

Simulazione e Ottimizzazione di un Impianto di Teleriscaldamento da Fonte Geotermica

Marco BECATTINI

Instructors: A. Vicino, A. Giannitrapani, S. Paoletti
Partner: R. Parri

1 Obiettivo

In un impianto di teleriscaldamento alimentato da fonte di calore geotermica gli unici costi di gestione dell'impianto derivano dalla potenza data alle pompe per il pompaggio delle acque di circolazione. Le stazioni di pompaggio lavorano a regime variabile e per un'ottimizzazione del sistema, bisogna far sì che le pompe lavorino in condizioni di buon rendimento e non si sprechi energia di pompaggio. Se nella rete di distribuzione non vi sono regolazioni (assenti le centraline d'utenza), tutta la portata circola nei primi scambiatori e per alimentare gli ultimi si deve pompare un maggior quantitativo di acqua, inoltre, le temperature di ritorno delle prime utenze saranno più alte. Le centraline di utenza risultano essere un elemento fondamentale per la regolazione e l'ottimizzazione di un impianto di teleriscaldamento in quanto dovrebbero limitare la portata dell'utenza allo stretto indispensabile e dovrebbero limitare al massimo la temperatura di ritorno. Più le temperature di ritorno sono basse maggiore sarà il rendimento.

2 Descrizione Impianto di Teleriscaldamento

Teleriscaldamento: sistema di riscaldamento a distanza di un quartiere o di una città che utilizza il calore prodotto da una centrale termica, da un impianto di cogenerazione o come nel nostro caso da sorgente geotermica. Il calore viene distribuito agli edifici tramite una rete di tubazioni in cui fluisce l'acqua calda. Il teleriscaldamento è una soluzione per la produzione di acqua igienico sanitaria e il riscaldamento degli edifici residenziali e commerciali.

Dalla centrale termica si produce acqua calda e viene portata dalla rete di distribuzione primaria fino ad una centrale di scambio. In quest'ultima si decide a che temperatura mandare l'acqua nel circuito secondario e con quale portata. L'acqua quindi viene mandata alle utenze, ognuna delle quali disporrà

di piccole sottocentrali di scambio costituite da scambiatori di calore, che permettono di realizzare lo scambio termico tra il fluido termovettore e l'acqua del circuito delle utenze, senza che vi sia miscelazione tra i due fluidi semplificando la progettazione dell'intera rete. Dopo che nell'edificio è stato trasferito il calore necessario per riscaldare gli ambienti e per produrre acqua calda sanitaria. L'acqua, ormai raffreddata, ritorna in centrale per essere di nuovo riscaldata. L'impianto di distribuzione interno agli edifici allacciati alla rete resta inalterato e lo scambiatore di calore sostituisce la caldaia convenzionale. Gli impianti di teleriscaldamento geotermico utilizzano fluido non idoneo (oppure in alcuni casi idoneo) alla produzione di energia elettrica. Il funzionamento è schematizzato in figura 1.

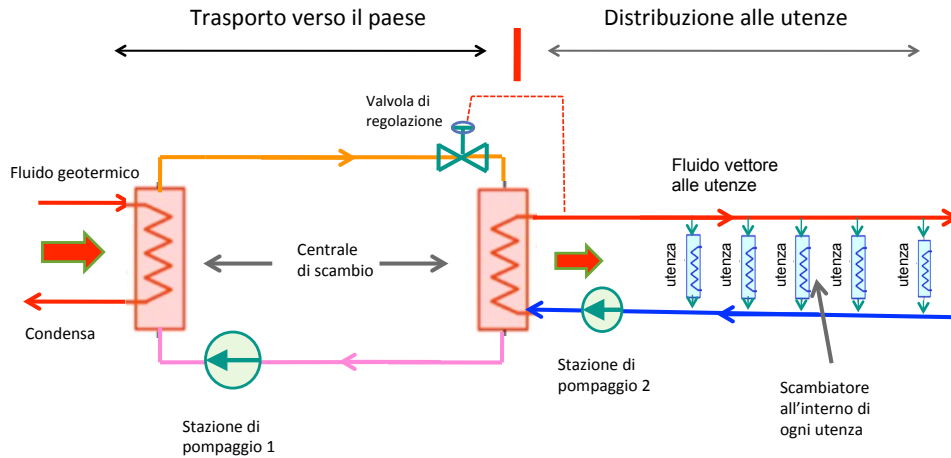


Figure 1: Schema impianto di teleriscaldamento

3 Sistema scambiatore utenza

3.1 Scambiatore

Gli scambiatori di calore sono delle apparecchiature nelle quali si ha trasmissione del calore da un fluido ad un altro. Le variabili in gioco sono elencate in seguito:

G_p = portata del circuito primario

G_u = portata del circuito secondario (parte utenza)

c_s = calore specifico dell'acqua

T_i = Temperatura di ingresso scambiatore dalla parte del circuito primario (acqua calda)

T_o = Temperatura in uscita dallo scambiatore dalla parte del circuito primario (acqua fredda)

t_i = Temperatura di ingresso scambiatore dalla parte del circuito secondario (acqua fredda)

t_o = Temperatura in uscita dallo scambiatore dalla parte del circuito secondario (acqua calda)

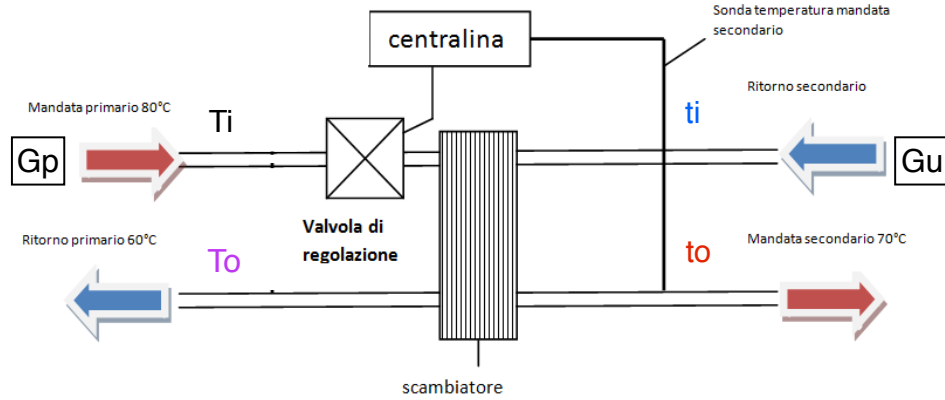


Figure 2: Schema di uno scambiatore all'interno di un'utenza

Applicando le equazioni di bilancio di massa e di energia al fluido caldo ed al fluido freddo si ottengono le seguenti formule per il calcolo della potenza termica globale, W_t . Nello studio degli scambiatori di calore è utile riferirsi alla cosiddetta portata termica (oraria), C , data dal prodotto tra la portata massica ed il calore specifico:

$$C_p = G_p c_s \quad ; \quad C_u = G_u c_s \quad (1)$$

In tal caso le due equazioni di bilancio possono scriversi nella seguente forma:

$$W_t = C_p(T_i - T_o) \quad ; \quad W_t = C_u(t_o - t_i) \quad (2)$$

A queste due equazioni di bilancio energetico, si può associare una equazione di scambio termico; quest'ultima associa la potenza termica scambiata tra i due fluidi alle temperature di ingresso e/o di uscita, alle portate, al coefficiente

di scambio termico globale ed all'area di scambio. Questa equazione deriva dal metodo della media logaritmica delle differenze di temperatura (o MLDT) dove la potenza termica scambiata tra i due fluidi viene legata alla differenza di temperatura tra il fluido caldo ed il fluido freddo dalla seguente relazione:

$$W_t = \alpha S \Delta T_{ml} \quad (3)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(\Delta T_1) - (\Delta T_2)}{\log\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Se scambiatore in corrente : $\Delta T_1 = T_i - t_i$; $\Delta T_2 = T_o - t_o$

Se scambiatore in controcorrente : $\Delta T_1 = T_i - t_o$; $\Delta T_2 = T_o - t_i$

dove S è la superficie attraverso cui avviene lo scambio ed α è il cosiddetto coefficiente di scambio termico globale o conduttanza termica unitaria.

In figura 3 è possibile vedere l'andamento delle temperature negli scambiatori in corrente (a) e in controcorrente (b).

