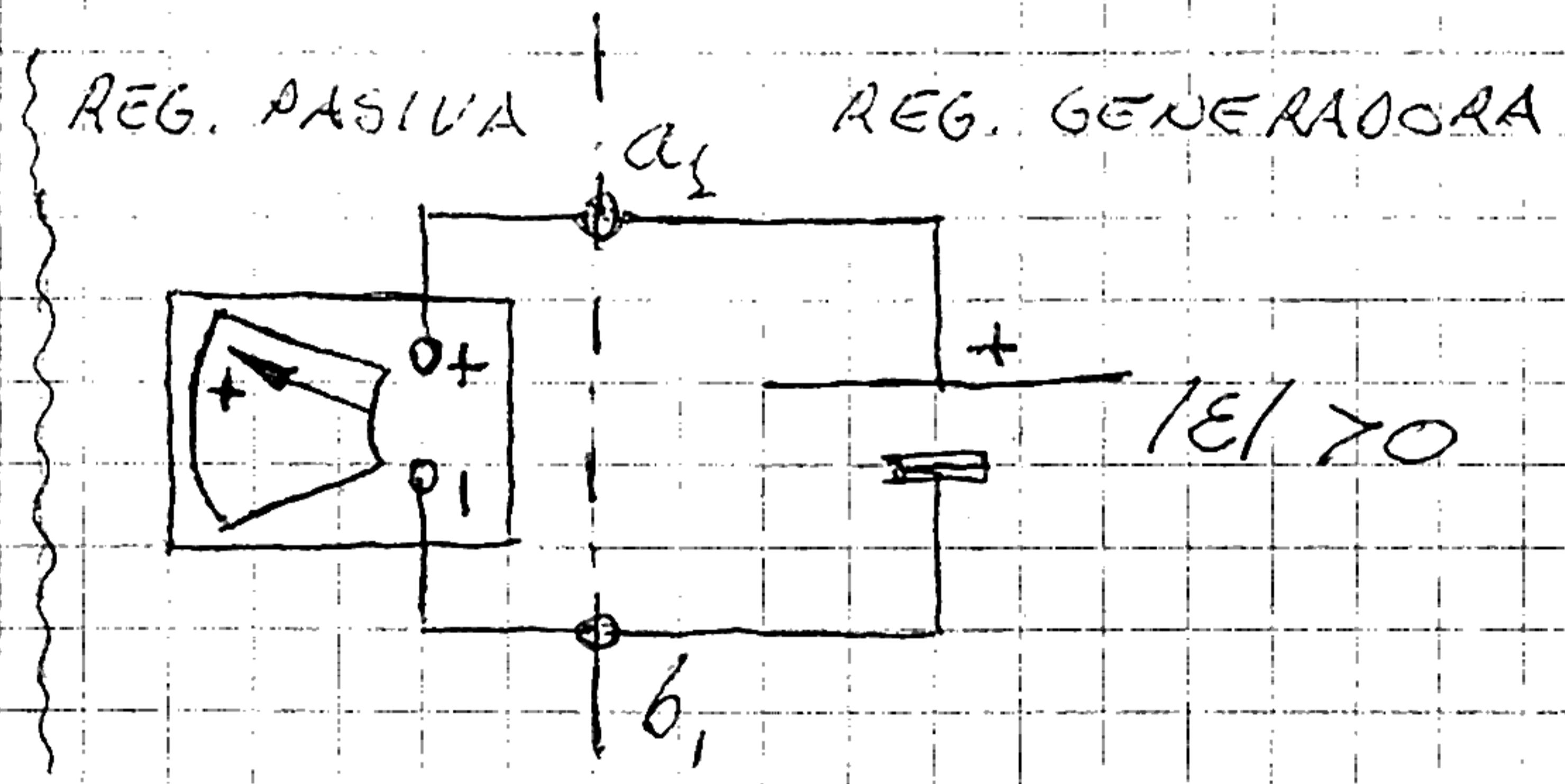
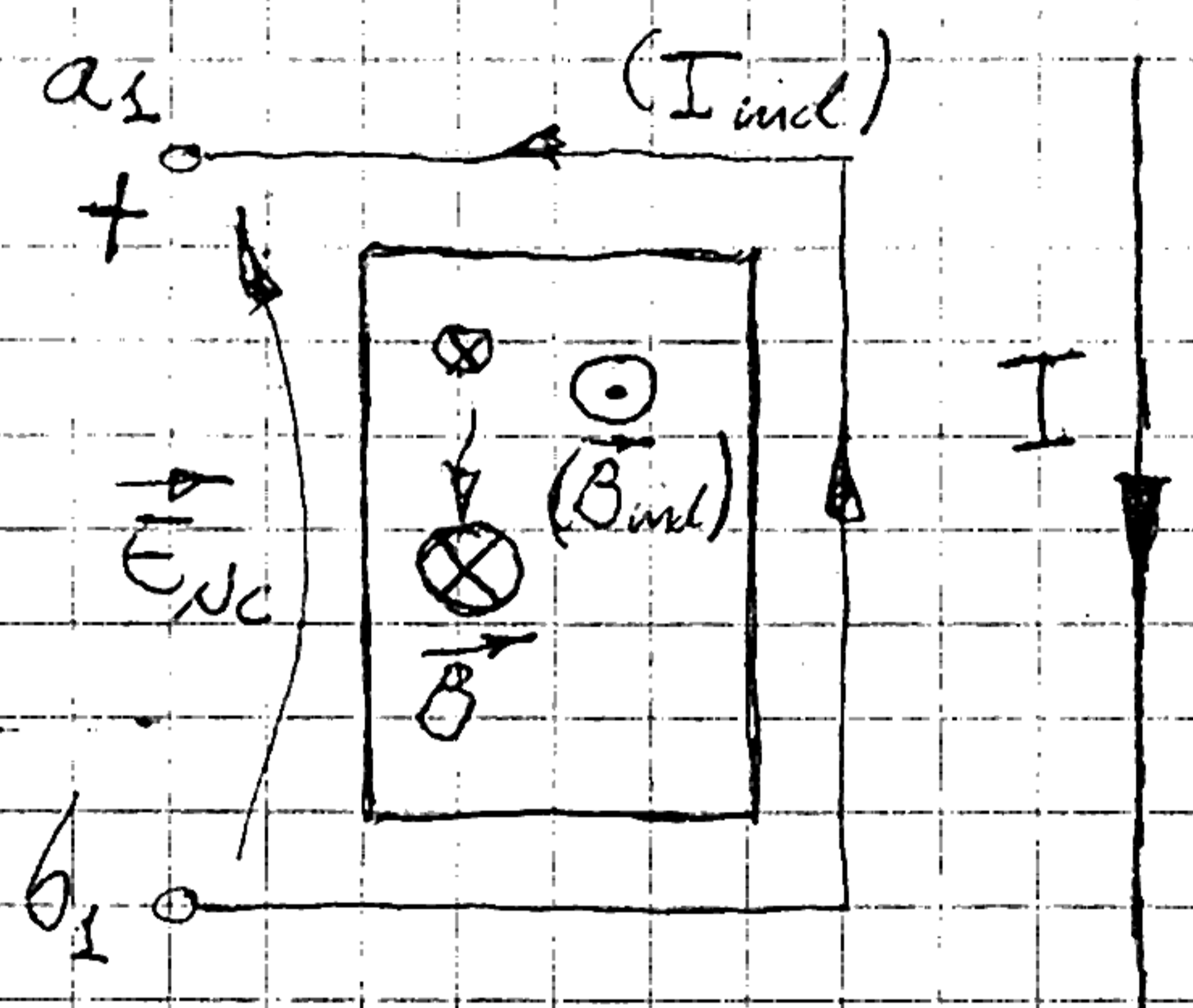
$$= \left| - 831,77 \cdot 10^{-9} \cdot I_0 (-\omega \sin \omega t) \right| =$$

