

DISCLAIMER

Il progetto SMART (Strategies to promote small scale hydro electricity production in Europe – Strategie per promuovere la produzione di energia elettrica da piccolo idroelettrico in Europa) è sostenuto dal Programma “Intelligent Energy – Europe” (Contratto N.: EIE-07-064).

L’esclusiva responsabilità del contenuto del presente manuale spetta agli autori. Esso non rappresenta l’opinione della Comunità. La Commissione Europea non è responsabile dell’eventuale utilizzo che potrebbe essere fatto delle informazioni ivi contenute.

INDICE

<u>2.1 Localizzazione dei siti selezionati per la valutazione della riconversione idroelettrica.....</u>	<u>5</u>
<u> 2.1.1 SITO 1 – Mulino sul Fontanile Capri – Pieranica (CR).....</u>	<u>5</u>
<u> 2.1.2 SITO 2 – Mulino Razzica sulla Roggia Marinona – Romanengo (CR).....</u>	<u>6</u>
<u> 2.1.3 Obiettivo dello studio.....</u>	<u>7</u>
<u>2.2 Analisi critica delle tecnologie elettriche applicabili alla riconversione idroelettrica dei siti selezionati.....</u>	<u>7</u>
<u> 2.2.1 Tecniche di generazione in rete.....</u>	<u>7</u>
<u>Generazione diretta.....</u>	<u>8</u>
<u>Generazione indiretta.....</u>	<u>9</u>
<u> 2.2.2 Macchine elettriche utilizzabili per la generazione e componenti della catena di conversione.....</u>	<u>10</u>
<u>Macchina sincrona.....</u>	<u>10</u>
<u>Macchina asincrona.....</u>	<u>11</u>
<u>Macchina a corrente continua a collettore (dinamo).....</u>	<u>11</u>
<u>Conversione AC/DC.....</u>	<u>12</u>
<u>Inverter.....</u>	<u>13</u>
<u>3. Caratterizzazione delle portate per i siti selezionati.....</u>	<u>14</u>
<u> 3.1 Premessa.....</u>	<u>14</u>
<u> 3.2 SITO 1 – Fontanile Capri – Pieranica (CR).....</u>	<u>15</u>
<u>Determinazione del range di variabilità delle portate del Capri.....</u>	<u>17</u>
<u>Stima della curva di durata delle portate del Capri.....</u>	<u>24</u>
<u> 3.3 SITO 2 – Roggia Marinona – Romanengo (CR).....</u>	<u>25</u>
<u>Determinazione del range di variabilità delle portate della Marinona.....</u>	<u>26</u>
<u>Stima della curva di durata delle portate della Marinona.....</u>	<u>31</u>
<u>4. Stima delle coppie agenti sulle ruote idrauliche e delle relative velocità di rotazione.....</u>	<u>31</u>
<u>5. Studio preliminare del collegamento elettrico.....</u>	<u>36</u>
<u> 5.1 Schemi possibili di generazione diretta.....</u>	<u>37</u>
<u>Conversione diretta, generatore sincrono.....</u>	<u>37</u>
<u>Conversione diretta, generatore asincrono.....</u>	<u>38</u>
<u> 5.2 Schemi possibili di generazione indiretta.....</u>	<u>39</u>
<u>Conversione indiretta, dinamo.....</u>	<u>39</u>
<u>Conversione indiretta, generatore sincrono.....</u>	<u>40</u>
<u>Conversione indiretta, generatore asincrono.....</u>	<u>41</u>
<u>6. Configurazione degli impianti elettrici.....</u>	<u>43</u>
<u> 6.1 Premessa.....</u>	<u>43</u>
<u> 6.2 Analisi degli impianti.....</u>	<u>44</u>
<u>Sistema di generazione elettrica adottato.....</u>	<u>44</u>
<u>Rendimenti complessivi degli impianti idroelettrici.....</u>	<u>45</u>
<u> 6.3 Valutazioni economiche.....</u>	<u>45</u>
<u>Valutazione dei costi dell'impianto elettro-meccanico.....</u>	<u>45</u>
<u>Stima della producibilità elettrica.....</u>	<u>46</u>
<u> 6.4 Osservazioni conclusive.....</u>	<u>47</u>
<u>7 Bibliografia e Riferimenti su Web.....</u>	<u>49</u>

1. INTRODUZIONE

La presente relazione costituisce l'elaborato richiesto dal bando emesso dalla Provincia di Cremona - Settore Agricoltura e Ambiente nell'ambito del progetto europeo SMART - Strategies to promote small scale hydro electricity production in Europe. Il bando richiedeva la redazione di uno studio approfondito consistente nell'analisi di nuovi tipi di connessione elettrica alla rete di distribuzione locale, con particolare riguardo all'uso dell'elettronica di potenza, e riferito ad almeno due dei ventuno potenziali siti micro idroelettrici presenti sul territorio provinciale cremonese censiti all'interno del progetto SMART. I siti che sono stati selezionati per l'analisi sono:

- mulino sul fontanile Capri, sito nel comune di Pieranica (CR);
- Mulino Razzica sulla roggia Marinona, sito nel comune di Romanengo (CR).

Secondo le richieste del bando, la relazione contiene:

- A) un'analisi critica delle tecnologie "classiche" per la connessione e l'accoppiamento elettrico delle centrali micro idroelettriche alla rete di distribuzione, con descrizione dei punti di forza e debolezza e dei costi di mercato standard;
- B) la scelta dei potenziali siti micro idroelettrici e la redazione in merito ad essi di uno studio preliminare per la loro riconversione idroelettrica e la loro connessione alla rete di distribuzione elettrica tramite nuovi tipi di connessione e accoppiamento, con particolare riguardo a quelli basati sull'elettronica di potenza;
- C) la descrizione dei punti di forza e debolezza delle tecnologie descritte al punto precedente e dei costi di mercato standard dei diversi componenti utilizzati.

Tuttavia, per non alterare lo sviluppo logico dello studio effettuato si è preferito, senza venir meno alle richieste del bando sopra riportate, riorganizzare la relazione nelle tre parti seguenti:

- I) scelta e localizzazione dei siti (come richiesto al precedente punto B) e analisi critica delle tecnologie elettriche applicabili alla riconversione idroelettrica dei siti selezionati, sia di quelle "classiche" (come richiesto al precedente punto A), sia di quelle basate sull'elettronica di potenza (come richiesto al precedente punto C);
- II) caratterizzazione idraulica dei siti e determinazione delle curve di durata delle portate - necessarie per valutare la potenza che si rende disponibile a monte del sistema di conversione elettrico - e studio preliminare delle componenti elettriche ed elettroniche utilizzabili (come richiesto al precedente punto B).

III) determinazione della configurazione degli impianti, considerazioni tecniche ed economiche conclusive (come richiesto al precedente punto C) e stima della producibilità elettrica ottenibile dalla riconversione idroelettrica dei due siti selezionati.

PARTE PRIMA

SCelta DEI SITI

E

ANALISI CRITICA DELLE TECNOLOGIE ELETTRICHE IMPIEGABILI

2.1 Localizzazione dei siti selezionati per la valutazione della riconversione idroelettrica

Per l'analisi critica delle tecnologie più adatte alla riconversione idroelettrica dei piccoli salti sono stati selezionati due siti tra quelli censiti all'interno del progetto S.M.A.R.T..

Le principali caratteristiche geometriche dei siti in esame e, nello specifico, dei salti disponibili, sono state desunte dal *Censimento dei salti utili per lo sfruttamento idroelettrico nella zona-studio del progetto S.M.A.R.T* [1].

2.1.1 SITO 1 – Mulino sul Fontanile Capri – Pieranica (CR)

Il primo dei due siti selezionati è un vecchio mulino per la macinazione del grano, non più operante, sito in Pieranica, Via Molino angolo strada consorziale delle Gerre. Il mulino, consistente in realtà in due distinte macine site nello stesso fabbricato, ciascuna mossa dalla propria ruota idraulica come mostrato in Figura I.1, sfrutta le acque del fontanile/roggia Capri.

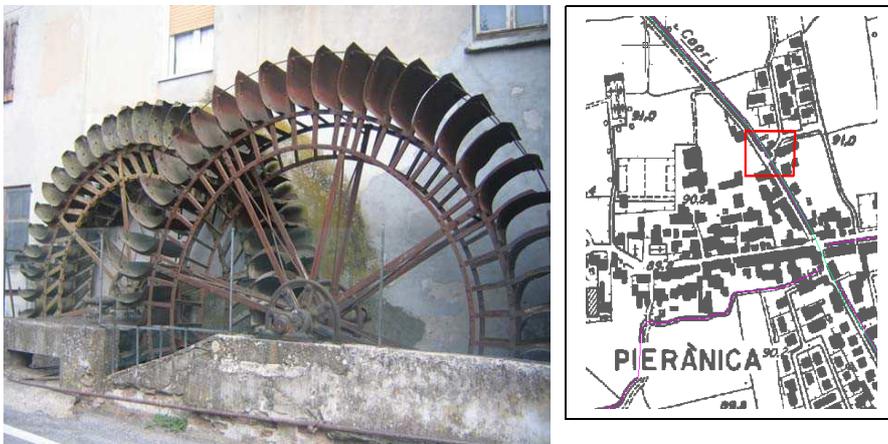


Figura I.1 Mulino di Pieranica, via Molino

La differenza delle quote ortometriche [1] individua un salto utile ΔH di 0.83 m. Il valore preliminare di riferimento per la portata nel Fontanile Capri, come valutato in uno studio effettuato

dal Politecnico di Milano [10], è pari a $0.91 \text{ m}^3/\text{s}$. La potenza disponibile al salto può quindi essere valutata preliminarmente in 7.4 kW : ipotizzando un rendimento idraulico non superiore al 60%, si può ragionevolmente ritenere, come dato di partenza dell'intero progetto, che l'impianto mini-idroelettrico realizzabile in corrispondenza del Mulino Pieranica eroghi una potenza non superiore ai 4 kW .

Dati gli elevati costi di investimento necessari per la sostituzione della ruota idraulica presente con una macchina idraulica più efficiente (quali una ruota idraulica nuova specificamente progettata per la produzione idroelettrica o una turbina a coclea), l'unica soluzione che, in fase preliminare di impostazione del progetto, appare economicamente praticabile è quella della riconversione idroelettrica delle ruote idrauliche esistenti.

Dato inoltre che, delle due ruote affiancate che costituiscono il mulino, solo la più esterna risulta oggi mantenuta in condizioni di buon funzionamento, si è deciso di considerare per la riconversione idroelettrica esclusivamente la ruota più esterna.

2.1.2 SITO 2 – Mulino Razzica sulla Roggia Marinona – Romanengo (CR)

Il secondo sito selezionato è il mulino Razzica, sito in via XXV Aprile a Romanengo (Figura I.2). Il mulino è ancora oggi funzionante, è utilizzato per la macinazione del grano ed è dotato di un'unica ruota azionata dalle acque della roggia Marinona.

