OLIMPIADI DI FISICA 2001

20 Aprile 2001

SOLUZIONI della Gara Nazionale (Prova Teorica)

PROBLEMA n. 1 — Due in uno!

100 Punti

A — Cilindro con pistone

35 Punti

Quesito n. 1 – Quantità di gas nella porzione di destra.

Detta x la distanza del pistone dalla parete di sinistra del cilindro e applicando l'equazione di stato dei gas perfetti, nella parte sinistra del cilindro si ha

$$p'Ax = n_1RT_1 \quad \text{e in quella destra} \quad p''A(\ell - x) = n_2RT_2\,.$$

Poiché la condizione è di equilibrio meccanico le due pressioni devono essere uguali $p' = p'' = p$; eliminando la pressione p dalle due equazioni si ottiene

$$\frac{\ell - x}{x} = \frac{n_2T_2}{n_1T_1} \quad \Rightarrow \quad n_2 = n_1\frac{T_1}{T_2}\frac{\ell - x}{x} = 1.2\,\text{mol}$$

dove, ovviamente, le temperature sono espresse in kelvin.

Quesito n. 2 – Temperatura finale del pistone.

All'equilibrio termico alla temperatura T, considerando il bilancio energetico si ha

$$n_1C_V(T - T_1) + n_2C_V(T - T_2) + cm(T - T_0) = 0$$

essendo $C_V = 3R/2$ il calore specifico del gas monoatomico a volume costante; ponendo adesso $n_0 = c\,m/C_V = 4.1\,\text{mol}$, si ricava

$$T = \frac{n_1C_VT_1 + n_2C_VT_2 + cmT_0}{n_1C_V + n_2C_V + cm} = \frac{n_1T_1 + n_2T_2 + n_0T_0}{n_1 + n_2 + n_0} = 307\,\text{K} = 34°\text{C}\,.$$

Quesito n. 3 – Spostamento del pistone.

Nella nuova situazione di equilibrio, dalla legge di stato dei gas perfetti si ottiene

$$p'Ax' = n_1RT \quad \text{e} \quad p'A(\ell - x') = n_2RT\,,$$

avendo indicato con x' la nuova posizione del pistone e con p' la pressione, ancora uguale nei due gas.

Dividendo le due equazioni membro a membro, si elimina ancora p' e si ha

$$\frac{\ell - x'}{x'} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad x' = \ell\frac{n_1}{n_1 + n_2} = 0.66\,\text{m}$$

Il pistone si sarà dunque spostato verso destra di una quantità

$$\Delta x = x' - x = 0.13\,\text{m}\,.$$

B

Una sbarretta in un campo magnetico *65 Punti*

La f.e.m. richiesta si ricava dalla legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

dove $\Delta\Phi$ rappresenta il cosiddetto *flusso tagliato*, cioè il flusso del campo di induzione magnetica attraverso la superficie *spazzata* dalla sbarretta nel tempo Δt.

L'area della superficie spazzata vale $\Delta S = \ell\, v \Delta t \operatorname{sen}\gamma$ e il flusso tagliato, essendo $\vec{B}$ uniforme, vale

$$\Delta\Phi = \Delta S\, B_\perp = B_\perp\, \ell\, v \Delta t \operatorname{sen}\gamma\,,$$

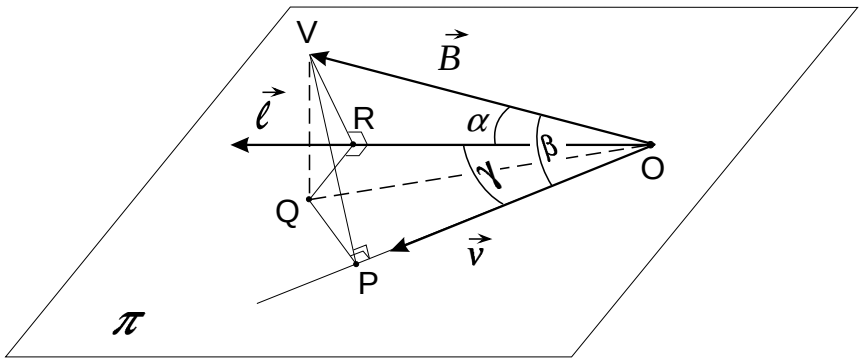
avendo indicato con $B_\perp$ la componente di B ortogonale alla superficie spazzata dalla sbarretta, ovvero al piano π. Il modulo della f.e.m. indotta vale dunque