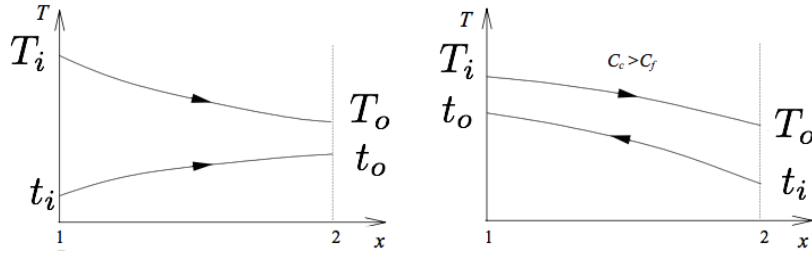


Figure 3: Andamento delle temperature negli scambiatori

3.2 Utenza

Esiste ovviamente una formula matematica che consente un calcolo approssimativo del fabbisogno termico. Bisogna però tenere presente che è un risultato indicativo e, appunto, approssimativo, poiché ci sono moltissime variabili che possono incidere sul reale fabbisogno dell'abitazione, alcune delle quali difficilmente quantificabili.

Il calcolo matematico fornisce il totale delle Kilocalorie necessarie a scaldare l'abitazione utilizzando come dati di partenza

- il totale dei metri cubi da scaldare,
- un coefficiente termico che indica le calorie necessarie per metro cubo e che può oscillare tra un valore che va da 30 a 40 $\frac{Kcal}{m^3}$, a seconda delle condizioni termiche dell'abitazione.

Nei futuri calcoli considereremo un appartamento di 100 m^2 con soffitti non più alti di 3 m e coefficiente termico di $30\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}$. Il fabbisogno termico di risulterà di circa 9000 Kcal (10440 W).

Questo valore ci da un indice di quanta energia i radiatori dovranno fornire alla casa per scaldarla.

3.2.1 Radiatori

I radiatori (figura 4) sono gli elementi all'interno dell'utenza che trasferiscono calore all'ambiente per scaldarlo. La potenza emessa da un corpo scaldante

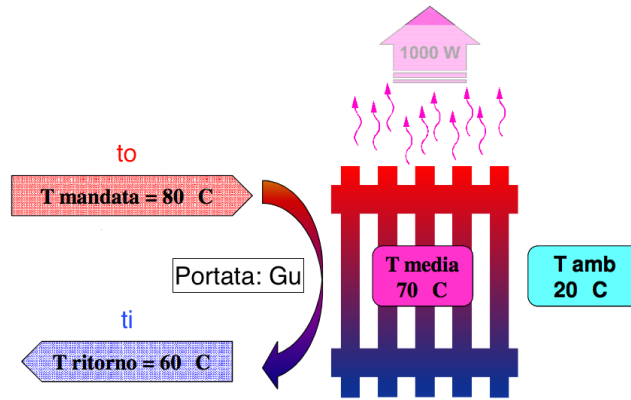


Figure 4: Schematizzazione di un radiatore

dipende dalla sua temperatura media tra il fluido caldo in ingresso al radiatore e quello freddo in uscita dalla seguente relazione:

$$P_{radiatore} = Km \left(\frac{t_o + t_i}{2} - \Theta_{amb} \right)^n \quad (4)$$

con Km e n coefficienti che dipendono dal tipo di radiatore in uso costanti.

Un'altra considerazione da fare riguarda il comportamento dei radiatori in termini di potenza emessa al variare della portata. In figura 5 si nota gli andamenti delle potenze in funzione delle temperature di mandata e ritorno dal radiatore con portate diverse. Diminuendo la portata le curve di temperatura t_o e t_i si aprono come un ventaglio man mano che la portata diminuisce e viceversa.

E' possibile ottenere le stesse potenze termiche con due portate diverse facendo variare la differenza di temperatura tra fluido caldo e freddo, e di conseguenza alzando o abbassando le temperature di mandata e ritorno dei radiatori. Diminuendo la portata il radiatore scambia di più e ciò comporta una riduzione dell'acqua di ritorno dal radiatore. Se però la temperatura in mandata rimane