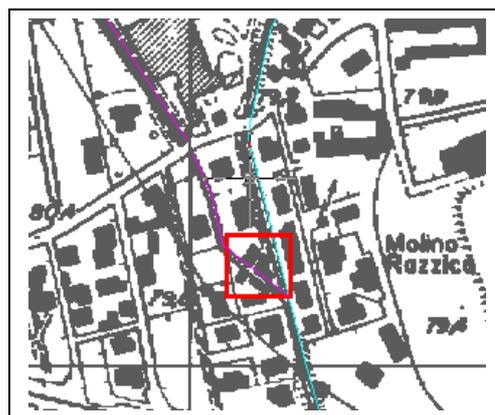


Figura I.2 Mulino Razzica a Romanengo, via XXV Aprile

Il salto utile ΔH [1] è di 2.05 m . Il valore preliminare di riferimento per la portata nella Roggia Marinona, come valutato in uno studio effettuato dal Politecnico di Milano [10], è pari a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ anche se, da una valutazione preliminare del calibro della roggia, appare verosimile ipotizzare che la portata massima defluente possa raggiungere $1 \text{ m}^3/\text{s}$. La potenza disponibile al salto può quindi

essere valutata preliminarmente in 10-20 kW: ipotizzando un rendimento idraulico non superiore al 60%, si può ragionevolmente ritenere, come dato di partenza dell'intero progetto, che l'impianto mini-idroelettrico realizzabile in corrispondenza del Mulino Razzica possa erogare una potenza compresa tra 6 e 12 kW.

In questo caso, quindi, i costi necessari per l'installazione di una macchina idraulica efficiente e adatta a piccoli salti idraulici potrebbero essere sostenibili. Tuttavia, il fatto che il mulino continui ad essere utilizzato per la macinazione vincola il progetto al mantenimento in operatività del manufatto esistente e, quindi, alla riconversione idroelettrica della ruota idraulica esistente.

2.1.3 Obiettivo dello studio

Dati i limiti imposti dai due siti prescelti e discussi nei paragrafi 1.1 e 1.2, il presente studio ha come obiettivo la caratterizzazione idraulica dei siti e, a partire dai risultati forniti da tale caratterizzazione, la valutazione del tipo e dei costi delle componenti elettriche ed elettroniche più adatte a convertire, con il maggior rendimento possibile, la potenza idraulica estratta dalle ruote idrauliche esistenti in potenza elettrica.

2.2 Analisi critica delle tecnologie elettriche applicabili alla riconversione idroelettrica dei siti selezionati

2.2.1 Tecniche di generazione in rete

E' presente una vasta letteratura riguardante l'immissione in rete di potenza elettrica derivante da turbine idrauliche. Recentemente sono stati immessi nel mercato sistemi di potenza progressivamente minore fino ad arrivare a pochi kW. In generale queste sorgenti sono costituite da una turbina a geometria variabile cui è collegata una macchina sincrona che genera direttamente in rete ed una serie di sistemi di supporto che vanno dai sistemi di controllo per la regolazione del sincronismo con la rete prima dell'inserimento alla regolazione rapida tramite l'inserimento di resistenze in parallelo piuttosto che a sistemi di protezione della macchina soprattutto in caso di sgancio rete. I casi in oggetto si differenziano in modo significativo da questo panorama in quanto è necessario conservare la girante presente che, essendo una ruota idraulica realizzata per movimentare la macina del mulino, presenta importanti differenze rispetto alle turbine realizzate specificatamente allo scopo. In particolare non è presente alcun dispositivo per la regolazione della velocità della girante al variare della portata.

In generale sono disponibili per la generazione in rete le seguenti tecniche:

- 1) generazione diretta in rete

2) generazione indiretta tramite la mediazione di un convertitore di frequenza.

La tecnica di generazione diretta in rete necessita del controllo della velocità di rotazione del generatore che deve poter iniettare corrente in sincronia con la tensione di rete. La tecnica della generazione indiretta consente una completa mancanza di correlazione tra la velocità di rotazione del generatore e la frequenza di rete mentre alla conversione di frequenza provvede un inverter, assistito o meno nell'opera da ulteriori sistemi accessori. In entrambi i casi è necessario prevedere i sistemi di sicurezza relativi all'evento di sgancio di rete e delle altre anomalie che possono investire il sistema provenienti dalla rete elettrica stessa come ad esempio i picchi di sovratensione.

Generazione diretta

Potenzialmente la generazione diretta in rete fornisce il maggior rendimento possibile in quanto non si pone nessun elemento tra la sorgente di potenza e la rete in grado di assorbirla. Affinché questo avvenga con successo sono necessarie alcune condizioni, la più importante è il sostanziale sincronismo tra la rete elettrica ed il campo formato dal generatore.

In caso si utilizzi un generatore sincrono, la sincronia tra generatore e rete deve essere assoluta e qualsiasi deviazione provoca una corrente reattiva con caratteristiche di rigidità tali da azzerare il rendimento della macchina anche con deviazioni molto piccole.

In caso si utilizzi un generatore asincrono, lo scorrimento tra il campo dello statore e del rotore è invece necessario per la generazione di potenza elettrica. Ai fini del rendimento però lo scorrimento deve essere piccolo, dell'ordine di 0.1. Scorrimenti molto maggiori sono possibili e con l'inserimento di resistenze rotoriche è anche possibile regolare la coppia resistente, ma il rendimento da generatore della macchina asincrona decresce velocemente al crescere dello scorrimento.

In figura I.3 è riportato lo schema a blocchi degli elementi di base di un sistema a generazione diretta.

SCHEMA CONVERSIONE DIRETTA

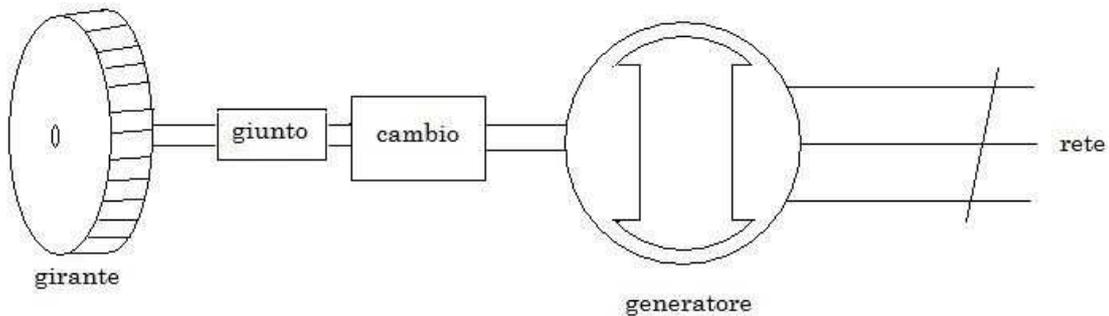


Figura I.3 Schema a blocchi degli elementi di base di un sistema a generazione diretta.

Generazione indiretta

Con l'inserimento di un inverter tra il generatore e la rete si scorrela completamente la velocità di rotazione del generatore dalla frequenza di rete. L'inverter provvede alla conversione di frequenza con una efficienza tipica del 95%.

Per operare necessita in generale di un DC link che impone una conversione AC/DC tramite raddrizzatore quando si opera con macchine ac.

Una opportuna scelta del generatore può consentire di evitare un'ulteriore conversione DC/DC per rendere compatibile la tensione messa a disposizione dal raddrizzatore con la tensione necessaria alla conversione in rete.

L'inserimento di questi sistemi a commutazione forzata a frequenza relativamente alta dell'ordine di 1.10 kHz porta alcune conseguenze:

- 1) la corrente iniettata dal convertitore verso il filtro di rete presenta un contenuto armonico importante che si riflette sul raddrizzatore che a sua volta lo riflette sul generatore che in prima approssimazione a sua volta lo traduce in un contenuto armonico di coppia analogo a quello di corrente;
- 2) a meno che non sia presente un opportuno stadio di disaccoppiamento, qualora si sia in presenza di una conversione su rete monofase una armonica elevata a 100Hz collegata alla natura pulsante della potenza richiesta dalla rete monofase viene trasferita al raddrizzatore e da questa al generatore e quindi alla potenza richiesta dalla girante. Questa armonica ha intensità prossima al 50% della fondamentale e per intensità e frequenza è molto pericolosa per la meccanica del generatore;

3) l'induttanza presentata dal generatore è piuttosto elevata rispetto all'impedenza presentata dal raddrizzatore, quindi la corrente assorbita dal raddrizzatore tende ad essere molto deformata con conseguente iniezione di armoniche sul generatore e a sua volta sulla girante.

Tutti questi aspetti si possono affrontare con l'inserimento di sistemi accessori che servono a limitare od eliminarne gli effetti in generale al prezzo di una diminuzione di efficienza.

In figura I.4 è riportato lo schema a blocchi del sistema di generazione a conversione indiretta e dei suoi elementi fondamentali

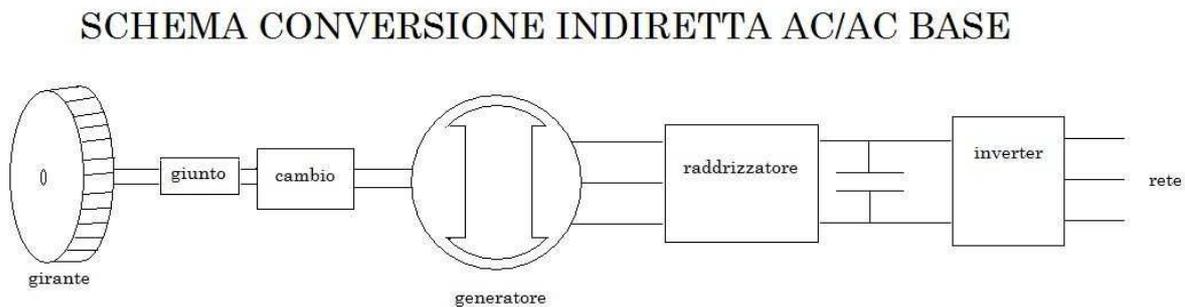


Figura I.4 Schema a blocchi degli elementi di base di un sistema a generazione indiretta.

2.2.2 Macchine elettriche utilizzabili per la generazione e componenti della catena di conversione

Di seguito si riporta una breve descrizione delle macchine elettriche impiegate nella generazione di potenza elettrica e dei sistemi elettronici collegati alla conversione di frequenza.

Macchina sincrona

La macchina sincrona è quella macchina rotante in corrente alternata per la quale il rapporto fra la velocità di rotazione del rotore e la frequenza della tensione generata è costante. Il generatore collegato alla rete a frequenza fissa ruota quindi alla velocità $\Omega = 60 f / \text{paia poli}$ (giri/min) o velocità di sincronismo.

La macchina sincrona è sicuramente il generatore di energia elettrica più diffuso ed è caratterizzato da diverse varianti costruttive in dipendenza anche delle potenze in gioco nella conversione elettromeccanica.

Il generatore sincrono, come tutte le macchine elettriche si compone di uno o più circuiti magnetici il cui flusso con due circuiti elettrici distinti, uno di induttore l'altro di indotto.

Per un generatore sincrono si considerano le seguenti caratteristiche:

- funzionamento a vuoto $V = f(I_e)$ per I di armatura costante;
- funzionamento a carico $V = f(I)$ per corrente di eccitazione I_e costante;

- di regolazione $I_e = f(I)$ per tensione di indotto costante.

Il rendimento di queste macchine, indicativamente, va dal 85% al 98% nell'intervallo di potenza 1kVA-10000kVA ed è vincolato strettamente al mantenimento del sincronismo con la frequenza e la fase di rete. Anche un lieve scostamento dalla velocità di sincronismo si traduce in una sostanziale riduzione del rendimento della macchina.