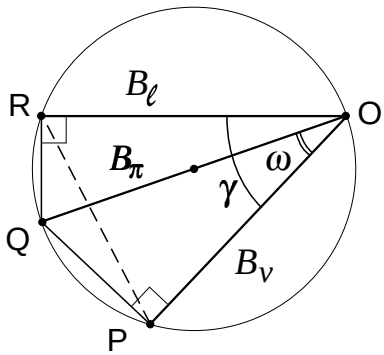
$$|\mathcal{E}| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = B_\perp\, v\ell \operatorname{sen}\gamma\,.$$

Con riferimento alle seguenti figure, si considerino le proiezioni di $\vec{B}$ lungo le direzioni della velocità $\vec{v}$ e della sbarretta (individuata dal vettore $\vec{\ell}$) nel piano π, dette rispettivamente B_v e B_ℓ; esse risultano

$$B_\ell = B\cos\alpha \quad \text{e} \quad B_v = B\cos\beta\,.$$

Si noti che l'angolo $\widehat{\mathrm{OPQ}}$ è retto (infatti il piano individuato dai punti V, Q e P è ortogonale sia al piano π sia alla direzione di $\vec{v}$); quindi $\overline{\mathrm{OQ}}$, che rappresenta la proiezione B_π del vettore $\vec{B}$ sul piano π, è il diametro della semicirconferenza entro la quale è inscritto il triangolo OPQ. Analoga considerazione si applica al triangolo ORQ.





Con riferimento alla figura a destra (dove il piano del foglio è il piano π), utilizzando il teorema di Carnot e il teorema della corda, si può scrivere

$$\begin{cases} \overline{\mathrm{PR}} = \sqrt{\overline{\mathrm{OR}}^2 + \overline{\mathrm{OP}}^2 - 2\,\overline{\mathrm{OR}}\,\overline{\mathrm{OP}}\cos\gamma} \\ \overline{\mathrm{PR}} = \overline{\mathrm{OQ}}\operatorname{sen}\gamma \end{cases} \quad \text{da cui} \quad \overline{\mathrm{OQ}} = \frac{\sqrt{\overline{\mathrm{OR}}^2 + \overline{\mathrm{OP}}^2 - 2\,\overline{\mathrm{OR}}\,\overline{\mathrm{OP}}\cos\gamma}}{\operatorname{sen}\gamma}$$

che, in termini delle proiezioni definite sopra, si scrive

$$B_\pi = \frac{\sqrt{B_\ell^2 + B_v^2 - 2\,B_\ell\,B_v\cos\gamma}}{\operatorname{sen}\gamma} = B\,\frac{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta - 2\cos\alpha\,\cos\beta\,\cos\gamma}}{\operatorname{sen}\gamma}\,.$$

Infine, essendo

$$B_\perp = \sqrt{B^2 - B_\pi^2} = B\sqrt{1 - \frac{\cos^2\alpha + \cos^2\beta - 2\cos\alpha\,\cos\beta\,\cos\gamma}{\operatorname{sen}\gamma}}\,,$$

si può calcolare la f.e.m. indotta richiesta:

$$\mathcal{E} = B_\perp v\ell \operatorname{sen}\gamma = Bv\ell\sqrt{1 - (\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma) + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma} = 0.16\,\mathrm{mV}\,.$$

In alternativa, e sempre con riferimento alla figura a destra, indicando con ω l'angolo $\widehat{\mathrm{POQ}}$, si ha

$$\begin{cases} \overline{\mathrm{OP}} = \overline{\mathrm{OQ}} \cos\omega \\ \overline{\mathrm{OR}} = \overline{\mathrm{OQ}} \cos(\gamma - \omega) \end{cases}$$

da cui, sviluppando $\cos(\gamma - \omega)$ ed eliminando ω si ottiene nuovamente l'espressione di $\overline{\mathrm{OQ}}$ trovata sopra.

