

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 53/61
16.10.1953.

G. Sacerdoti: ESAME DELL'INFLUENZA DEL PROFILO DEI
POLI DI UN SINCROTRONE DA 1 BEV SUL COSTO DELLA
MACCHINA E SUL COSTO DELL'ALIMENTAZIONE.-

ESAME DELL'INFLUENZA DEL PROFILO DEI POLI DI UN SINCROTRONE DA 1 BeV SUL COSTO DELLA MACCHINA E SUL COSTO DELL'ALIMENTAZIONE.- -----

a) Introduzione.

Per una certa forma di polo, quando ci si proponga di non superare un certo valore del campo magnetico nel ferro, onde evitare la saturazione, è determinato il valore massimo che il campo magnetico può assumere nell'intraferro. Da tale campo magnetico massimo ottenibile nella gap del sincrotrone, si risale, nota la energia a cui si vuole accelerare la particella, al raggio del sincrotrone.

In funzione quindi della forma del polo, in questa nota ricercheremo principalmente come varii il costo del sincrotrone e della sua alimentazione. Ci riserviamo di completare il quadro dei costi, quando si avranno dati indicativi sul costo dei basamenti e delle strutture di supporto del sincrotrone in funzione delle dimensioni del sincrotrone stesso.

b) Impostazione precisa del problema.

Noi ci riferiamo alla struttura di fig.1. ⁽¹⁾ Il parametro che terremo variabile sarà α . Manterremo a, b, c, h, costanti. Varieremo in base a criteri di similitudine l proporzionalmente al raggio (criterio valido a parere di molti studiosi). A rigor di termini eguale proporzionalità bisognerebbe mantenere per h_1 , e $a \times b$ (proporzionale all'area del rame) dovrebbe tenersi proporzionale a $B_{max} h_1$. Ma introducendo tali variazioni ~~tali variazioni~~ il problema si complicherebbe e, date il variare dei prezzi dei materiali sul mercato, perde d'importanza rendere troppo rigoroso il procedimento a scapito della chiarezza. (1)

I dati che serviranno a legare il flusso disperso al flusso utile sono stati forniti dall'ing. Amman che li ha rilevati su vasca elettrolitica. Questi dati sono indicati in Appedice n.1. Per utilizzare questi dati al nostro scopo faremo un'ipotesi non vera ma prossima al vero: che se noi modifichiamo un polo come in fig.3 aggiungendovi la striscia tratteggiata il $\frac{\Phi_u}{\Phi_d}$ (flusso utile diviso il flusso disperso) varii nell rapporto (i simboli si possono rilevare dalla fig.2)

$$\frac{\Phi_u''}{\Phi_d''} = \frac{\Phi_u' \frac{l_1+p}{l_1}}{\Phi_d' + \Phi_u' \frac{p}{l_1}} \quad (1)$$

(1) Quando avremo dati più completi sul flusso disperso al variare di $\frac{h_1}{a}$, potremo rendere più rigoroso il procedimento ponendo $h_1 = K_1 R + K_2$.

Altre precisazione che ci permetterà di usare i risultati sperimentali rilevati dall'ing. Amman è che se noi mutiamo tutte le dimensioni del modello che egli ha usate in un certo rapporto α il rapporto $\frac{\Phi_u}{\Phi_t}$ rimane invariato.

c) Risoluzione del problema.-

I simboli che verranno usati sono:

α = angolo

j = percentuale flusso disperso su quello totale nel modello.

R = raggio sincrotrone

B_i = induzione magnetica massima nell'intraferro reale

B_{im} = induzione magnetica massima nell'intraferro del modello.

B_{fem} = campo magnetico massimo nel ferro

a_{reale} = altezza finestra rame reale

b_{model} = altezza finestra rame modello

b_{reale} = larghezza finestra rame nel caso reale

b_{model} = larghezza finestra rame nel modello.

h_{lreale} = 0,8 dm = altezza della gap

h_{model} = 0,4 dm = altezza della gap

K = rapporto tra le dimensioni del modello e quelle reali = 3/2

$\Phi_{d\ reale}$ =

$\Phi_{d\ model}$ =

$\Phi_t\ reale$ = flusso totale

$\Phi_k\ reale$ = flusso reale

l_{reale} =

l_{model} =

W = elettroni volt massimi della particella alla fine della accelerazione.