$$= 831,77 \cdot 10^{-9} \cdot \omega I_0 |\sin \omega t| =$$

$$= 261,31 \cdot 10^{-6} \cdot I_0 |\sin \omega t| = 130,65 |\sin \omega t| \text{ mV}$$

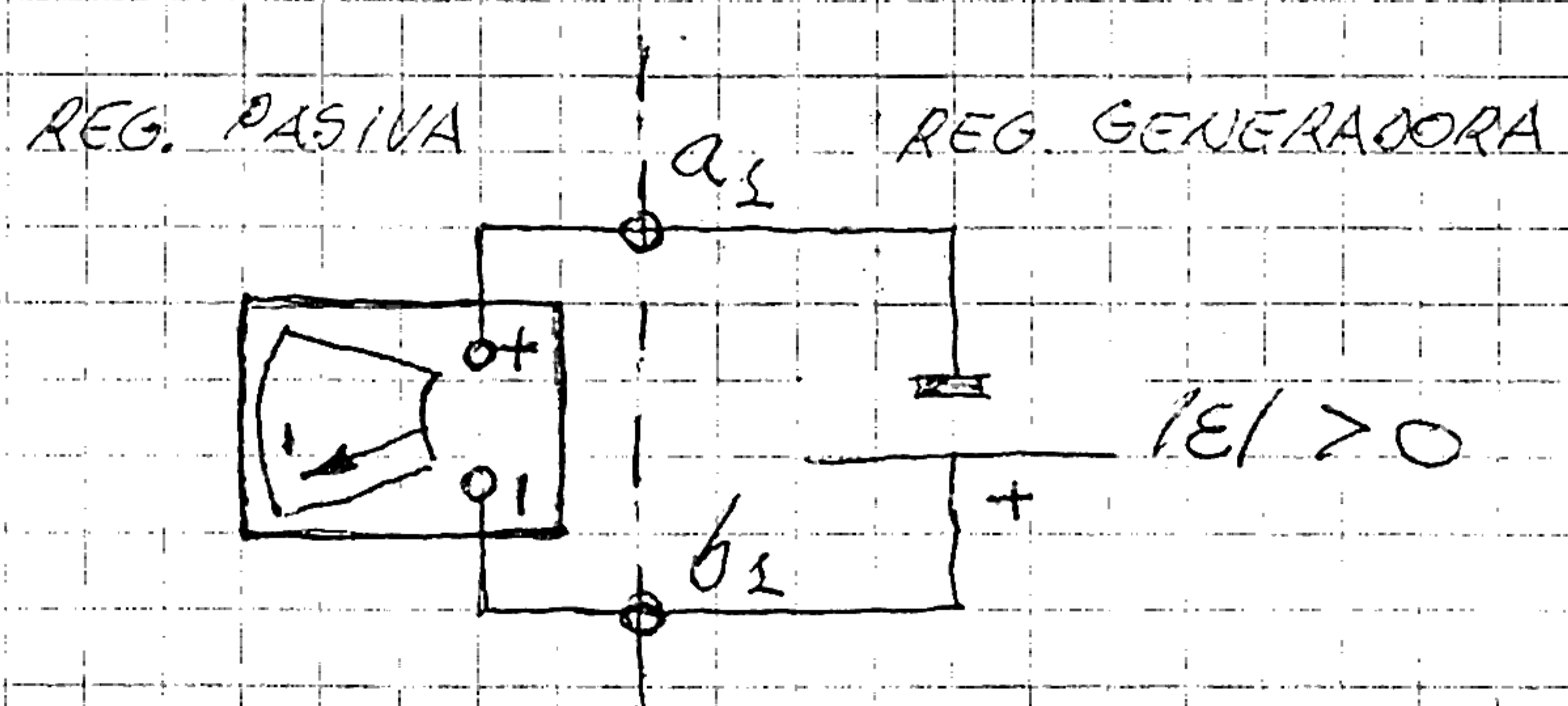
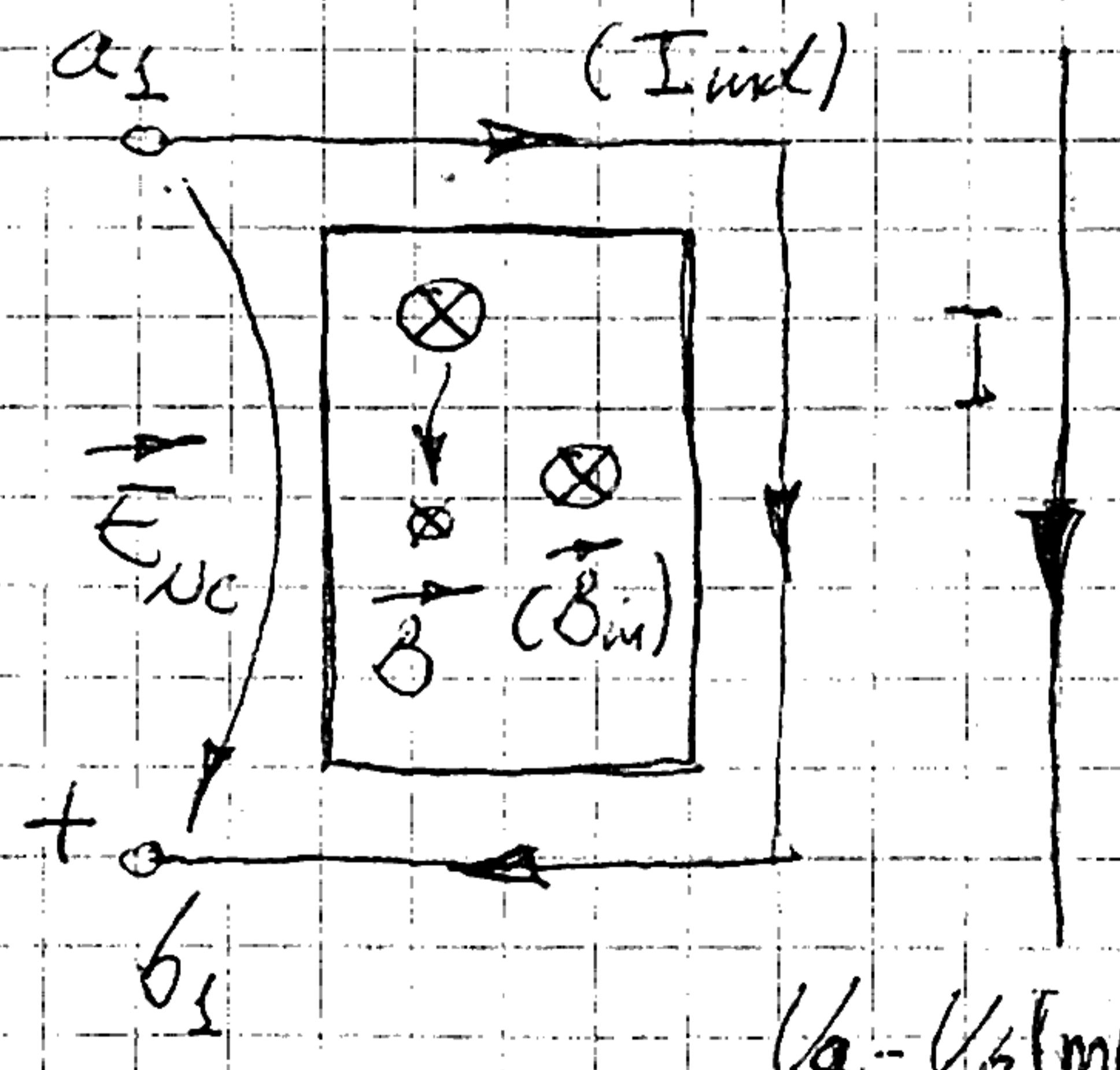