Soluzione alternativa.

Questa soluzione si differenzia dalla precedente sia perché non fa uso del *flusso tagliato* (e di conseguenza della legge dell'induzione elettromagnetica) sia perché impiega un formalismo vettoriale più marcato.

Si consideri un sistema di riferimento ortogonale tridimensionale con l'asse x orientato lungo la direzione di v e l'asse y ortogonale ad esso e giacente nel piano formato da $\vec{v}$ e $\vec{B}$; si tratta del sistema di assi mostrato nella figura del testo.

I vettori dati e il vettore $\vec{\ell}$ già citato, che individua lunghezza e orientamento della sbarretta, sono espressi, in termini di componenti, da

$$\begin{cases} \vec{v} = (v;\, 0;\, 0) \\ \vec{B} = (B_x;\, B_y;\, 0) \\ \vec{\ell} = (\ell_x;\, \ell_y;\, \ell_z) \end{cases}$$

Di queste sono immediatamente note le componenti

$$B_x = B\,\cos\beta, B_y = B\,\operatorname{sen}\beta \quad \text{e} \quad \ell_x = \ell\,\cos\gamma$$

mentre dal prodotto scalare $\vec{B}\cdot\vec{\ell}$ si ricava poi

$$\vec{B}\cdot\vec{\ell} = B_x\ell_x + B_y\ell_y = B\ell\,\cos\alpha \quad \Rightarrow \quad \ell_y = \frac{B\ell\,\cos\alpha - B_x\ell_x}{B_y} = \ell\,\frac{\cos\alpha - \cos\beta\,\cos\gamma}{\operatorname{sen}\beta}$$

Infine la componente ℓ_z si ricava col teorema di Pitagora:

$$\ell_z = \sqrt{\ell^2 - \ell_x^2 - \ell_y^2} = \ell\sqrt{1 - \cos^2\gamma - \left(\frac{\cos\alpha - \cos\beta\,\cos\gamma}{\operatorname{sen}\beta}\right)^2} =$$

$$= \ell\,\frac{\sqrt{1 - (\cos^2\alpha + \cos^\beta + \cos^2\gamma) + 2\cos\alpha\,\cos\beta\,\cos\gamma}}{\operatorname{sen}\beta}$$

La forza per unità di carica, $\vec{E}$, che il campo uniforme di induzione magnetica esercita sulle cariche libere della sbarretta (nota anche come *campo elettromotore*) vale

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \vec{v}\times\vec{B} = (0;\, 0;\, vB\operatorname{sen}\beta)\,.$$

La f.e.m. indotta tra gli estremi della sbarretta, di conseguenza, vale

$$\mathcal{E} = \vec{E}\cdot\vec{\ell} = vB\operatorname{sen}\beta\,\ell_z \quad \text{ossia, come sopra,}$$

$$\mathcal{E} = Bv\ell\sqrt{1 - (\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma) + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma} = 0.16\,\mathrm{mV}\,.$$

In termini vettoriali il risultato si esprime in modo più compatto come il *prodotto misto* $\vec{v}\times\vec{B}\cdot\vec{\ell}$ oppure, in modo equivalente come $\vec{B}\cdot\vec{\ell}\times\vec{v}$; nel caso in esame tale prodotto vale semplicemente $v_x\,B_y\,\ell_z$.