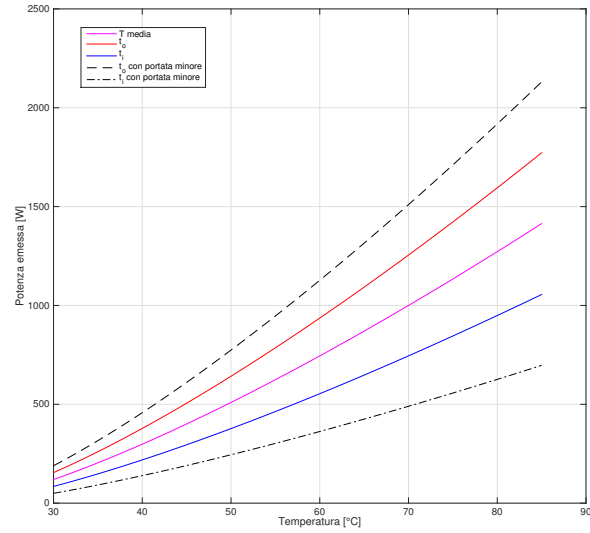


Figure 5: Grafico andamento della potenza scambiata in funzione delle temperature e portate diverse

la stessa avremo una potenza scambiata dal radiatore minore in quanto si è abbassata la temperatura media del fluido all'interno del radiatore (figura 6). Se vogliamo ottenere una potenza maggiore dovremmo aumentare la temperatura in mandata in modo da far aumentare la temperatura media (figura 7))

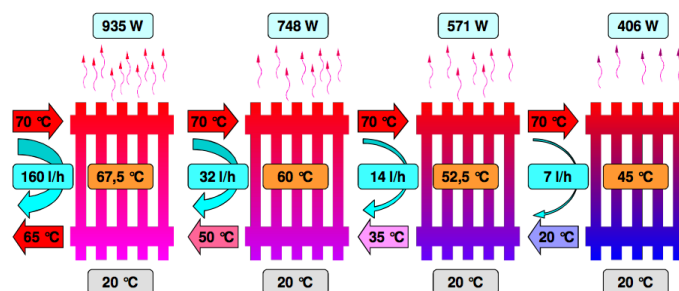


Figure 6: Schema di funzionamento radiatore con temperatura di mandata costante e portate variabili

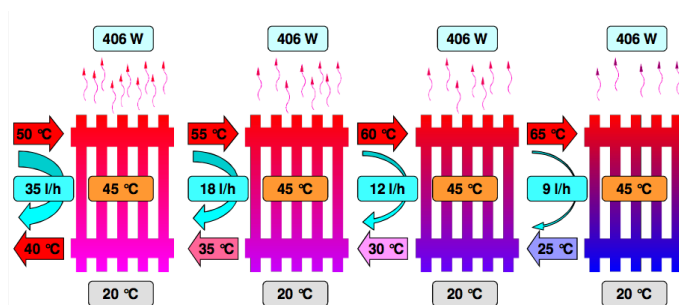


Figure 7: Schema di funzionamento radiatore con temperatura di mandata variabile al fine di ottenere potenze di scambio uguali anche se le portate sono diverse

3.3 Simulazione

Andremo in seguito a simulare il sistema scambiatore utenza per capire il comportamento delle temperature e portate al variare di alcuni parametri (figura 8).

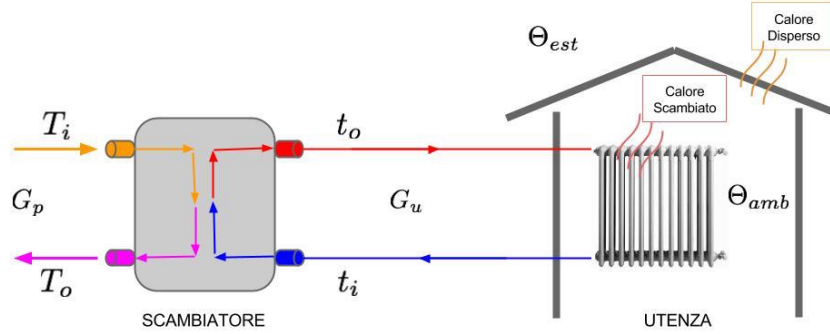


Figure 8: rappresentazione schematica sistema scambiatore e utenza

Andremo quindi a costruirci un sistema dinamico dove la nostra variabile di stato è la temperatura ambiente che da ora in avanti verrà indicata con Θ_{amb} . Il nostro sistema sarà descritto dalla seguente relazione:

$$MC\Theta'_{amb} = W_{scambiata} - W_{dispersa}$$

$$K_m\left(\frac{t_o + t_i}{2} - \Theta_{amb}\right)^n - K(\Theta_{amb} - \Theta_{est}) = MC\Theta'_{amb} \quad (5)$$