Macchina asincrona

La macchina asincrona è utilizzata usualmente come motore per eccellenza, ma può funzionare anche come generatore quando viene portata ad una velocità superiore a quella di sincronismo.

Dal punto di vista costruttivo si parla motori asincroni a rotore avvolto e di motori asincroni a gabbia di scoiattolo. Due sono le modalità interessanti di funzionamento del generatore asincrono. Una prima modalità riguarda la condizione di generatore asincrono collegato ad un carico isolato. In questo caso è necessario disporre di una sorgente di energia reattiva.

Una seconda modalità riguarda la condizione di generatore collegato ad una rete di potenza a frequenza costante. In questo caso la potenza reattiva necessaria per il funzionamento, viene prelevata dalla rete medesima ed il generatore si adeguerà alle condizioni imposte dalla rete e dal motore primo.

Il punto di funzionamento stabile del generatore si trova in una regione analoga a quella possibile nel funzionamento come motore.

Il rendimento va indicativamente dal 75% al 95% in dipendenza della tagli, fattore di potenza e scorrimento ottimale. All'aumentare dello scorrimento il rendimento della macchina asincrona diminuisce rapidamente.

Macchina a corrente continua a collettore (dinamo)

Il generatore a collettore in corrente continua (dinamo) è oggi ristretto a poche applicazioni particolari. Vi sono diversi tipo di dinamo a seconda a seconda delle caratteristiche del circuito di eccitazione. La corrente del circuito di eccitazione può provenire da una sorgente esterna alla dinamo oppure può essere fornita dalla dinamo stessa, cioè dal circuito di indotto e deve esserci quindi un collegamento elettrico fra il circuito di eccitazione ed il circuito di indotto.

Ai diversi tipi di dinamo corrispondono altrettante caratteristiche:

- funzionamento a vuoto $V = f(I_e)$ per I di armatura costante;
- funzionamento a carico $V = f(I)$ per corrente di eccitazione I_e costante;
- di regolazione $I_e = f(I)$ per tensione di indotto costante.

Il rendimento di queste macchine, indicativamente, va dal 75% al 90% nell'intervallo di potenza 1kW-100kW.

Conversione AC/DC

L'elemento maggiormente impiegato è il raddrizzatore a ponte di diodi monofase o trifase, il rendimento di questi convertitori è elevato, indicativamente superiore al 95%.

Considerata la natura del diodo, a causa della induttanza del generatore ed alla impedenza offerta dal raddrizzatore e dalla capacità all'interno del ponte, la corrente di fase viene deformata rispetto alla nominale corrente sinusoidale in fase con il generatore.

Questo fenomeno ha 2 conseguenze: introduce armoniche di corrente che tramite il generatore stesso vengono trasformate in armoniche di coppia e diminuisce il rendimento del generatore a causa della ripartizione di potenza tra la fondamentale e le armoniche.

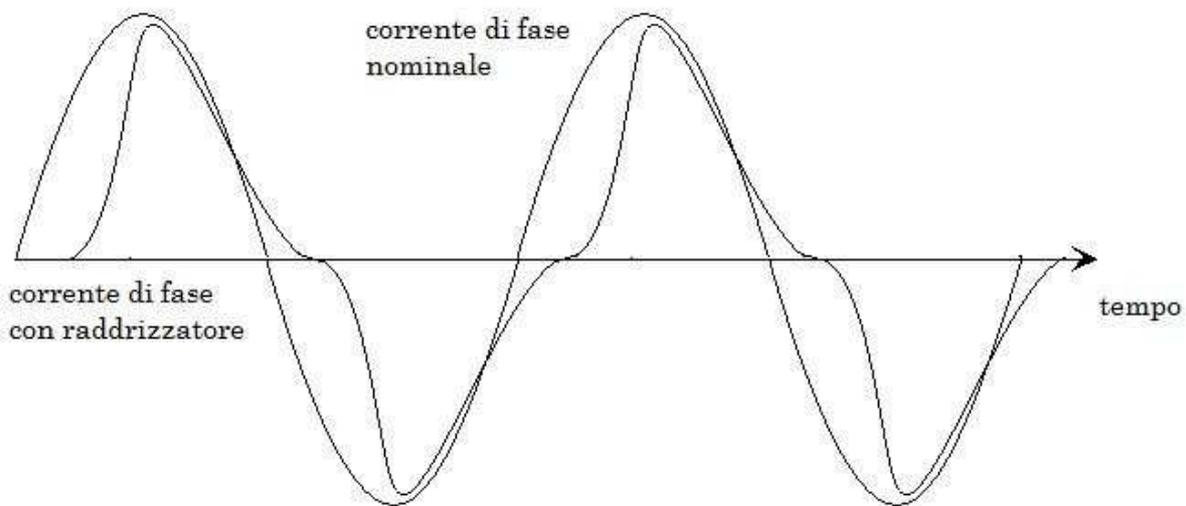


Figura I.5 Deformazione della corrente di fase a monte del raddrizzatore.

In figura I.5 si riporta una indicazione della deformazione della corrente di fase a monte del raddrizzatore.

L'introduzione di un sistema di correzione di fattore di potenza (PFC) o di una topologia di raddrizzatore più sofisticato tipo Minnesota fa scendere il rendimento del raddrizzatore ad un valore prossimo al 90%

Una stima dell'aumento del rendimento del generatore è impossibile senza la realizzazione di una simulazione ma in prima approssimazione è superiore alla metà delle maggiori perdite introdotte.

Inverter

A valle del raddrizzatore sarà installato un inverter per il collegamento alla rete di energia pubblica. Le potenze in gioco nei due casi sono differenti per cui nel caso di potenza minore l'inverter sarà monofase mentre nell'altro caso potrebbe essere trifase.

Nei confronti della rete elettrica, l'inverter deve interfacciarsi con la rete a frequenza e tensioni fissate rispettando la normativa e le specifiche richieste dal gestore di rete, analogamente agli inverter utilizzati nei settori fotovoltaico o eolico.

Nei confronti del generatore l'inverter monofase introduce una pulsazione di corrente a 100Hz che senza opportuno regolatore risale tutta la catena di conversione e tramite il generatore impone una coppia variabile a 100Hz con ampiezza pari alla fondamentale.

Questa coppia può essere smorzata per via meccanica con l'introduzione di un giunto viscoso che è caratterizzato da una efficienza $\ll 90\%$ oppure per via elettronica con l'introduzione tra il raddrizzatore e il DC link dell'inverter di un ulteriore stadio di regolazione di tensione che disaccoppi la corrente istantanea fornita all'inverter da quella fornita alla rete. Questo convertitore per la taglia da 2kW può avere una efficienza superiore al 90%.

Il generatore trifase con potenza di circa 12kW, con l'opportuna scelta della tensione di lavoro del generatore, non ha necessità di un ulteriore stadio di regolazione di tensione e può avere una efficienza superiore al 95%.

Le armoniche di corrente ad alta frequenza (1-10kHz e superiori) collegate alle commutazioni forzate trasportano una potenza relativamente piccola ($<10\%$) e le relative armoniche di coppia riflesse sulla meccanica tendono ad essere smorzate dalla catena di ingranaggi del cambio e dal giunto prima di giungere alla girante.

Tecnologicamente, considerate le potenze in gioco, nel caso dell'inverter monofase il ponte monofase sarà a mosfet mentre nel caso trifase, a causa della maggiore tensione necessaria per il DC bus (da 600 a 1000V per accettare tutta la variazione di velocità della girante) e della corrente più elevata si userà un ponte a IGBT.

CARATTERIZZAZIONE IDRAULICA DEI SITI
E
STUDIO PRELIMINARE DELLE COMPONENTI ELETTRICHE ED ELETTRONICHE

3. Caratterizzazione delle portate per i siti selezionati

3.1 Premessa

La valutazione delle alternative tecnologiche applicabili ai due siti d'interesse, precedentemente localizzati, non può prescindere dalla stima del regime delle portate che li caratterizza. E' infatti noto come tra i principali problemi legati alla riconversione idroelettrica dei piccoli salti si debba considerare la variabilità delle portate fluenti.

D'altronde la portata è tra i fattori che determinano la potenza della corrente idrica e, quindi, il suo valore è direttamente connesso al valore di potenza elettrica finale producibile dall'impianto. Ne consegue che anche una valutazione preliminare di fattibilità non può prescindere da una stima almeno dell'ordine di variabilità delle portate in gioco.

A tal proposito, sembra questa essere la sede più opportuna per evidenziare il buon grado di difficoltà riscontrato nel reperire, nelle sedi di competenza, i dati necessari ad una valutazione approfondita del regime idrologico per i due siti in esame. Tale difficoltà è spesso da attribuirsi alla quasi completa mancanza di dati, diretta conseguenza di un insufficiente monitoraggio della complessa rete dei canali irrigui secondari (e non solo) della pianura cremonese.

Conseguentemente, per la determinazione dell'escursione delle portate al presente progetto, si è dovuto far ricorso a opportune assunzioni e semplificazioni. Coerentemente, la stima della curva di durata delle portate per i due casi in esame deve essere considerata alla luce delle ineliminabili incertezze decisionali alla base del metodo.

D'altronde, un'accurata stima della variabilità annua delle portate, nelle condizioni di esigua disponibilità di dati riscontrata, non può che affidarsi ad un monitoraggio periodico dei siti selezionati, che dovrebbero essere controllati per una durata almeno annuale. Tale durata è risultata però incompatibile con le scadenze imposte dal progetto S.M.A.R.T.

La redazione di un progetto preliminare completo per la riconversione idraulica dei siti prescelti dovrà prevedere, in futuro, il tempo indispensabile alla raccolta di dati idrologici completi necessari ad una più approfondita valutazione idraulica.

3.2 SITO 1 – Fontanile Capri – Pieranica (CR)

Il fontanile/roggia Capri (da qui in poi semplicemente Capri) origina da una serie di fontanili siti a nord nord-ovest del mulino in questione ubicato nel comune di Pieranica.

Nella fattispecie, l'identificazione delle teste di fontanile da cui origina il fontanile Capri è stata effettuata a seguito di sopralluoghi e incrociando i dati forniti dal *Consorzio Irrigazioni Cremonesi* (nella persona del suo Presidente, Ing. Loffi) che hanno permesso di ottenere un aggiornamento dei tracciati indicati nella cartografia vettoriale della Regione Lombardia.