PROBLEMA n. 2 — Misura del raggio di una stella

100 Punti

Quesito n. 1 – Distanza della stella.

Dal confronto dei due campi stellari in figura, si stima lo spostamento angolare δ della stella (circa 7 mm pari a 0.35"); questo è l'angolo da cui si vede l'orbita terrestre dalla stella. Detta D la distanza e $2a$ il diametro dell'orbita terrestre ($a = 1\,\mathrm{UA}$) risulta

$$\delta = 2a/D \approx 1.7 \times 10^{-6}\,\mathrm{rad} \quad \Rightarrow \quad D \approx 1.2 \times 10^{6}\,\mathrm{UA}$$

Quesito n. 2 – Spostamento del rivelatore.

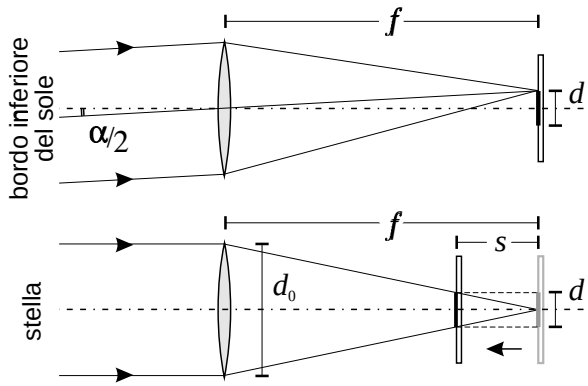
Il diametro dell'immagine del Sole (sul piano focale) è $d = \alpha\, f$, con $\alpha = 32' = 9.3 \times 10^{-3}$ rad (v. figura, in alto, in cui sono rappresentati alcuni raggi emessi dal bordo inferiore del Sole, mentre lo strumento punta sul centro del disco solare).

Per ottenere che una sorgente puntiforme all'infinito (posta ancora sull'asse dello strumento) illumini la stessa porzione di rivelatore occorre spostare quest'ultimo (avanti o indietro) di una quantità s tale che

$$\frac{d_o}{f} = \frac{d}{s} = \frac{\alpha\, f}{s}$$

essendo d_o il diametro dell'obiettivo (v. figura, in basso). Risulta allora

$$s = \frac{\alpha\, f^2}{d_o} = 7.8\,\mathrm{cm}$$



Quesito n. 3 – Rapporto dei flussi luminosi.

Poiché nei due casi (A e B) l'area illuminata è la stessa, detto t il tempo di esposizione della stella che darebbe lo stesso valore di energia incidente, il rapporto dei flussi luminosi incidenti sul rivelatore è uguale all'inverso del rapporto dei tempi:

$$\frac{\Phi}{h^3\,\Phi_0} = \frac{t_0}{t}$$

essendo h il coefficiente di attenuazione di ciascun filtro ($h = 0.015$). Dal grafico si ricava $t \approx 120\,\mathrm{s}$ da cui

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = (0.015)^3\,\frac{1.3 \times 10^{-3}}{120} \approx 3.7 \times 10^{-11}$$

Quesito n. 4 – Stima del raggio della stella.

Il flusso luminoso proveniente da sorgenti (isotrope) ad una data temperatura è proporzionale alla potenza emessa e inversamente proporzionale al quadrato della distanza; la potenza emessa è a sua volta proporzionale alla superficie e quindi al quadrato del raggio; in definitiva

$$\Phi = k\,\frac{R^2}{D^2}$$

Indicando con l'indice 0 le quantità "solari" si può scrivere

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{R^2}{D^2}\,\frac{D_0^2}{R_0^2} = \eta \quad \text{da cui} \quad R = \sqrt{\eta}\left(\frac{D}{D_0}\right) R_0 \approx 7\,R_0$$

Quesito n. 5 – Luce arrossata.

Se la luce della stella è più rossa significa che la temperatura della superficie è più bassa di quella solare.