Noi sappiamo che vale la seguente relazione:

$$R \cdot B_{im} = f(w) \quad (2)$$

Sappiamo che il flusso disperso nel modello è dato da una espressione del tipo:

$$\text{Web } B_i \cdot 0,08 \frac{1-j}{j} = \Phi_{dm} \quad \text{essendo } B_i = 0,08 = \text{flusso utile nel modello.}$$

j è funzione di α .

Il flusso disperso nel caso reale, in base a quel che si è detto in b) ~~è dato~~ è dato da:

$$F_{dm} k = 0,120 \frac{l-d}{f} \text{ Weber} \quad \text{ove } B_i \text{ sia espresso in Weber.}$$

Il flusso totale (nel caso reale) sarà (ci si riferisce a 1 metro di magnete):

$$F_{Lr} = B_i (0,120 \frac{l-d}{f} + l_1)$$

$B_i l_1$ rappresentando il contributo al flusso totale fornito dal flusso utile.

Il B nel ferro essendo $l_1 + 20,045 \frac{3}{2} \cot \alpha$ la larghezza del ferro sarà:

$$B_{Fe} = B_i \frac{(0,120 \frac{l-d}{f} + l_1)}{l_1 + 0,135 \cot \alpha}$$

da cui

$$B_i = B_{Fe} \frac{l_1 + 0,135 \cot \alpha}{0,120 \frac{l-d}{f} + l_1}$$

Ma dovendo essere soddisfatta la (2), ed essendo che per elettroni f(W) per un BeV assume il valore di 3,30 Weber/m, risulterà:

$$R \cdot B_i = R \frac{l_1 + 0,135 \cot \alpha}{0,120 \frac{l-d}{f} + l_1} B_{Fe} = 3,30 \quad (3)$$

Se pure in base a quel che ho detto in b) che l_1 è proporzionale a R: il valore del coefficiente di proporzionalità consigliato dall'esperienza di altri sincrotroni è 0,04. La (3) si trasforma allora nella equazione di secondo grado in R seguente:

$$R = \frac{0,043 R + 0,135 \cot \alpha}{0,120 \frac{l-d(\alpha)}{f(\alpha)} + 0,053 R} B_{Fe} = 3,30 \quad (4)$$

Assumiamo per B_{Fe} il valore di 1,4 (2).

d) Calcolo numerico.-

I valori di α per i quali erano state effettuate le misure in vasca elettrolitica del flusso disperso, sono sei. Nella tabella (1) ne sono stati riportati i valori.

La (4), in base ai valori numerici riportati in tabella 1 diventa:

per $\alpha = 45$	$0,04 R^2 + 0,041 R - 0,348 = 0$	$R = 2,47 \text{ m}$
per $\alpha = 52,20$	$0,04 R^2 + 0,011 R - 0,3175 = 0$	$R = 2,64 \text{ m}$
per $\alpha = 61$	$0,04 R^2 - R 0,019 - 0,2851 = 0$	$R = 2,92 \text{ m}$
per $\alpha = 71,40$	$0,04 R^2 - 0,039 R - 0,2651 = 0$	$R = 3,112 \text{ m}$

(2) Se avessimo assunto $h_1 = K_f R$ essendo funzione di α e di $\frac{h_1}{c}$ (rimanendo costanti a e b) sarebbe stata funzione implicita anche di $R f = f(\alpha R)$ e così $0,135 \cot \alpha$. La (4) sarebbe stata valida e per ogni α sarebbe stato possibile egualmente trovare R.

per $\alpha = 80$ $0,04R^2 - 0,07R - 0,2529 = 0$

$$R = 3,537 \text{ m}$$

per $\alpha = 90$ $0,04R^2 - 0,094R - 0,237 = 0$

$$R = 3,87 \text{ m}$$

In base ai valori ottenuti di R si risale alle dimensioni della gap, alle dimensioni del lamierino, al volume del ferro, al volume del rame, al B_{MAX} che si può avere nella gap. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella (2).