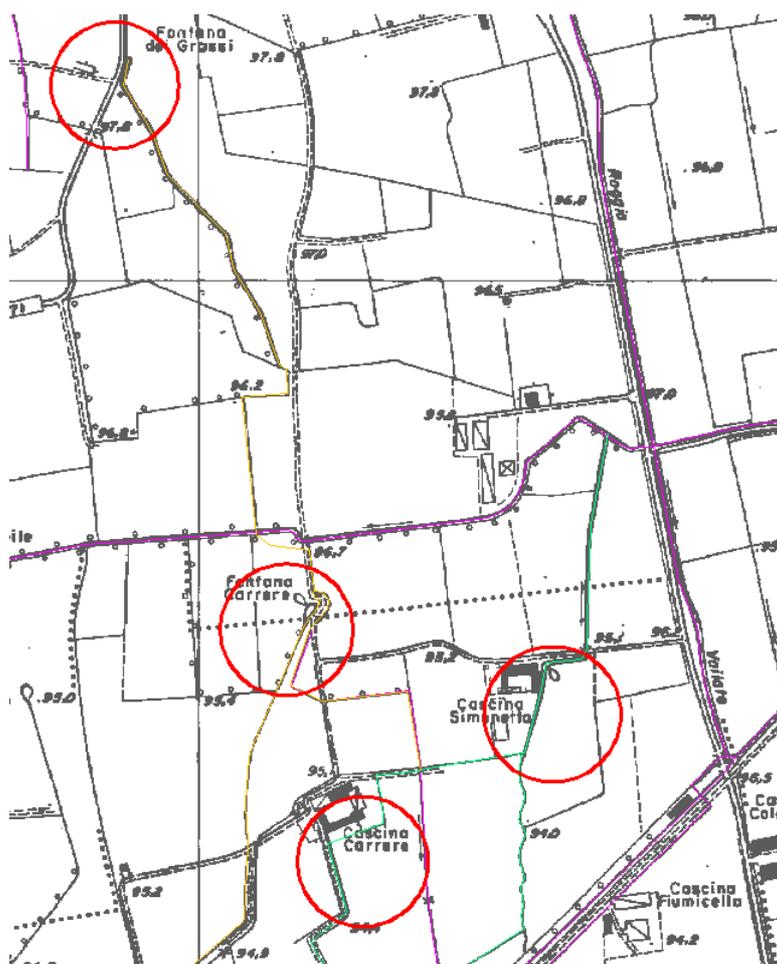


Figura II.3 Identificazione dei fontanili afferenti al Capri

In Figura II.3 sono riportati, cerchiati in rosso, i fontanili identificati come contribuenti al Capri, mentre con le colorazioni ocra e verde smeraldo i nuovi tracciati rilevati durante i sopralluoghi, che solo in parte si sovrappongono alla rete dei canali secondari della cartografia regionale, identificabile attraverso il colore rosa, ed in particolare al presunto tracciato del Capri ivi riportato.

I fontanili individuati sono stati recentemente censiti dalla Provincia di Cremona, ed alcuni dei dati che li caratterizzano sono reperibili nella pubblicazione *I fontanili della provincia di Cremona* [2].

Le rogge di derivazione dei fontanili si uniscono in un'unica roggia poco a sud della Cascina Carrere, dove il Capri abbandona il territorio comunale di Torlino Vimercati per dirigersi verso il comune di Pieranica fino ad arrivare al mulino.

Le acque del Capri a monte della sezione in cui è inserito il mulino sono sostanzialmente impiegate a scopo irriguo. La modalità di irrigazione prevalente sul territorio, come indicato in [3] e mostrato in Figura II.4, è rappresentata dallo scorrimento.

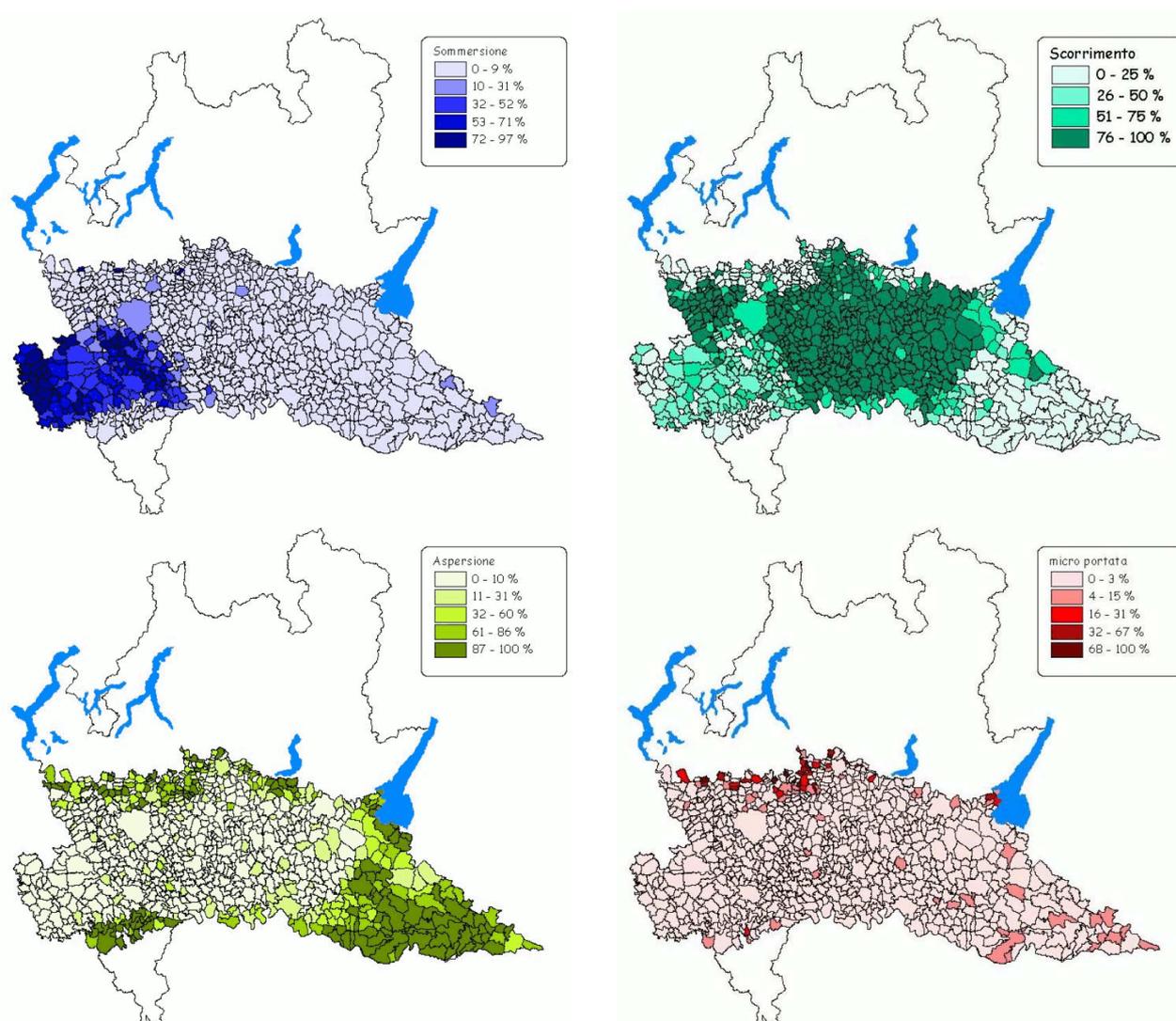


Figura II.4 Carta della distribuzione dei metodi irrigui in Lombardia (scorrimento)

Lungo l'asta del Capri sono presenti diverse paratoie che permettono la regolazione dei tiranti idrici nel fontanile, al fine di garantire la disponibilità della risorsa idrica agli utenti finali per l'irrigazione, secondo un sistema basato sulla turnazione. Naturalmente, l'uso irriguo determina la forte diminuzione (eventualmente l'annullamento) del flusso idrico a valle delle bocche laterali.

E' evidente che l'uso irriguo è concorrenziale con l'utilizzo idroelettrico della risorsa. Nelle fasi più avanzate della progettazione sarà quindi indispensabile pensare ad una gestione della risorsa idrica

in grado di soddisfare le esigenze di tutti gli utenti finali, valutando non solo le risorse potenzialmente disponibili ma soprattutto quelle effettivamente impiegabili per la produzione di energia elettrica in corrispondenza del calendario irriguo.

Determinazione del range di variabilità delle portate del Capri

La stima dei limiti annuali di escursione della portata del Capri è stata ricondotta al calcolo di due contributi distinti:

- un contributo medio di ciascun fontanile, strettamente connesso con le variazioni della soggiacenza della prima falda in corrispondenza delle teste di fontanile;
- un contributo medio delle portate di pioggia relative alla superficie drenante afferente al Capri.

Calcolo delle portate derivanti dall'escursione della prima falda

Il fontanile rappresenta l'intersezione della superficie freatica dell'acquifero con la superficie topografica. E' quindi evidente che la portata emunta dal fontanile dipenderà dalle variazioni stagionali della quota della superficie piezometrica

Le elaborazioni sono state condotte sfruttando i dati forniti dal *Consorzio Irrigazioni Cremonesi* che dalla fine del 2008, nell'ambito del "progetto fontanili" conduce un monitoraggio, con tre registrazioni giornaliere, della soggiacenza locale della falda in corrispondenza di alcuni freatimetri del comprensorio cremonese tra i fiumi Adda e Serio (Figura II.5).

In particolare, rientra tra i fontanili monitorati anche il fontanile Simonetta, in prossimità della Cascina Simonetta, che costituisce uno dei fontanili contribuenti al Capri.

I dati relativi alla Cascina Simonetta sono stati confrontati con le escursioni mensili della falda riferite ad un pozzo in comune di Pandino (dati forniti da ARPA – Dipartimento Provinciale di Cremona – Settore acque sotterranee), che è risultato il più vicino all'area interessata dai fontanili in esame per il quale è stato reperito un monitoraggio di circa quattro anni. Dal confronto è emersa una buona concordanza nell'andamento delle escursioni mensili della falda. Tale riscontro ha permesso di formulare l'ipotesi di estensione dei dati di soggiacenza media della falda riferiti alla Cascina Simonetta anche agli altri fontanili d'interesse.



Figura II.5 Dislocazione dei freatimetri monitorati nell'ambito del "progetto fontanili"

I dati giornalieri sono stati utilizzati per il calcolo della soggiacenza media mensile che è risultata avere l'andamento riportato in Figura II.6.

Il calcolo della portata emunta da ciascun fontanile è stato eseguito schematizzando il funzionamento del fontanile come un sistema pozzo freatico-trincea drenante completi. Tale assunzione è avallata dal fatto che le perdite di carico aggiuntive dovute al mancato raggiungimento del tetto dello strato impermeabile costituiscono un fattore di secondaria approssimazione nel contesto dell'approccio adottato.

In particolare sotto le ipotesi di Dupuit- Forcheimer per pozzo in acquifero freatico in condizioni stazionarie il calcolo della portata Q può essere eseguito attraverso la relazione [4,5]:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h_0^2)}{\ln(R/r_0)}$$

dove:

H è la quota piezometrica (in m) della falda freatica in condizioni indisturbate (misurata rispetto alla quota dello strato impermeabile);

h_0 è la quota (in m) del pelo libero del fontanile (misurata rispetto alla quota dello strato impermeabile);

R è la distanza (in m) rispetto al centro del fontanile in cui non si risente del cono di depressione;

r_0 è il raggio del fontanile (in m);

K è la conducibilità idraulica del terreno (in m/s).