La potenza emessa, per la legge di Stefan-Boltzmann, è proporzionale alla quarta potenza della temperatura:

$$W = \sigma\, 4\pi\, R^2\, T^4$$

per cui l'espressione precedente si modifica come segue

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{R^2\, T^4}{D^2}\,\frac{D_0^2}{R_0^2\, T_0^4} \quad \Rightarrow \quad R = \sqrt{\eta}\left(\frac{D}{D_0}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 R_0$$

Dunque il raggio della stella è maggiore in proporzione al quadrato del rapporto delle temperature.

Nota conclusiva: il campo stellare di cui si parla è chiaramente frutto di fantasia; infatti una stella come quella esaminata, alla distanza che risulta dai dati del problema, vista da Terra avrebbe una luminosità di poco inferiore a quella di Sirio; nella regione di cielo citata (presso il polo visibile dell'eclittica) una stella simile non c'è.

PROBLEMA n. 3 — Pendolo con un fermo

100 Punti

Quesito n. 1 – Posizione del pendolo per una data tensione del filo.

Sulla pallina agiscono la tensione T e il peso Mg. In un punto generico la forza complessiva radiale (centripeta) è quindi $T - Mg\,\cos\theta$ che dev'essere uguale a Mv^2/R.

Per la conservazione dell'energia dev'essere $MgR(1+\cos\theta) = {}^1\!/_2\, Mv^2$, per cui si ottiene

$$T - Mg\,\cos\theta = 2Mg(1+\cos\theta) \quad \Rightarrow \quad \frac{T}{Mg} = 2 + 3\cos\theta$$

da cui si ricava

$$\frac{7}{2} = 2 + 3\cos\theta \quad \Rightarrow \quad \cos\theta = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad \theta = 60^\circ\,.$$

Quesito n. 2 – La pallina non raggiunge C.

Per la sola conservazione dell'energia la pallina potrebbe giungere in C con velocità nulla. Ma in tal caso la tensione del filo non potrebbe essere maggiore di zero. Quindi non può giungere in C con il filo teso.

Quesito n. 3 – Termine della traiettoria circolare.

Finché $\theta < 90^\circ$, il filo è teso per qualsiasi valore di v, quindi la condizione in cui il filo non sarà più in tensione si realizza per $\theta > 90^\circ$. In tal caso sia la tensione che il peso sono rivolti verso il basso, quindi le componenti lungo il filo si sommano e poiché $\cos\theta < 0$, si ha ancora $T - Mg\cos\theta = Mv^2/R$ e si ritrova la relazione precedente; dunque si ha che $T = 0$ per

$$2 + 3\cos\theta = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos\theta = -2/3 \quad \Rightarrow \quad \theta \approx 132^\circ$$

Quesito n. 4 – Posizione della pallina in caduta.

Una volta che il filo non è più in tensione, il moto è balistico. Detto θ_0 il valore appena calcolato per cui inizia il moto balistico, all'istante iniziale è

$$v = v_0 = \sqrt{2Rg(1+\cos\theta_0)} = \sqrt{\frac{2Rg}{3}}$$

Fissato un sistema cartesiano con origine in C, asse x orizzontale in verso opposto alla posizione iniziale della pallina e asse y verticale verso l'alto, all'istante iniziale del moto balistico si ha $x_0 = R\,\mathrm{sen}\,\theta_0$ e $y_0 = -R(1+\cos\theta_0)$.

Le componenti della velocità iniziale in tale sistema sono $v_{0,x} = v_0\,\cos\theta_0$ e $v_{0,y} = v_0\,\mathrm{sen}\,\theta_0$.