Da questi dati agevolmente si può costruire la tabella (3).

Il costo dell'alimentazione (choke coil - condensatori) è stimata in base al costo di $700/\text{joule}_{\text{max}}$ immagazzinati nella gap, valore dedotto dalla relazione dell'ing. Canarutto sulla alimentazione choke coil - condensatori.

e) Estensione dei risultati a sincrotroni simili.-

Se dilatiamo in un rapporto R le dimensioni della gap del nostro sincrotrone potremo ottenere dalle tabelle 1-2-3 molti dati per semplice similitudine. L'energia immagazzinata verrà aumentata nel rapporto $R^2/1$, B_1 rimarrà immutata, l'area del rame verrà cambiata nel rapporto $d^2 \cdot l_e$.

Nel caso di un angolo $\alpha = 71^\circ 40'$ sono stati calcolati alcuni dati caratteristici per un sincrotrone dilatato nel rapporto $4/3$ ($h_1 = 8 \text{ cm}$ invece di 6). I dati sono qui riassunti, e la struttura è riportata nel disegno del sincrotrone n.5.-

R	= 3,12 m	Peso ferro	= 57 tonnellate
h_1	= 8 cm	Peso rame	= 15 tonnellate
l_1	= 16,6 cm	Costo alimentazione (700 lire/joule)	= 154 milioni
Energia nella gap	= $2,2 \cdot 10^5$ Joule	Costo rame e ferro	= 50 milioni
C base del polo	= 22,6	Costo magneti + alimentazione	= 200 milioni
Finestra rame	= 16×26 cm		
$\frac{\Phi_u}{\Phi_t}$	= 0,556		
B_{MAX} ferro	= 1,4		
Raggio baricentro ferro	= 2,956		
α	= $71^\circ 40'$		

α	45°	52°20'	61°	71°40'	80°	90°
δ	0,447	0,471	0,498	0,516	0,528	0,544
$\frac{1-\delta}{\delta}$	1,237	1,123	1,008	0,938	0,8939	0,8382
0,135 cot α	0,135	0,105	0,075	0,045	0,024	0,000
$\frac{1-\delta}{\delta}$ 0,120	0,148	0,1347	0,12096	0,1125	0,1073	0,1005

TABELLA 1

α	45°	52°20'	61°	71°40'	80°	90°
R	2,47	2,64	2,92	3,112	3,5337	3,87
0,135 cot α	0,135	0,105	0,075	0,045	0,024	0,000
$e_1 = 0,04 r$	0,0988	0,1056	0,11680	0,1245	0,1413	0,1548
$e_1 + 0,135$ cot α	0,234	0,216	0,192	0,1695	0,165	0,153
Volume ferro / 2π (m ³)	0,844	0,772	0,743	0,661	0,727	0,725
Volume rame / 2π (m ³)	0,184	0,158	0,175	0,187	0,212	0,232
B _{max} gap	1,336	1,25	1,13	1,06	0,934	0,853
Raggio medio lamierini	2,294	2,476	2,76	2,967	3,39	3,73
Perimetro medio di un lamierino (m)	1,574	1,48	1,405	1,316	1,299	1,257
Area ferro lamierini	0,368	0,3117	0,2994	0,223	0,2147	0,1944
Area rame	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