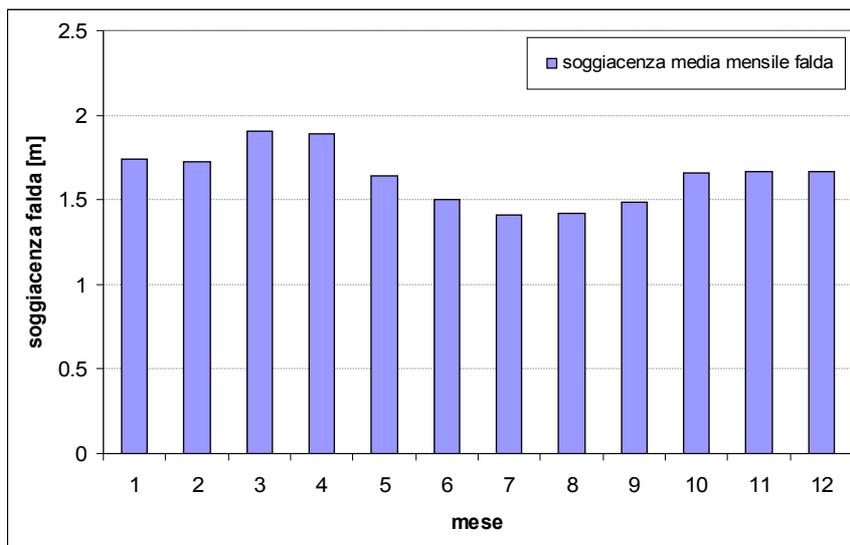


Figura II.6 Soggiacenza media mensile in corrispondenza della Cascina Simonetta

La quota dello strato impermeabile è stata localizzata a 55 m s.l.m.. Secondo la suddivisione proposta all'interno della relazione *Acque sotterranee in Lombardia* (2001) [6] la zona d'interesse risulta compresa nel settore 4 del macro settore 4 che identifica il bacino Adda - Oglio. In questo settore il limite tra l'acquifero superficiale ed il secondo acquifero è posto ad una quota compresa tra i 50 e i 95 m s.l.m.. Tale assunzione risulta essere in accordo con il limite basale del Gruppo Acquifero "A" individuato nella cartografia allegata al testo *Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia* (2002) [7] che identifica per la zona in esame una quota media di 50 m s.l.m.. All'interno della pubblicazione è inoltre riportata un'indagine stratigrafica effettuata a Pianengo (Figura II.7), dalla quale emerge uno spessore del Gruppo Acquifero "A" di circa 40 m.

Nella litozona superficiale sede della falda libera, predominano depositi ghiaioso-sabbiosi caratterizzati da una conducibilità idraulica molto elevata [8], per la quale è stato scelto un valore medio di 0.0012 m/s.

Per la stima del raggio R a cui si trova la falda freatica indisturbata si è utilizzata la formula di Siechartt [4], che tiene conto della permeabilità del terreno K e dell'escursione della falda rispetto al pelo libero del fontanile:

$$R = 3000 (H - h_0) \sqrt{K}$$

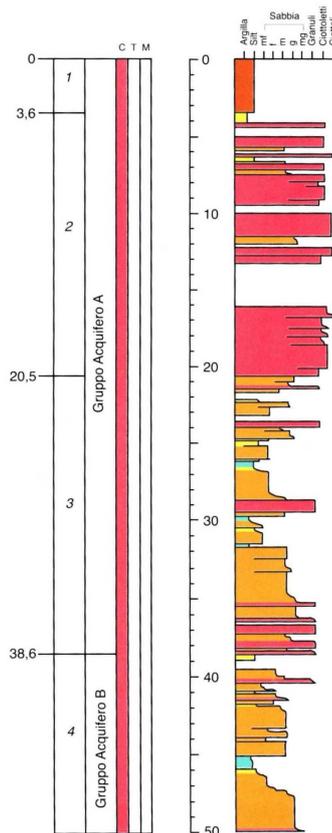


Figura II.7 Estratto dell'indagine stratigrafica effettuata a Pianengo [7]

Per quanto concerne il calcolo relativo al funzionamento del fontanile come trincea drenante è stata impiegata la relazione [4,5]:

$$q_{trincea} = \frac{K (H^2 - h_0^2)}{2L}$$

dove:

$q_{trincea}$ è la portata unitaria, drenata dal canale per unità di lunghezza (m^2/s);

L è la distanza tra la trincea e il punto in cui la falda si può considerare indisturbata.

La portata complessiva si calcola moltiplicando la portata unitaria $q_{trincea}$ per la lunghezza della trincea.

La determinazione delle quote e delle grandezze di riferimento per il calcolo è stata effettuata considerando i dati riportati in Tabella II.1, come riportato in [2] e sulle schede descrittive di ciascun fontanile presenti sul portale informatico Atlante della Provincia di Cremona:

Fontanile	z_{pc} [m slm]	p_s [m]	P_a [m]	L_f [m]	l [m]
-----------	------------------	-----------	-----------	-----------	---------

Simonetta	95	1	0.35	160*	2.7
Capri	94	1.4	0.27	320	1.6
Dei Grassi	98	2.5	0.65	490	2.6
Carrere	96	2.1	0.37	595	2.6

* dato stimato in quanto non disponibile

Tabella II.1 Grandezze d'interesse dei fontanili

dove:

z_{pc} è la quota del piano campagna in corrispondenza del fontanile;

p_s è la profondità di scavo della testa del fontanile rispetto al piano campagna;

p_a è la profondità dell'acqua nel fontanile misurata in corrispondenza delle date riportate sulle schede riferite a ciascun fontanile sul portale informatico Atlante della Provincia di Cremona;

L_f è la lunghezza del fontanile;

l è la larghezza della testa del fontanile.

La metodologia di calcolo adottata è stata validata attraverso il confronto con la portata misurata in data 02/11/2010 in corrispondenza di una sezione appena a valle del mulino di Pieranica.

Va inoltre osservato che il contributo alla portata complessiva del Capri derivante dal fontanile Carrere è stato valutato per una percentuale pari al 15% della portata sgorgante. La ragione di questa scelta è da ricercare nel fatto che il fontanile Carrere alimenta solo parzialmente il Capri andando invece a costituire, per la restante parte, il deflusso di una roggia limitrofa.

L'escursione mensile di ciascun fontanile e l'escursione mensile totale della portata del Capri sono riportate in Figura II.8.

Dal grafico è possibile osservare come le portate maggiori si realizzino in corrispondenza dei periodi caratterizzati dai più bassi valori di soggiacenza della falda.

L'andamento complessivo può essere utilizzato, considerando le assunzioni alla base del metodo, per la stima della portata minima e massima che caratterizza il Capri come contributo dai fontanili.

In particolare, la portata minima annua Q_{min} è stata stimata in $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la portata massima annua Q_{max} è risultata pari a $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$.

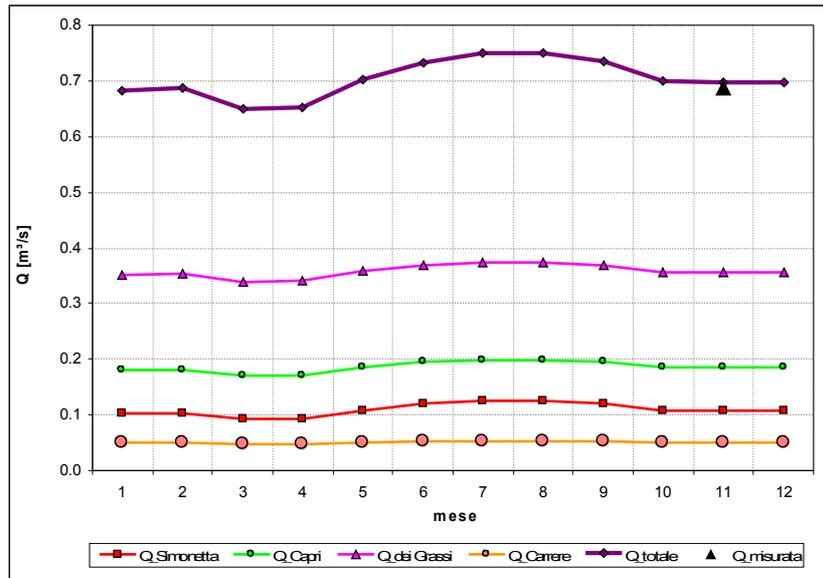


Figura II.8 Escursione media mensile della portata di ciascun fontanile e della portata complessiva del Capri

Tali risultati devono essere valutati alla luce delle estrapolazioni che si sono rese necessarie per il calcolo, prima tra tutti, l'attribuzione dello stesso andamento delle escursioni medie della falda rispetto al piano campagna per tutti i fontanili considerati, fatto questo che andrebbe opportunamente verificato, poiché in grado di produrre al limite anche la disattivazione di alcuni fontanili considerati o, all'estremo opposto, l'incremento della portata emunta naturalmente.

Calcolo delle portate di pioggia

Duranti i sopralluoghi effettuati è stato osservato come il Capri non svolga unicamente funzione irrigua, costituendo il canale in cui confluiscono i coli di alcuni terreni ad esso adiacenti. L'estensione della superficie drenante complessiva è stata valutata in circa 0.43 km².

Conseguentemente, è stato stimato anche un contributo alla portata complessiva del Capri proveniente dalle acque meteoriche, valutato elaborando le misure di altezze di pioggia cumulate sulle ventiquattro ore riferite alla stazione pluviometrica di Capralba (Pluviometro ARPA Lombardia, Id_stazione: 128, Id_sensore: 2395) dal 1997 al 2009 [13].

Sulla base dell'intensità di pioggia media giornaliera è stata calcolata la portata al colmo corrispondente, mediante l'impiego della formula razionale [9]:

$$Q_p = \varphi i A$$

dove:

Q_p è la portata meteorica al colmo di piena (in m³/s);

φ è il coefficiente di afflusso, compreso tra 0 e 1;

i è l'intensità di precipitazione (in m/s);

A è l'area del bacino o area della superficie drenante (in m²).

Per il coefficiente di afflusso ϕ , nonostante le caratteristiche di permeabilità dei terreni agricoli, è stato assunto un valore pari a 0.7. Tale assunzione è stata effettuata per tenere in dovuta considerazione le precipitazioni del periodo estivo che interessano terreni caratterizzati in realtà da un elevato grado di saturazione come effetto della pratica irrigua che limita fortemente la capacità di smaltimento delle acque meteoriche per infiltrazione.

Per ciascun giorno dell'anno (non considerando i giorni in cui i dati di pioggia erano assenti o non attendibili) le portate calcolate sono state ordinate in senso decrescente al fine di ottenere per il periodo di osservazione una curva di durata delle portate meteoriche nella sezione d'interesse normalizzata sul numero t^* di dati disponibili per anno (Figura II.9).

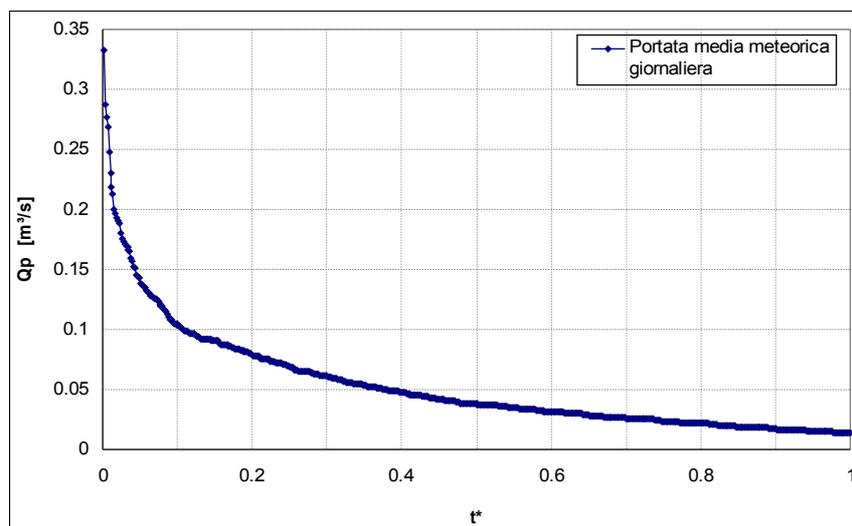


Figura II.9 Curva di durata delle portate meteoriche

I giorni caratterizzati da precipitazioni cumulate giornaliere inferiori ai 4 mm non sono stati considerati, poiché si è supposto che le aree drenanti siano in grado di smaltire le portate derivanti indipendentemente dalle condizioni del suolo.