K_m = costante K_m

n = esponente

K = coefficiente di dispersione termica

Θ_{amb} = Temperatura ambiente (variabile di stato)

Θ_{est} = Temperatura esterna

M = Massa dell'utenza

C = capacità termica

Le variabili note sono: G_u, T_i, t_o

Le variabili incognite sono: G_p, T_o, t_i

Le incognite si possono ricavare da un sistema tre equazioni tre incognite. Facendo l'assunzione che la potenza termica scambiata dallo scambiatore è

uguale alla potenza scambiata dai radiatori otteniamo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} K_m \left(\frac{t_o + t_i}{2} - \Theta_{amb} \right)^n = C_u (t_o - t_i) \\ C_p (T_i - T_o) = C_u (t_o - t_i) \\ C_u (t_o - t_i) = \alpha S \frac{(T_i - t_o) - (T_o - t_i)}{\log \left(\frac{T_i - t_o}{T_o - t_i} \right)} \end{cases} \quad (6)$$

Il lavoro successivo sarà quello di inserire un riferimento per la temperatura ambiente e regolare il sistema in modo da mantenere la temperatura desiderata all'interno dell'utenza. I modi per regolare il calore fornito all'utenza sono:

- agire sulla valvola di laminazione regolando la portata sul circuito primario e quindi la temperatura in mandata dell'acqua.
- con la premessa di avere pompe a regime variabile, regolare la portata sul secondario (utenza).

L'obiettivo principale come detto in precedenza sarà quello di trovare un metodo che permetta di avere la temperatura di ritorno alla centrale di scambio più bassa possibile in modo da aumentare il rendimento dell'impianto e diminuire gli sprechi.

Per aumentare l'efficienza e per ridurre al massimo gli sprechi si è pensato di introdurre un'ulteriore regolazione. Solitamente l'utenza regola con termostato e il comportamento dell'utenza nei riguardi della regolazione di quest'ultimo dipende molto dalla modalità di fatturazione; infatti con fatturazione a forfait la regolazione del termostato sarà sempre più vicina ai 30 che ai 20 gradi. Questo comporta che il carico termico del sistema di teleriscaldamento è sempre vicino al massimo invernale. Un metodo pensato per cautelarsi rispetto a condizioni di cattiva gestione della regolazione della temperatura all'interno delle abitazioni è quella di regolare la temperatura massima in mandata nell'utenza in funzione della temperatura esterna (figura 9).

Il fabbisogno energetico aumenta al diminuire della temperatura esterna e viceversa. Si vuole procedere in questo modo perché più le temperature di ritorno sono basse più il rendimento è elevato ed utilizzando una regolazione di questo tipo nello scambiatore di utenza, si potrebbero avere temperature di ritorno tanto più basse tanto è minore il carico termico richiesto.

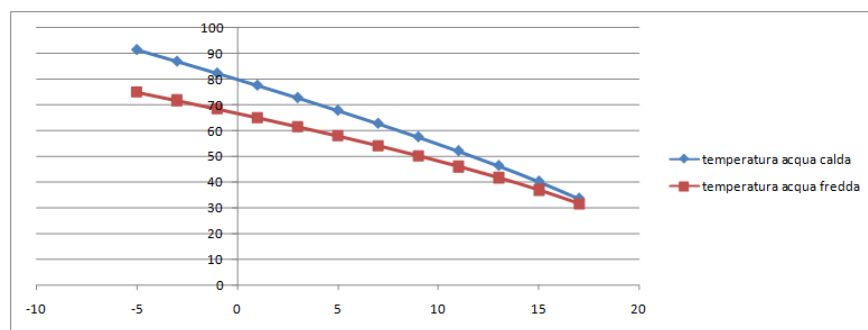


Figure 9: rappresentazione schematica sistema scambiatore e utenza

4 ToDo

Tramite l'uso di matlab andremo a simulare tre diversi scenari:

1. sistema scambiatore utenza senza alcun tipo di regolazione
2. sistema scambiatore utenza con regolazione fissa , dipendente dalla temperatura esterna (climatica): si imposta una temperatura in mandata t_o sul secondario in funzione della temperatura esterna (regolare la temperatura in mandata implica regolare la portata sul primario)
3. sistema scambiatore utenza con regolazione variabile in funzione della temperatura ambiente desiderata: si tratta di implementare un controllore MPC che ottimizza la temperatura di ritorno dell'acqua dati una funzione di costo e dei vincoli.