TABELLA 2

	1	2	3	4	5	6
Peso ferro (ton.)	41	37,8	36,42	32,37	35,6	35,5
Peso rame	8,27	8,83	9,78	10,46	11,84	12,9
Costo ferro Lit 100 / Ton. (milioni)	24,8	22,6	21,8	19,4	21,4	21,4
Costo rame Lit 1000 / Ton.	8,27	8,83	9,78	10,46	11,84	12,9
Lunghezza equivalente del intraferro per calcolare l'energia totale immagazzinata nel sincrotrone	0,2468	0,24	0,2377	0,237	0,2486	0,255
Area gap equivalente (dm ²)	1,48	1,44	1,426	1,422	1,492	1,5318
B ² (gauss)	1,7849	1,5625	1,27	1,123	0,8723	0,7276
Volume V intraferro equivalente	0,2292	0,238	0,2615	0,2779	0,331	0,3722
Energia = $\frac{B^2 V}{2\pi}$ (Tonne)	$1,59 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$	$1,15 \cdot 10^5$	$1,078 \cdot 10^5$
Costo alimentazione (milioni)	112	103	92	87	80	75
Costo alimentazione + costo magneti	145	134	124	117	113	110

TABELLA 3

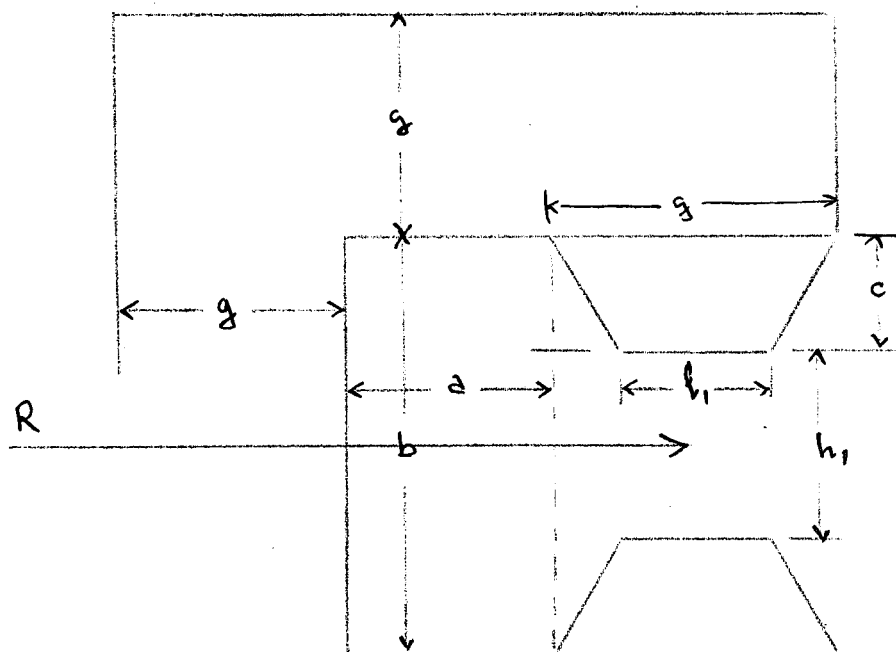
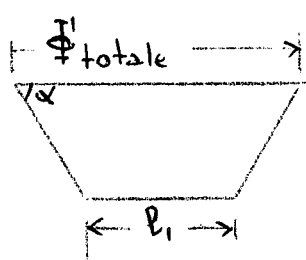
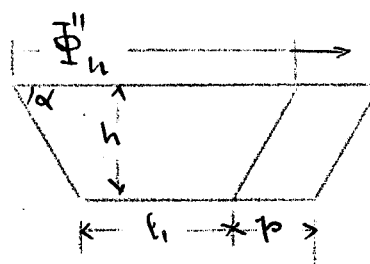