Dalla ricostruzione della curva di durata per le precipitazioni piovose medie giornaliere è stata individuata una portata di pioggia media di 0.05 m³/s disponibile per almeno 20 giorni piovosi all'anno e utilizzabile per scopi idroelettrici.

Tale valore si può sommare alla portata massima proveniente dai fontanili per il calcolo di una portata massima complessiva Q_{MAX} pari a 0.8 m³/s.

La portata massima stimata risulta essere dello stesso ordine di grandezza della portata media estiva valutata nello studio presentato nell'ambito del Convegno SMART [10] in 0.91 m³/s.

Va inoltre osservato che dal rilievo della sezione di misura realizzato il 02/11/2010 può essere stimata una portata massima di moto uniforme transitabile senza pericoli di esondazione pari a 1.2 m³/s.

Stima della curva di durata delle portate del Capri

Una stima della curva di durata delle portate giornaliere mediamente disponibili al mulino è stata effettuata considerando costante, per ogni giorno del mese, il contributo di portata proveniente dai fontanili calcolato al paragrafo , al quale è stato sommato il contributo di pioggia giornaliero, calcolato considerando le altezze di pioggia cumulate medie mensili sulla base dei dati disponibili e con le stesse ipotesi effettuate per il calcolo al paragrafo .

Alla portata totale giornaliera così calcolata, è stata sottratta la portata derivata in media ogni giorno durante la stagione irrigua (dal 25 aprile al 25 settembre), la cui stima è stata effettuata analizzando il fabbisogno irriguo delle colture presenti sul territorio. Sulla base dello studio eseguito dalla Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Milano [11] è stata considerata una partizione della Superficie Agraria Utile (S.A.U) in linea con la macroarea Adda Serio Brembo Cherio Oglio, normalizzando le percentuali sulla base delle colture effettivamente messe a dimora nel comprensorio in esame. A ciascuna coltura è stata assegnato un fabbisogno medio F_{mi} irriguo per la durata d_{mi} della stagione irrigua e un fabbisogno massimo irriguo F_{pi} durante la decade di punta d_{pi} , come mostrato in Tabella II.2.

Coltura	% S.A.U.	F_{mi} [l/s ha]	D_{mi} [d]	F_{pi} [l/s ha]	D_{pi}
AV+2°racc*	4.65	0.31	96	0.48	17-ago / 26-ago
Mais granella	50.00	0.42	185	0.65	08-lug / 17-lug
Soia	4.65	0.4	185	0.65	08-lug / 17-lug
Prati avvicendati	8.14	0.29	365	0.64	18-giu / 27-giu
Erbai estivi	18.60	0.43	167	0.43	08-lug / 17-lug
Prati stabili	13.96	0.28	365	0.67	29-mag / 07-giu

*Avvicendamento cereali autunno-vernini ed altri erbai

Tabella II.2 Utilizzo S.A.U., fabbisogni e periodi irrigui

La superficie irrigata dal Capri è stata stimata in 1.49 km². Conseguentemente, le portate irrigue giornaliere sono state calcolate mediante la formula:

$$Q_i = \eta AF_i$$

dove:

Q_i è la portata irrigua (in m³/s).

η è l'efficienza del metodo irriguo a scorrimento, ipotizzata pari a 0.35.

A è l'area della superficie irrigata (in m^2).

F_i è il fabbisogno irriguo (F_{mi} o F_{pi} a seconda del periodo considerato) (in $m^3/(s m^2)$).

Seguendo la metodologia precedentemente esposta è stato possibile stimare la curva di durata delle portate, rappresentata in Figura II.10.

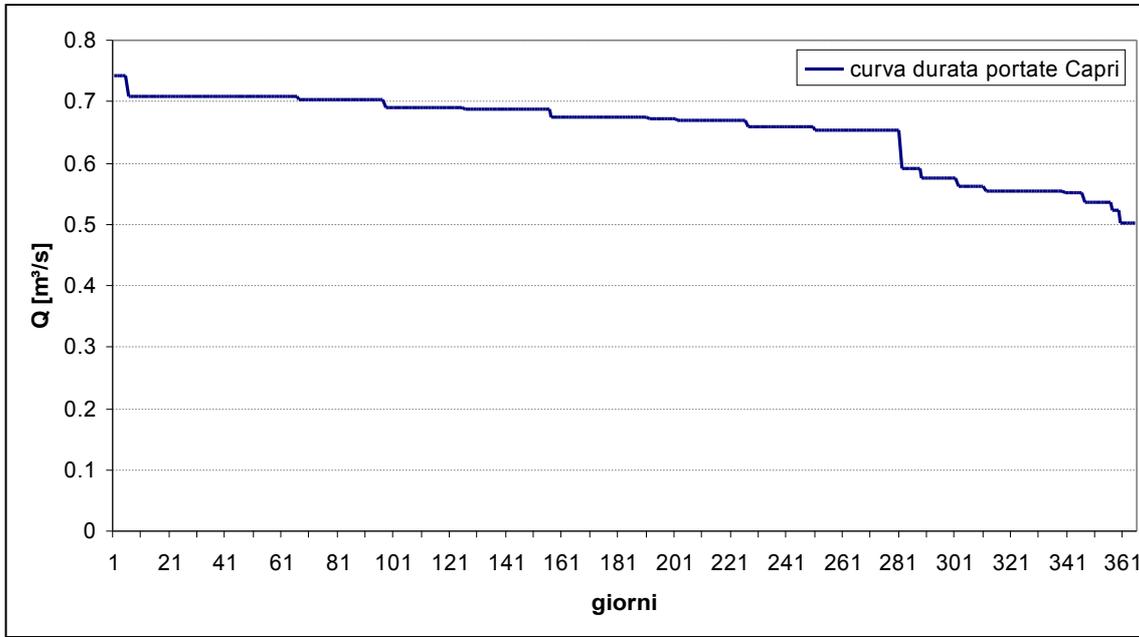


Figura II.10 Curva di durata delle portate relativa al Capri

Il calcolo dell'area sottesa alla curva di durata permette di determinare il volume totale annuo disponibile che risulta pari a $V = 20657715 m^3$.

3.3 SITO 2 – Roggia Marinona – Romanengo (CR)

La roggia Marinona (da qui in poi semplicemente Marinona) origina da un'opera di presa sul Naviglio Civico di Cremona, sita circa 2 km a monte del mulino Razzica, nel territorio del comune di Romanengo, come illustrato dall'estratto planimetrico in Figura II.11

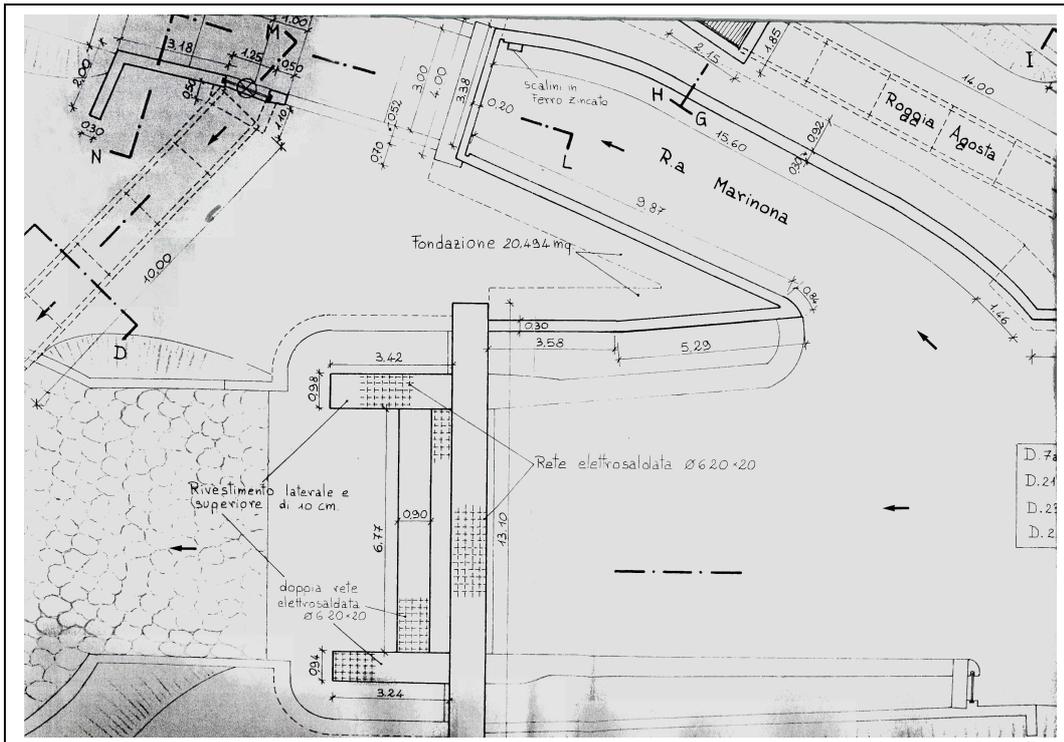


Figura II.11 Estratto planimetrico della derivazione della Marinona dal naviglio Civico di Cremona

La roggia, gestita dal *Consorzio del Naviglio della città di Cremona*, alimenta a valle della presa due canali di irrigazione per una portata massima nominale di 128 l/s cadauno e, a valle, aziona la ruota del mulino Razzica prima di restituire le sue acque al Naviglio Civico.

L'opera di presa in sponda destra del Naviglio Civico non è regolata; tuttavia, la Marinona è provvista, circa 10 m a valle della presa, di uno scarico laterale in sponda sinistra, regolato da una paratoia manuale, che consente di restituire al Naviglio parte delle acque da esso prelevate limitando la portata defluente nella Marinona.

Determinazione del range di variabilità delle portate della Marinona

Il calcolo degli estremi di escursione delle portate in arrivo al mulino è stato effettuato sulla base di alcune considerazioni di carattere idraulico; in primis, è da notare come la presenza della paratoia di regolazione sulla Marinona a valle della derivazione permetta una possibile disconnessione, in qualsiasi momento dell'anno, delle portate transitanti al mulino con il regime idrologico che caratterizza il Naviglio a monte dell'opera di presa. In prima approssimazione, escludendo i periodi di asciutta del Naviglio Civico per la manutenzione, è quindi possibile considerare la portata nella Marinona:

- costante nel periodo irriguo, quando la portata derivata dall'opera di presa della Marinona può essere superiore alla portata di 1.14 m³/s dichiarata dal *Consorzio Naviglio della città*

di Cremona come portata prevista nella roggia; la portata in eccesso viene quindi restituita al Naviglio Civico attraverso lo scarico laterale;

- approssimativamente costante nel periodo invernale e di manutenzione quando nel Naviglio Civico viene mantenuto un deflusso minimo di circa $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$: la portata derivata dall'opera di presa della Marinona può infatti essere mantenuta a circa 500 l/s , regolando la paratoia dell'opera di scarico anche in conseguenza di piene del Naviglio Civico conseguenti ad eventi meteorici.