5 Risultati della simulazione

5.1 Potenze scambiate e temperature al variare delle portate

I primi risultati ottenuti durante la simulazione riguardano l'andamento delle temperature e della potenza termica scambiata al variare delle portate.

Porata sul primario G_p variabile e portata sul secondario G_u costante: Maggiore è la portata sul primario maggiore è la potenza scambiata dallo scambiatore ed inoltre la temperatura di ritorno T_o subisce un innalzamento e viceversa.

Porata sul primario G_p costante e portata sul secondario G_u variabile: Maggiore è la portata sul secondario minore risulta a differenza di temperatura tra t_o e t_i e viceversa. Il risultato più significativo ci mostra che variando la portata sul secondario, variano le temperature t_o e t_i ma variano in modo tale che la loro temperatura media ($\frac{t_o+t_i}{2}$) rimane costante come anche la temperatura di ritorno del primario T_o , visibile in figura 10.

In conclusione possiamo affermare che la potenza scambiata e la temperatura di ritorno T_o dipende solamente dalla portata in mandata sul primario.

La regolazione che dovremo implementare dovrà essere fatta sulla portata del primario in modo da limitare il ritorno di temperatura al minimo possibile ma tale da garantire la temperatura ambiente che è stata settata nel termostato.

6 Ulteriori considerazioni

La portata delle pompe del circuito che porta l'acqua alle utenze non deve mettere in crisi le ultime abitazioni (la portata nelle prime utenze sarà maggiore che nelle ultime). Se delle centraline di utenza regolassero le portate in ingresso

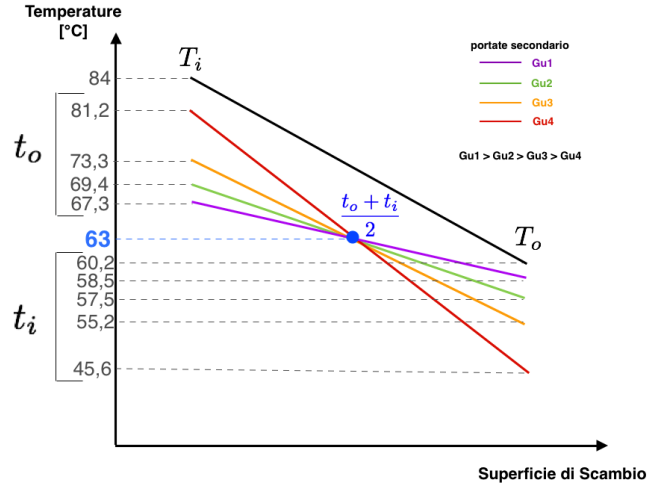


Figure 10: rappresentazione schematica della variazione delle temperature al variare della portata sul secondario

agli scambiatori (utilizzando solamente quella strettamente necessaria) si ridurrebbe il problema. Si potrebbe controllare la portata dell'intero circuito con un sensore posizionato nell'ultima utenza dell'impianto per gestire la portata delle pompe.

Per regolare la portata sul circuito primario (dalla fonte geotermica alla centrale di scambio) si vorrebbe implementare un controllo. Nella centrale di scambio vi sono delle valvole che regolano la portata in modo da avere nel circuito nelle utenze una certa temperatura in mandata fissata. Ridurre la portata con una valvola di laminazione (se si vede la valvola come una resistenza variabile) vuol dire che si aumenta la resistenza del circuito con conseguente dispersione di energia (figure 11). Quindi la migliore regolazione delle pompe sarebbe con il segnale che regola la valvola in ingresso allo scambiatore. (problema da valutare è inviare il segnale a qualche km di distanza).

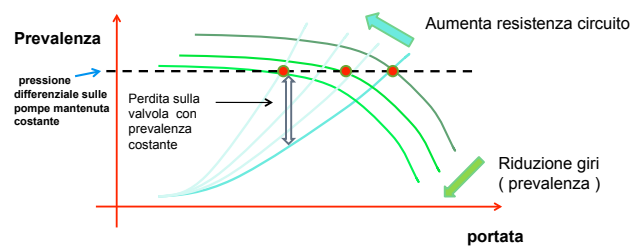


Figure 11: perdita sulla valvola di laminazione con regolazione a pressione costante