FIG. 1



$$\Phi_n'$$


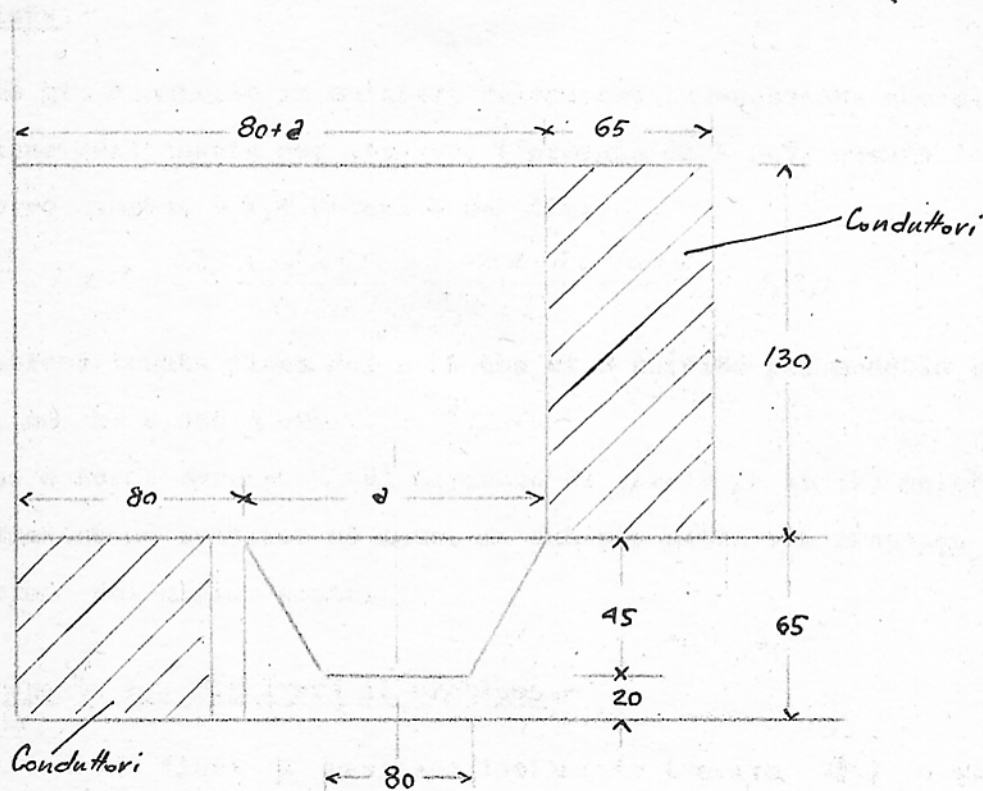
$$\Phi_n' \text{ totale}$$

FIG. 2

Appendice 1

Determinazione del flusso disperso

Milano, 6.10.1953.



$$K = \frac{\text{flusso totale}}{\text{flusso utile}} ; \quad \gamma = \frac{1}{K} = \frac{\text{flusso utile}}{\text{flusso totale}}$$

	1	2	3	4	5	6
a mm	170	150	130	110	96	80
α°	45°	$52^\circ 20'$	61°	$71^\circ 40'$	80°	90°
γ	44,7%	47,1%	49,8%	51,6%	52,8%	54,4%
K	2,24	2,12	2,01	1,94	1,89	1,84

PROCEDIMENTO TEORICO PER DETERMINARE IL MINIMO COSTO DEL SINCROTRONE
E DELLA SUA ALIMENTAZIONE IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI PENDENZA DELLA
SCARPA POLARE. - -----

a) Introduzione.-

Come ho già esaminato in un'altra relazione, la equazione che ci dà il raggio in funzione dell'angolo per ottenere l'energia di 1 BeV, quando la saturazione nel ferro massima è 1,4 Weber, è del tipo:

$$(1) \quad R \cdot B_i = 1,4 R \frac{0,05 R + [0,175 - 2 \cdot 0,025 R - 0,02] \cot \alpha}{0,120 \frac{1 - \frac{(\alpha h)}{R h}}{R h} + l_1} = 3,30$$

ove le dimensioni tenute fisse del polo che ci è servito per modelli sono indicate in fig.1, ed $h = 0,025 R + 2,02 \quad \frac{J_u}{E t} = j$.

Sarebbe assurdo cercare $\alpha (R)$ cercando di risolvere la (1) poichè $j'(\alpha R)$ non è una funzione nè semplice nè nota. Da cui per altra via propongo di risolvere il problema del minimo costo.

b) Metodo proposto per risolvere il problema.-

Se noi teniamo fisse h possiamo facilmente trovare $R(\alpha)$ e quindi costo sincrotrone $C(\alpha)$ e costo alimentazione (α) ; (vedi relazione precedente su l'argomento)-

In funzione di h possiamo tracciare le curve (vedi fig.2) del tipo $C(\alpha)h_1 = \text{cost.}$ $\text{Cost}(\alpha)h_2 = \text{cost.}$, ove C indica il costo del sincrotrone e dell'alimentazione di questo.