Si fa presente che il *Consorzio Naviglio della città di Cremona* non ha potuto fornire alcuna scala delle portate in corrispondenza di una qualsiasi sezione del Naviglio in cui sono registrati i livelli idrometrici: conseguentemente, non è stato possibile in alcun modo ricostruire sulla base di dati misurati la variazione delle portate in corrispondenza dell'opera di presa.

La stima delle portate derivabili nella Marinona è stata quindi inizialmente basata sulla conoscenza delle portate di concessione nominali del Naviglio Civico di Cremona dichiarate dal Consorzio dell'Oglio [12], riassunte in Tabella II.3, in corrispondenza della presa sul fiume (regolata per mezzo di tre paratoie piane a carrelli come mostrato in Figura II.12).

	estate	inverno	maggio/settembre
Portata di concessione [m^3/s]	10.458	4	6.828

Tabella II.3 Portate di concessione del Naviglio Civico di Cremona alla presa sul fiume Oglio.

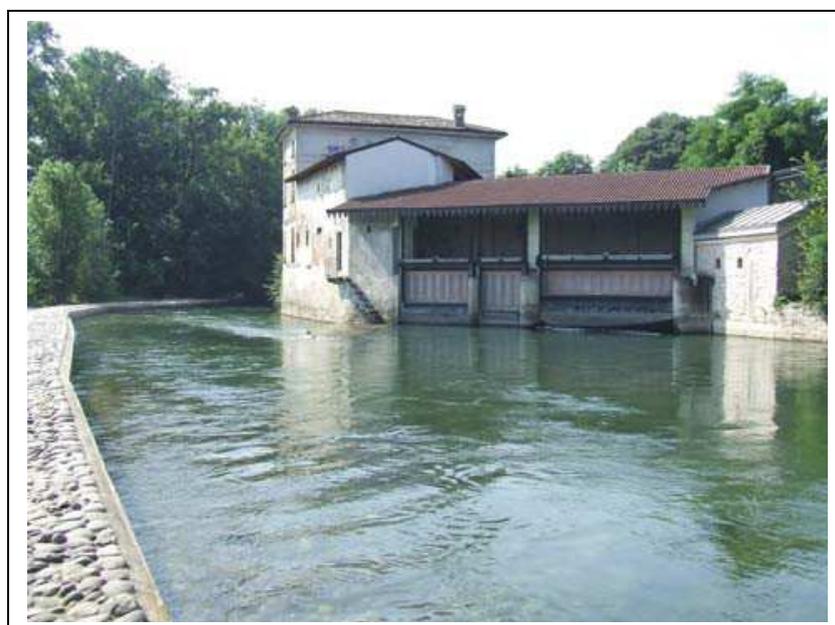


Figura II.12 Opera di presa del naviglio civico di Cremona dal fiume Oglio

Va però osservato come le portate nominali non debbano essere confuse con le portate effettivamente disponibili e come la portata in corrispondenza della sezione d'interesse risulti

influenzata non solo dalle prese irrigue lungo l'asta ma anche dagli apporti di rogge e fontanili, per i quali la stima delle portate cedute al naviglio di Cremona è di difficile determinazione.

Pertanto, la verifica sulle portate effettivamente derivabili dal Naviglio nella Marinona è stata effettuata analizzando le caratteristiche geometriche dell'opera di presa sul Naviglio civico.

L'opera di presa è costituita da una derivazione libera laterale in sponda destra, avente sezione rettangolare di larghezza pari a 6.5 m e altezza delle sponde pari a 2.2 m, situata immediatamente a monte di uno stramazzo sul Naviglio costituito da uno stramazzo a larga soglia trasversale di altezza sul fondo pari a 0.45 m e larghezza pari a 6.7 m. Alle estremità dello stramazzo sono situati due sfioratori laterali, entrambi di altezza sul fondo pari a 0.45 m, e di lunghezza pari a circa 9 m sulla destra e pari a circa 12 m sulla sinistra.

Per verificare la portata derivabile nella Marinona per diverse condizioni di portata defluente nel Naviglio civico si è operato come segue:

- si è ipotizzata una frazione f della portata Q_N defluente nel Naviglio a valle della presa come portata scaricata dallo stramazzo a larga soglia trasversale;
- si è calcolato il carico h_S sullo stramazzo come $h_S = \left(\frac{(fQ_N)^2}{2gc_E^2 B_S^2} \right)^{\frac{1}{3}}$, dove $B_S = 6.7$ m è la larghezza dello stramazzo e si è assunto un coefficiente di efflusso $c_E = 0.3$;
- si è calcolata l'energia specifica $E_S = 0.45 + h_S + \frac{(fQ_N)^2}{2gB_S^2 h_S^2}$ nella sezione a monte dello stramazzo;
- si è assunta energia specifica costante e pari a E_S lungo tutti i due sfioratori laterali, assunti per semplicità di pari lunghezza $L_L = 10$ m;
- si sono suddivisi i due sfioratori laterali in tratti di 0.5 m di lunghezza, calcolando per ogni tratto la portata sfiorata come $\Delta Q_L = c_E h_L \sqrt{2gh_L}$, dove h_L è il carico medio sullo sfioratore laterale, calcolato a partire dall'ipotesi di energia costante;
- si è calcolata la portata a monte come $Q^* = fQ_N + \Sigma \Delta Q_L$ e si è iterato il calcolo fino a convergere al valore $Q^* = Q_N$;
- si è utilizzato il valore di energia specifica E_S ricavato dal calcolo iterativo per ricavare la portata defluente nella roggia in condizioni di moto uniforme a valle risolvendo iterativamente il seguente sistema di equazioni, esprimente la condizione di bilancio dell'energia e quella di moto uniforme:

$$\begin{cases} E_S = h_M + (1 + \alpha) \frac{Q_M^2}{2gB_M^2 h_M^2} \\ Q_M = k\sqrt{i} \frac{(B_M h_M)^{\frac{5}{3}}}{(B_M + 2h_M)^{\frac{2}{3}}} \end{cases}$$

dove $B_M = 3.2$ m è la larghezza della Marinona a valle dell'opera di presa, $i = 0.1$ % è la pendenza media della roggia derivata dalla cartografia, $k = 40$ m^{1/3}s⁻¹ è assunto come coefficiente di Strickler per la scabrezza di un alveo inerbito, h_M è il tirante di moto uniforme nella Marinona a valle dell'opera di presa e α un coefficiente di perdita di carico attraverso l'opera di presa.

Il coefficiente α è stato tarato attraverso il confronto con misure eseguite dal *Consorzio del Naviglio della città di Cremona*, sia sul Naviglio che sulla Marinona, a valle dell'opera di presa. Le misure del consorzio danno una portata nella Marinona $Q_M = 1.14$ m³/s in corrispondenza ad una portata nel Naviglio a valle della presa della Marinona $Q_N = 3.35$ m³/s. I calcoli sopra descritti forniscono risultati pari alle misure effettuate per $\alpha = 4.9$.

Ripetendo tali calcoli per varie portate nel naviglio a monte della presa della Marinona, è possibile calcolare le portate massime derivabili nella Marinona stessa.

Il calcolo delle portate medie mensili presenti nel Naviglio Civico di Cremona a monte della sezione di presa della Marinona e le portate contestualmente derivabili nella Marinona stessa sono state calcolate sulla base dell'ipotesi di mantenimento durante tutto l'anno della proporzionalità esistente tra la portata massima misurata nel Naviglio e la portata nominale massima di concessione. Tale approccio ha permesso di scalare le portate del Naviglio a monte della presa della Marinona sulla base delle portate di concessione elencate in Tabella II.3.

Per il calcolo, sono stati considerati anche i periodi di asciutta per manutenzione dichiarati dal *Consorzio del Naviglio della città di Cremona* (febbraio e marzo) durante i quali è comunque garantito il deflusso di una portata minima di circa 1.5 m³/s.

I risultati sono riassunti in Tabella II.4.

Mese	Portata Naviglio [m ³ /s]	Portata Marinona [m ³ /s]	h_o Naviglio [m]	h_o Marinona [m]
1	1.72	0.83	0.25	0.42
2	1.50	0.80	0.23	0.41
3	1.50	0.80	0.23	0.41
4	1.72	0.83	0.25	0.42

5	2.93	0.97	0.35	0.47
6	4.49	1.14	0.46	0.52
7	4.49	1.14	0.46	0.52
8	4.49	1.14	0.46	0.52
9	2.93	0.97	0.35	0.47
10	1.72	0.83	0.25	0.42
11	1.72	0.83	0.25	0.42
12	1.72	0.83	0.25	0.42

Tabella II.4 Portate medie mensili nel Naviglio Civico (a monte della presa della Marinona) e corrispondenti portate medie derivate nella Marinona con paratoia di by-pass chiusa

Lo stesso procedimento di calcolo è stato ripetuto ipotizzando portate in arrivo dal Naviglio di entità superiore rispetto a quelle stimate, al fine di valutare la corrispondente portata derivabile nella Marinona. I risultati sono indicati in Tabella II.5.

Portata Naviglio [m³/s]	Portata Marinona [m³/s]	h_o Naviglio [m]	h_o Marinona [m]
7	1.40	0.60	0.60
10	1.70	0.76	0.69
12	1.91	0.85	0.74

Tabella II.5 Stima della variabilità delle portate derivabili nella Marinona al variare delle portate del Naviglio Civico di Cremona

Per quanto concerne il deflusso in sicurezza delle portate derivate nella Marinona dalla presa sul naviglio alla sezione al mulino si è deciso prudenzialmente di considerare come portata massima il valore misurato dal *Consorzio Naviglio della città di Cremona*, pari a 1.14 m³/s. Nel presente progetto non è infatti stato previsto uno studio idraulico di dettaglio per determinare la portata massima effettivamente sostenibile dalla roggia senza rischio di esondazione in condizioni di moto permanente. In ogni caso, si ricorda come, anche in occasione di portate eccezionali, sia possibile restituire parte della portata derivata dal Naviglio per mezzo della paratoia di regolazione situata immediatamente a valle della presa.

Per il sito in esame in data 02/11/2010 è stata infine effettuata una misura di portata al mulino mediante mulinello idrometrico, da cui si è ricavato un valore di 0.48 m³/s. Durante la misura la paratoia di by-pass che restituisce parte della portata prelevata dalla Marinona nuovamente al

naviglio di Cremona era aperta. Considerando il periodo dell'anno in cui è stata eseguita la misura e le succitate condizioni al contorno è ragionevole far coincidere la portata minima transitabile con la portata misurata.

Tale valore risulta essere dello stesso ordine di grandezza della portata media estiva stimata nello studio presentato nell'ambito del Convegno SMART [10] pari a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Stima della curva di durata delle portate della Marinona

Considerando la necessità di soddisfare la derivazione della portata di concessione alle bocche di presa sulla Marinona durante il periodo dal 25 aprile-25 settembre (per una portata nominale complessiva di $0.256 \text{ m}^3/\text{s}$) è stata ricavata la curva di durata delle portate teorica della Marinona, rappresentata in Figura II.13. Il calcolo dell'area sottesa alla curva di durata permette di determinare il volume totale annuo disponibile che risulta pari a $V = 25765038 \text{ m}^3$.