$\pi/2 < \omega t < \pi$ ($5\text{ms} < t < 10\text{ms}$)



$$V_{a_1} - V_{b_1} = 130,65 \text{ sen } \omega t \text{ [mV]} > 0$$

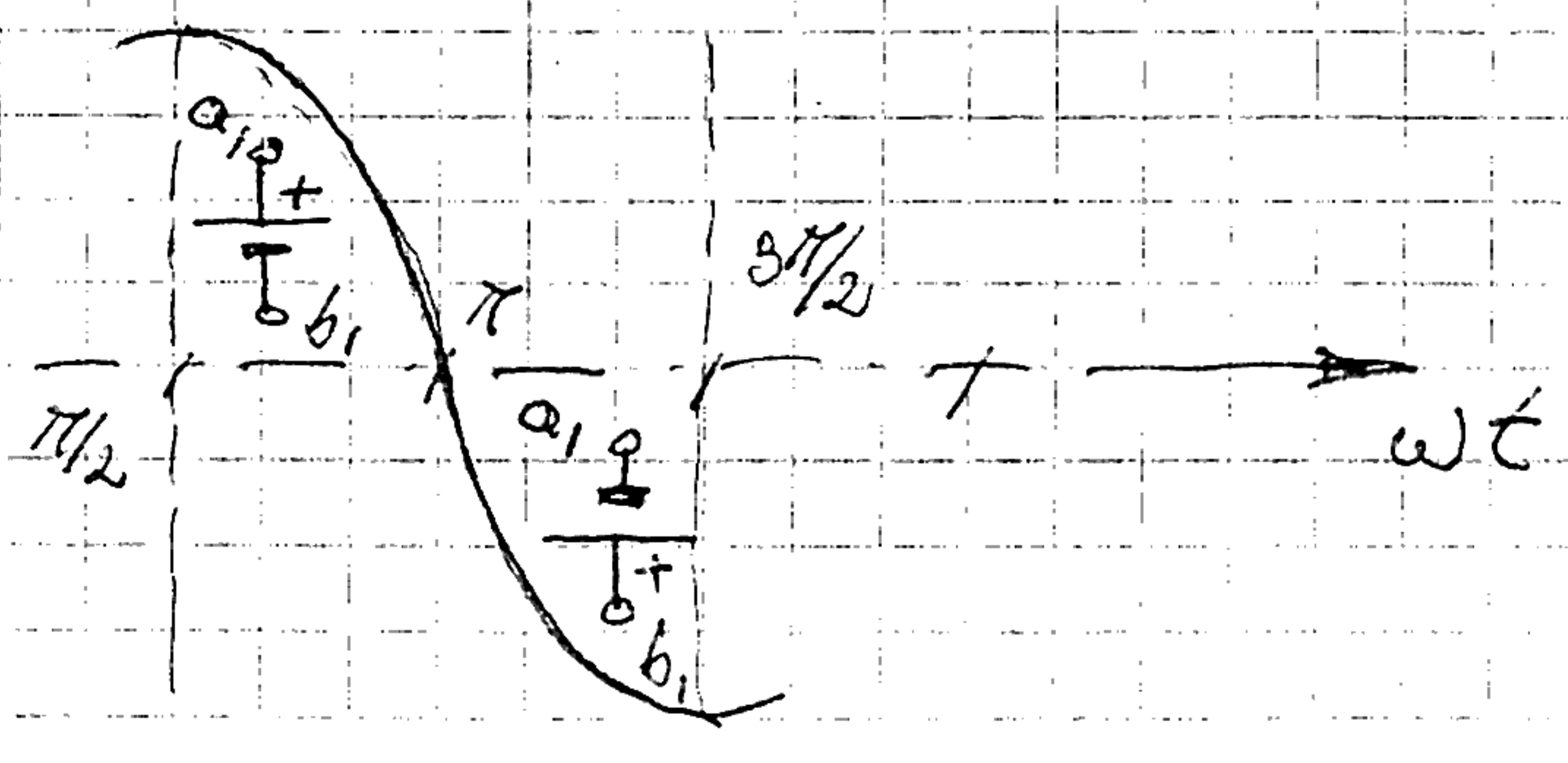
$\pi < \omega t < \frac{3\pi}{2}$ ($10\text{ms} < t < 15\text{ms}$)