Inoltre potremmo ottenere la curva $R(\alpha)$ ottenuta per $h = \text{cost.}$ Ma ad ogni R possiamo far corrispondere un h attraverso la relazione $h = 0,025 R + 0,02 \text{ metri}$; il che vuol dire che cambiando l'origine e opportunamente la scala delle R si ottengono direttamente le h sull'asse delle R.

Data h_1 (leggiamo R_1) troviamo P_1 sulla curva $h_1 = \text{cost}$ mandando la parallela all'asse degli α per il punto $h = h_1$. Determiniamo α , nota H_1 e R e troviamo C_1 . Ripetendo questo procedimento troviamo per punti la curva $C(\alpha)$ che è quella che unisce i punti C così trovati. La curva che unisce i P è la curva di $R(\alpha)$.

Semberebbe con questo metode di dovere effettuare parecchie misure. Invece con 9 misure riusciamo a completare il quadro delle curve $C(\alpha)$ per h -cost ($R(\alpha)$ per N -cost).

Posto di aver determinate una circa $C(\alpha)$ h_1 -cost (già calcolata nella prima relazione) e di aver effettuato il compute del costo del sincrotrone (dei raggi) per:

h_2 - cost	$\alpha_1 =$	α_2	α_3	
h_3 - cost	α_1	α_2	α_3	(1)
h_4 - cost	α	$\alpha =$	$\alpha =$	

posso determinare le curve $C(h)$ per α -cost facendo l'ipotesi che siano della forma:

$$C(h) = C_{h_0}(\alpha) + K_1(\alpha)(h-h_0) + K_2(\alpha)(h-h_0)^2 + K_3(\alpha)(h-h_0)^3 \quad (2)$$

Provo quindi, sostituendo, i valori trovati di C nella (2) per i punti della tabella 1 i valori della tabella (3)

per α_1	$K_1(\alpha_1)$	$K_2(\alpha_1)$	$K_3(\alpha_1)$	
per α_2	$K_1(\alpha_2)$	$K_2(\alpha_2)$	$K_3(\alpha_2)$	(3)
per α_3	$K_1(\alpha_3)$	$K_2(\alpha_3)$	$K_3(\alpha_3)$	

Se pongo che

$$K_i = K_i(\alpha) + p_{i1}(\alpha - \alpha_1) + p_{i2}(\alpha - \alpha_1)^2 \quad (4)$$

e determino mediante i valori (3) i valori di p_{i1} e p_{i2}

Così noti questi coefficienti posso esplorare tutto il campo $C(h, \alpha)$. Analogamente per i raggi.

Che la finestra del rame si possa tener costante, è giustificato dal fatto che Bh è, come ha fatto notare l'ing. Amman, circa una costante, questo quando h si possa considerare uguale a BR e non a $BR+C$ come in realtà deve essere.