Le equazioni del moto sono quindi

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0,x}\,t \\ y(t) = y_0 + v_{0,y}\,t - \dfrac{1}{2}\,gt^2 \end{cases}$$

La pallina passa sotto C quando $x = 0$. Ricavando t e calcolando y si ottiene

$$t = -\frac{x_0}{v_{0,x}} = -\sqrt{\frac{3R}{2g}}\,\frac{\mathrm{sen}\,\theta_0}{\cos\theta_0}$$

positivo essendo $\cos\theta_0 < 0$; di conseguenza

$$y = -R(1+\cos\theta_0) - \frac{R\,\mathrm{sen}^2\,\theta_0}{\cos\theta_0} - \frac{1}{2}g\,\frac{3R^2\,\mathrm{sen}^2\,\theta_0}{2Rg\,\cos^2\theta_0} = -\frac{7}{16}\,R$$

Il valore ottenuto ci assicura che il filo continua a non essere teso. Cioè la pallina passa al di sotto di C a una distanza $(7/16)\,R$ da esso, quindi poco più in alto che a metà strada fra P e C.

Quesito n. 5 – Modulo della velocità della pallina in caduta.

Per la conservazione dell'energia,

$$\frac{7}{16}\,MgR = \frac{1}{2}Mv^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{7Rg}{8}}\,.$$

In alternativa si possono utilizzare le equazioni delle due componenti della velocità, calcolate al tempo t e ricavarne successivamente il modulo.

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{0,x} = v_0\cos\theta_0 = -\dfrac{2}{3}\,v_0 \\ v_y(t) = v_{0,y} - gt = v_0\,\mathrm{sen}\,\theta_0 - gt = -\dfrac{5\sqrt{5}}{12}\,v_0 \end{cases}$$

Si trova infine

$$v = \sqrt{\frac{4}{9} + \frac{125}{144}}\,v_0 = \sqrt{\frac{21}{16}}\,v_0 = \sqrt{\frac{7Rg}{8}}$$

PROBLEMA n. 4 — Ancora due in uno!

100 Punti

A

Apertura di un freezer *50 Punti*

Siano V ed S rispettivamente il volume del freezer e la superficie dello sportello; il freezer contiene n moli d'aria essendo $p_0\,V = nRT \quad \Rightarrow \quad n = p_0\,V/RT$.

La massa d'aria che entra all'apertura, pari a n' moli, è alla temperatura T_0 ambiente, alla pressione p_0 ambiente e occupa un volume $V/2$ (dato che sostituisce metà della massa precedente): ne segue che $n' = p_0\,V/2RT_0$

La massa d'aria si raffredda fino alla temperatura T di equilibrio: la pressione a questo punto si ricava ancora dalla legge di stato dei gas perfetti

$$p\,V = (n' + n/2)RT \quad \Rightarrow \quad p = \frac{(2n' + n)RT}{2V} = \frac{p_0}{2}\left(\frac{T}{T_0} + 1\right) < p_0$$

La differenza di pressione è quindi

$$\Delta p = p_0 - p = \frac{p_0}{2}\left(1 - \frac{T}{T_0}\right)$$

e questa dà luogo ad una forza, applicata nel centro dello sportello, pari a

$$F = S\Delta p = \frac{S\,p_0}{2}\left(1 - \frac{T}{T_0}\right)$$

La forza F' da applicare alla maniglia deve essere tale da dare un momento rispetto all'asse dei cardini uguale (in modulo) a quello della forza F e dunque $F' = F/2$.

Assumendo $S = 0.2\,\mathrm{m}^2$, $T = -18°\mathrm{C} = 255\,\mathrm{K}$ e $T_0 = 20°\mathrm{C} = 293\,\mathrm{K}$ si trova $F' \approx 660\,\mathrm{N}$ pari al peso di una massa di circa 67 kg.

Poiché l'esperienza comune mostra come la forza necessaria sia molto minore di quella trovata, si deve concludere che il vano del freezer non è a tenuta d'aria, cosicché la pressione interna torna ad essere uguale a quella esterna. Tuttavia per raggiungere il nuovo equilibrio può essere necessario – in certi casi – un tempo apprezzabile: questo spiega perché se si cerca di riaprire lo sportello subito dopo averlo chiuso si osserva che la forza necessaria è maggiore del solito.