$$V_{a_1} - V_{b_1} \text{ [mV]} \downarrow$$

$$130,65$$

$$V_{a_1} - V_{b_1} = 130,65 \text{ sen } \omega t \text{ [mV]} < 0$$



* BOBINA 2

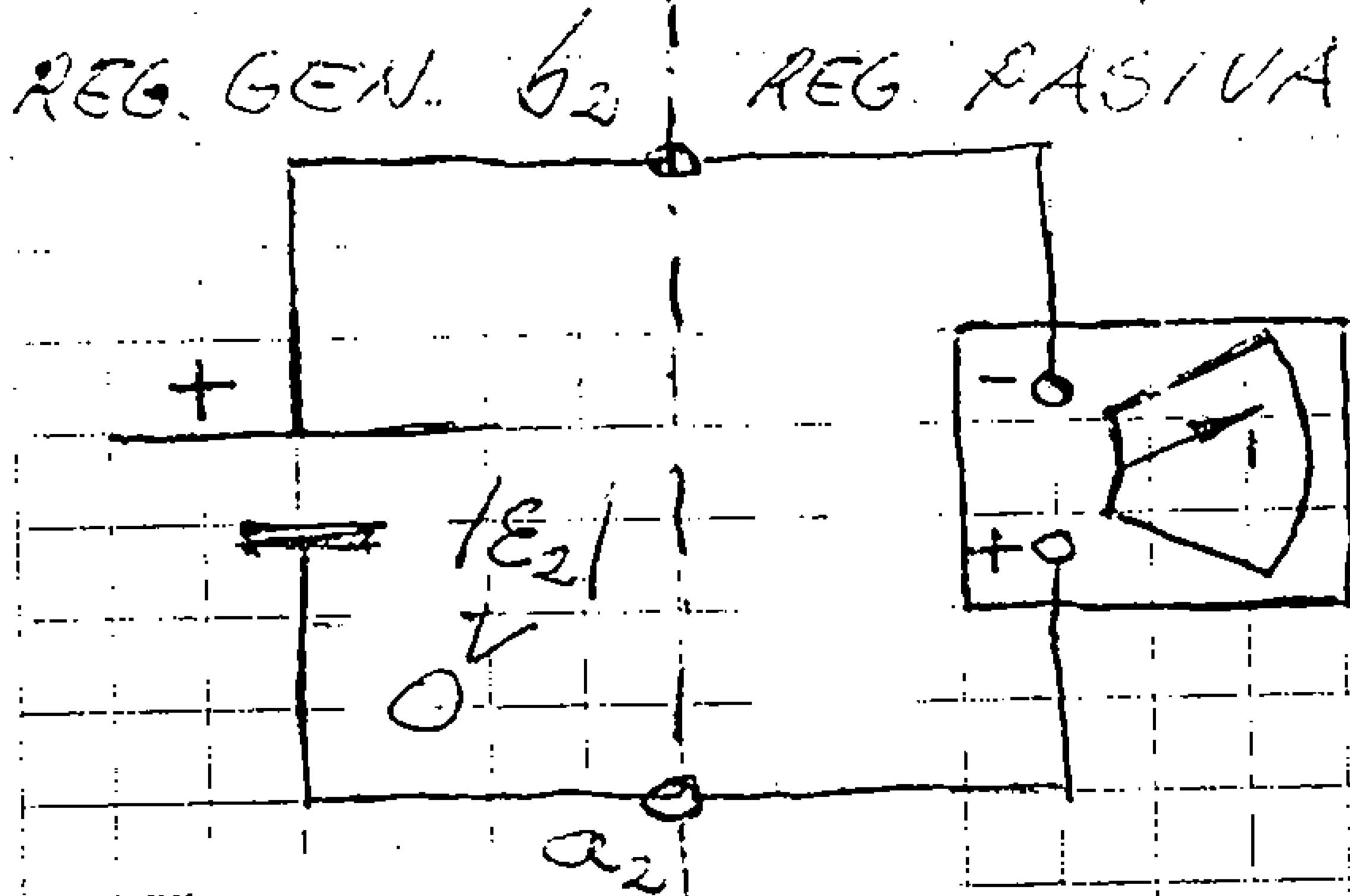
$$|E_{e2}| = \left| - \frac{d\Phi_{s2}}{dt} \right| = \left| -415,88 \cdot 10^{-9} I_0 \frac{d \cos \omega t}{dt} \right| =$$

$$= \left| -415,88 \cdot 10^{-9} I_0 (-\omega \operatorname{sen} \omega t) \right| =$$