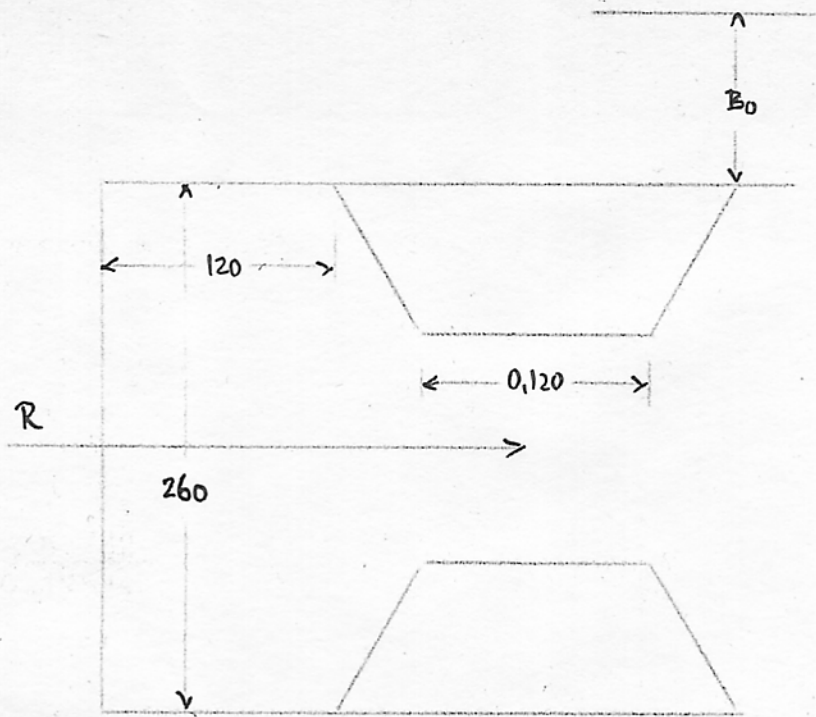


FIG. 1

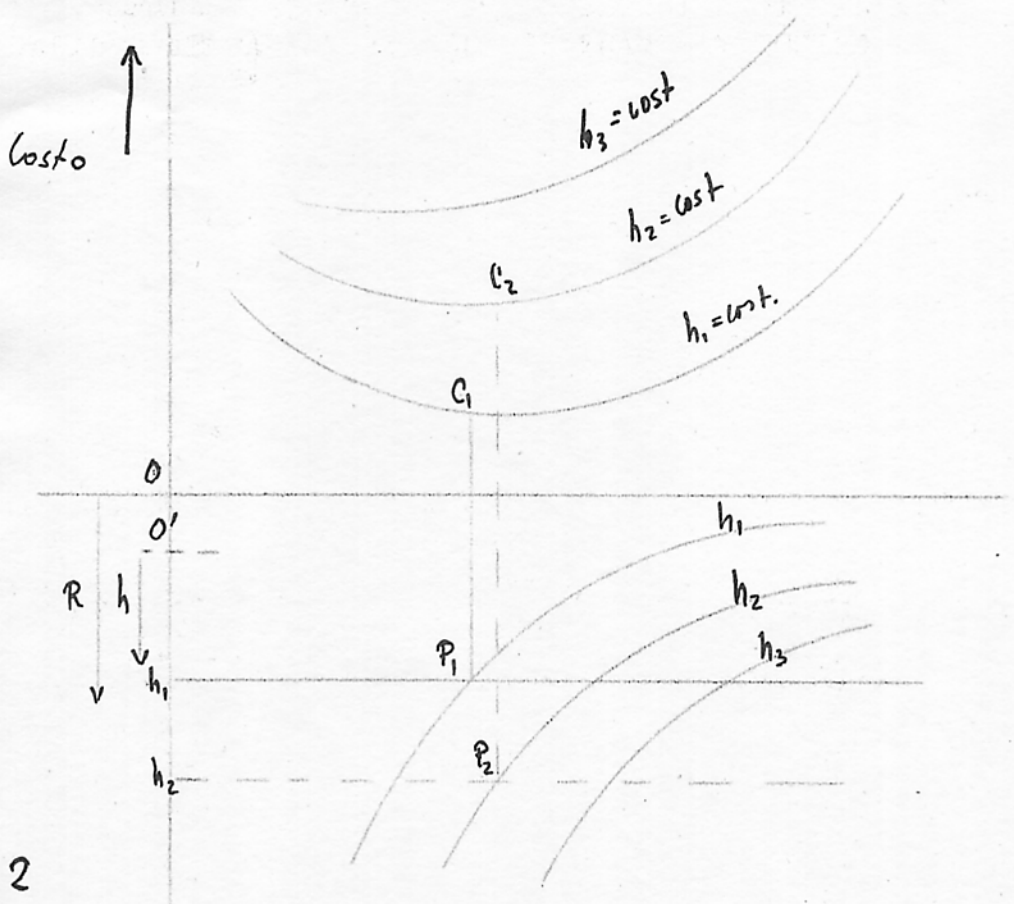


FIG. 2