B

Linea ad alta tensione *50 Punti*

Quesito n. 1 – Calcolo del rapporto delle resistenze.

Nel collegamento diretto la potenza erogata è $W_0 = (R+r)i^2$ mentre la potenza utilizzata è $W = Ri^2$; ne segue che il rendimento è

$$\eta = \frac{W}{W_0} = \frac{R}{r+R} \quad \Rightarrow \quad \frac{r}{R} = \frac{1-\eta}{\eta}$$

Quesito n. 2 – Calcolo del valore di k.

Con i trasformatori inseriti, detta i la corrente in R, la potenza utile è $W = Ri^2$ e la tensione sul carico è $V = Ri$.

A monte del secondo trasformatore corrente e tensione saranno quindi

$$V' = kV = kRi \quad \text{e} \quad i' = i/k \quad \text{essendo} \quad W = Vi = V'i' \quad \text{(trasformatore ideale)}$$

In uscita dal primo trasformatore avremo allora una tensione

$$k\mathcal{E} = V' + ri' = kRi + ri/k \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E} = Ri + ri/k^2$$

per cui, essendo nuovamente i la corrente nel circuito del generatore, la potenza erogata risulta

$$W_0 = \mathcal{E}\, i = (R + r/k^2)i^2$$

(ovviamente per $k = 1$ si ritrova l'espressione precedente).

Si ottiene infine

$$\eta(k) = \frac{R}{R + r/k^2} \quad \text{e invertendo} \quad k = \sqrt{\frac{r}{R}\frac{\eta}{1-\eta}}$$

Detto η_0 il rendimento con il collegamento diretto, per quanto sopra,

$$\frac{r}{R} = \frac{1-\eta_0}{\eta_0} = \frac{2}{3} \quad \text{da cui}$$

$$k = \sqrt{\frac{r}{R}\frac{\eta}{1-\eta}} = \sqrt{\frac{2}{3}999} = \sqrt{666} \approx 26$$

Si arriva allo stesso risultato impostando, in modo formale, un sistema di tre equazioni per le tre maglie del circuito, facendo uso della legge di Kirchhoff.

Siano i_1, i_2 e i_3 le correnti delle tre maglie, V_1 e V_1' le tensioni in ingresso e uscita del primo trasformatore e analogamente V_2 e V_2' per il secondo. Tra le tensioni valgono le relazioni

$$V_1' = k\, V_1 \quad \text{e} \quad V_2' = V_2/k$$

e per le correnti, come detto sopra, trattando i trasformatori come ideali

$$i_2 = i_1/k \quad \text{e} \quad i_3 = k\, i_2 = i_1$$

Le equazioni, nelle incognite V_1, V_2 ed $i = i_1$ sono dunque

$$\begin{cases} \mathcal{E} - V_1 = 0 \\ kV_1 - r\dfrac{i}{k} - V_2 = 0 \\ \dfrac{V_2}{k} - Ri = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = \mathcal{E} \\ V_2 = \dfrac{k^3\, R}{k^2\, R + r}\,\mathcal{E} \\ i = \dfrac{k^2\, \mathcal{E}}{k^2\, R + r} \end{cases} \Rightarrow \quad V_2' = \frac{k^2\, R}{k^2\, R + r}\,\mathcal{E}$$

Si ricava infine

$$\eta = \frac{W}{W_0} = \frac{V_2'\, i}{V_1\, i} = \frac{V_2'}{V_1} = \frac{k^2\, R}{k^2\, R + r} = \frac{R}{R + r/k^2}$$

come trovato in precedenza.

Materiale prodotto dal gruppo

PROGETTO OLIMPIADI
Segreteria Olimpiadi Italiane della Fisica
presso Liceo Scientifico "U. Morin"
VENEZIA MESTRE
fax: 041.584.1272
e-mail: olifis@libero.it