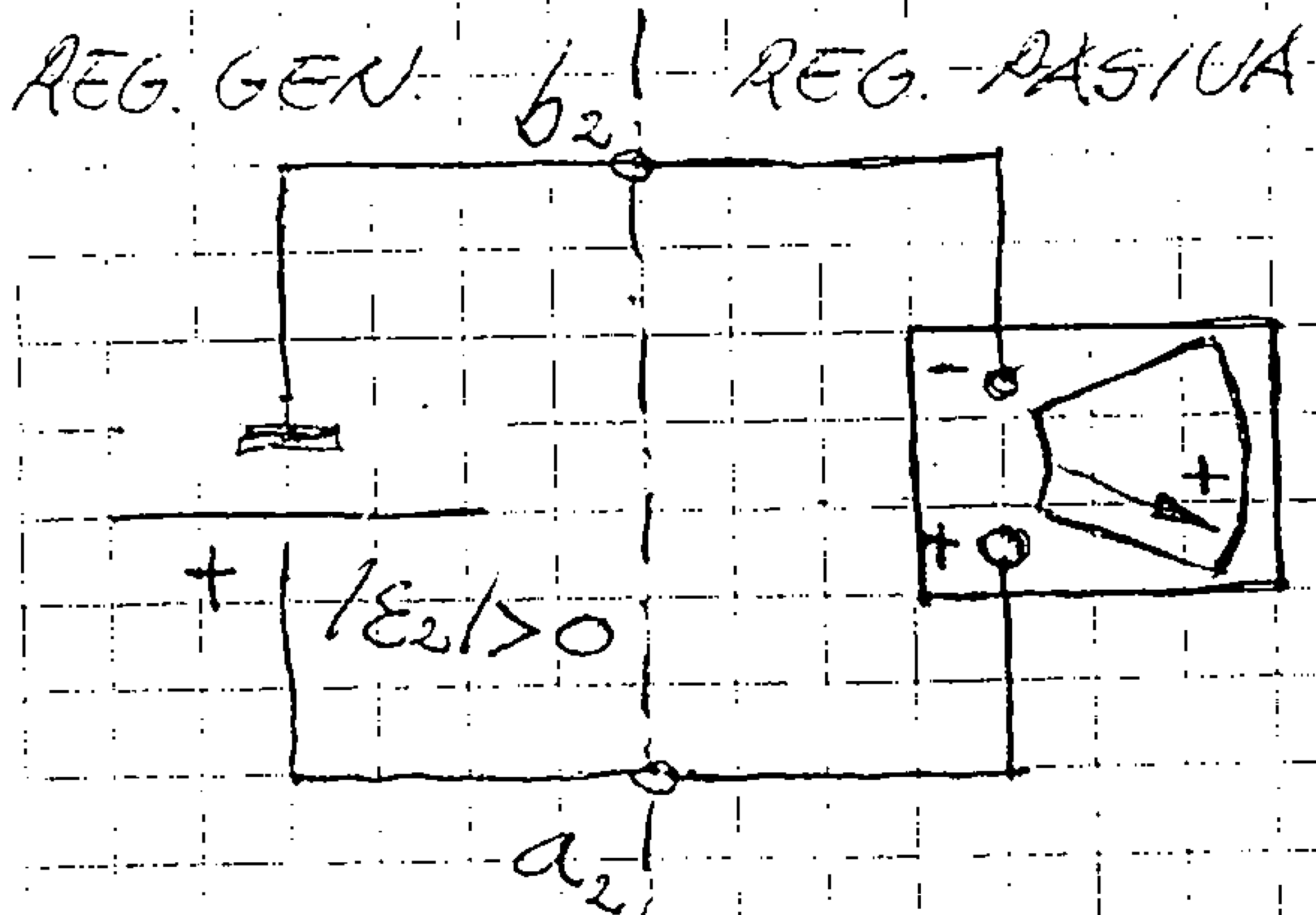
$$= 415,88 \cdot 10^{-9} I_0 \cdot \omega \cdot |\operatorname{sen} \omega t| =$$

$$= 130,65 \cdot 10^{-6} \cdot I_0 |\operatorname{sen} \omega t| = 65,33 |\operatorname{sen} \omega t| \text{ mV}$$

$$\forall \frac{\pi}{2} < \omega t < \pi \quad (5 \text{ ms} < t < 10 \text{ ms})$$



$$V_{a_2} - V_{b_2} = -65,33 \operatorname{sen} \omega t \text{ [mV]} < 0$$



$$\forall \pi < \omega t < \frac{3\pi}{2} \quad (10 \text{ ms} < t < 15 \text{ ms})$$

$$V_{a_2} - V_{b_2} = -65,33 \operatorname{sen} \omega t \text{ [mV]} > 0$$