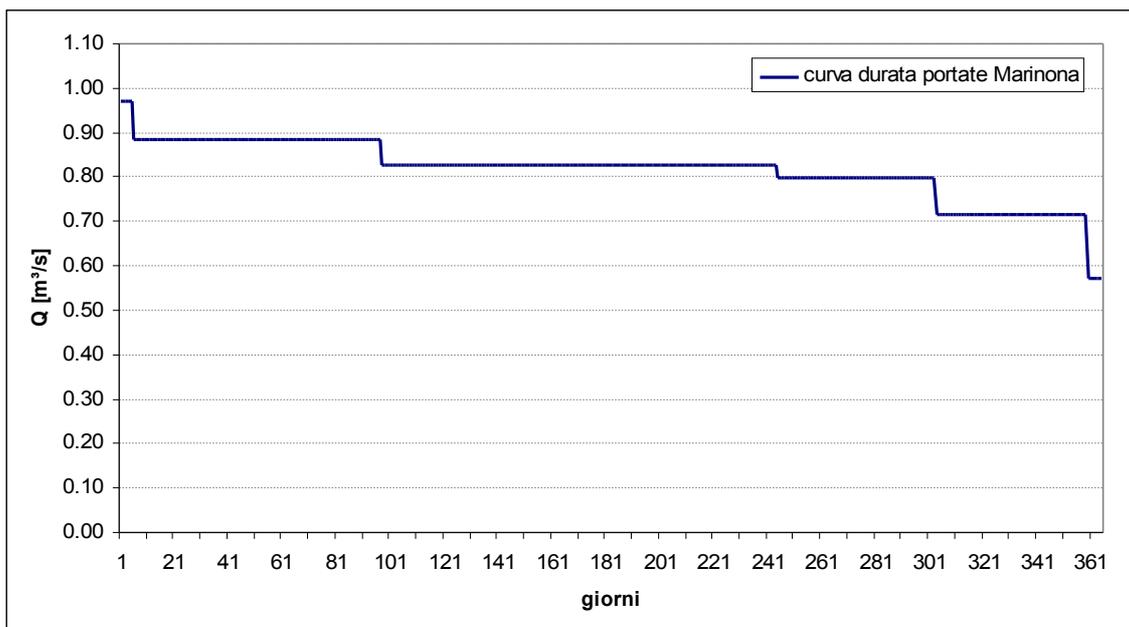


Figura II.13 Curva di durata delle portate relativa alla Marinona

4. Stima delle coppie agenti sulle ruote idrauliche e delle relative velocità di rotazione

La stima del rendimento e delle coppie agenti sulle ruote nelle diverse condizioni di funzionamento è basata sui dati rilevati durante il sopralluogo ai due mulini e su alcune assunzioni teoriche semplificative.

Entrambe le ruote sono realizzate con una struttura metallica circolare lungo la cui circonferenza è fissata una serie di pale in ferro in numero pari a 40 nel caso del Mulino Razzica e di 52 nel caso del Mulino Pieranica. Il diametro complessivo della struttura è $D = 4$ m.

Ciascuna pala è costituita da una lamiera curvata di larghezza $b = 0.7$ m e profondità $p = 0.6$ m. L'estremità esterna di ciascuna pala giace su un piano passante per l'asse della ruota, mentre l'estremità fissata alla struttura è tangente ad un piano inclinato verso l'alto di un angolo $\beta = 45^\circ$ rispetto al precedente. Le ruote sono del tipo "di fianco celere", ovvero alimentate lateralmente da una vena fluida diretta tangenzialmente alla circonferenza esterna della ruota e regolata attraverso una paratoia. La schematizzazione dell'impianto è riportata in Figura II.12.

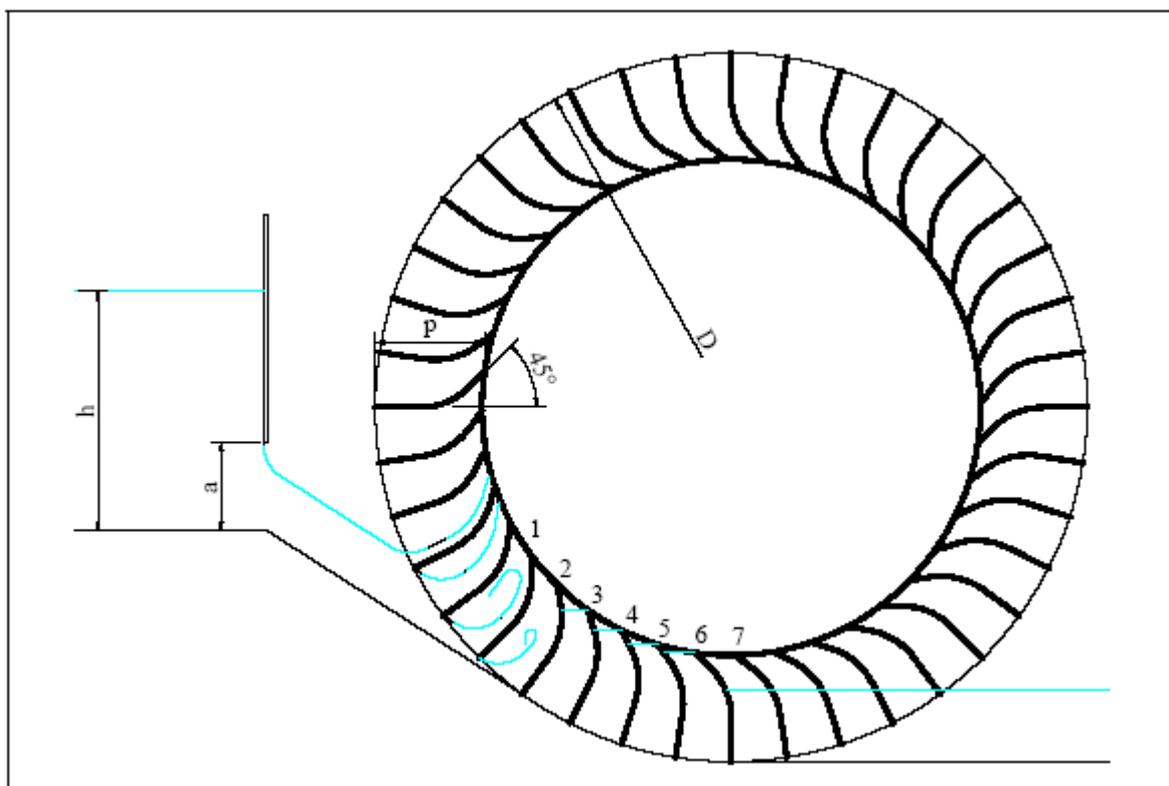


Figura II.12 Schema geometrico adottato per la valutazione delle caratteristiche idrauliche della ruota sulla roggia Marinona al mulino Razzica di Romanengo

Data la similitudine, sia dimensionale che costruttiva, tra le ruote idrauliche presenti nei due mulini, è stato adottato per entrambe lo stesso metodo per la valutazione di coppie e rendimenti, come descritto di seguito.

Nota la portata Q , la velocità della vena liquida è calcolata in base alla formula di foronomia per l'efflusso da una paratoia piana:

$$V = c_v \sqrt{2g(h - c_c a)}$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità (m/s^2);
- h è il tirante idrico a monte della paratoia di regolazione (m);
- a è l'apertura della paratoia (m);
- $c_c = 0.61$ è il coefficiente di contrazione;
- $c_v = 0.98$ è un coefficiente correttivo che tiene conto delle perdite di carico nell'efflusso.

Si assume che siano immerse nella vena fluida n pale ($n = 4$ nel caso di Pieranica, dove il salto è minore, $n = 5$ nel caso del Mulino Razzica), corrispondenti ad $n/40$ di circonferenza.

La forza agente sulle prime pale, direttamente investite dalla vena a velocità V , è ricavata dall'equazione globale dell'equilibrio idrodinamico, assumendo che la vena fluida sia deviata verso l'alto e all'indietro con un angolo pari a β .

Si ottiene:

$$F_1 = (1 + \sin \beta) c_Q \rho V Q$$

dove:

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ è la densità dell'acqua;
- $c_Q \approx 0.7 - 0.8$ è un coefficiente che tiene conto della riduzione di portata a causa di trafilemento sotto alle pale della ruota e di flussi laterali.

Si è assunta tale forza come agente interamente sulla pala 1 (in realtà, essa è ripartita sulla pala 1 e sulle tre pale precedenti).

La forza agente sulle pale dalla seconda alla quinta è invece dovuta alla spinta idrostatica esercitata dall'acqua ormai ferma sulla pala:

$$F_{2-5} = \rho g \frac{(c_R p)^2}{2} b$$

dove:

- c_R è un coefficiente che tiene conto del parziale riempimento del volume compreso tra due pale, assunto pari a 0.9 nel caso del Mulino Razzica e pari a 0.5 nel Mulino Pieranica, alimentato più dal basso.

La velocità angolare di rotazione della ruota (in giri al minuto) è quella conseguente al passaggio della portata negli n volumi “efficaci”:

$$\omega = 60 \frac{c_Q Q}{c_R p b \pi D}$$

La resistenza idrodinamica sulle pale in risalita è ripartita sulle pale successive alla 5, che sono solo parzialmente immerse nell’acqua; per semplicità, essa è stata considerata equivalente a quella che agirebbe sulle pale 6 e 7, se esse fossero interamente immerse in acqua:

$$F_{6-7} = c_D \frac{1}{2} \rho \left(\omega \frac{D}{2} \right)^2 b c_R p$$

dove $c_D \approx 2$ è il coefficiente di resistenza delle pale. La resistenza aerodinamica sulle altre pale può essere calcolata analogamente ma risulta trascurabile.

La coppia agente sulla pala può quindi essere stimata come:

$$C = (F_1 + (n - 1)F_{2-5} - 2F_{6-7}) \frac{D}{2}$$

mentre la potenza ottenuta può essere stimata come:

$$W = C 2\pi \omega$$

e, infine, il rendimento risulta:

$$\eta_{idr} = \frac{W}{\rho g Q \Delta H}$$

Per i due impianti previsti si sono quindi ottenuti i valori riportati in Tabella II.1.

Mulino	Q [m³/s]	Coppia [Nm]	Velocità [giri/min]	Rendimento
Pieranica	0.65	2260	11.8	0.53
	0.80	2270	14.5	0.53
Romanengo	0.50	10410	5.1	0.55

1.14	12070	10.1	0.55
------	-------	------	------

Tabella II.6 Caratteristiche di funzionamento delle ruote idrauliche dei siti selezionati

5. Studio preliminare del collegamento elettrico

Dalla precedente analisi idraulica si ricavano le potenze idrauliche disponibili all'asse delle ruote idrauliche, calcolate con la formula:

$$W_{idr} = \eta_{idr} \rho g Q \Delta H$$

dove η_{idr} è il rendimento idraulico della ruota.

Si hanno, quindi, i risultati di seguito riportati; per il mulino di Pieranica:

- __potenza massima: 3.45 kW;

- __potenza minima: 2.8 kW;

per il Mulino Razzica:

- __potenza massima: 12.6 kW;

- __potenza minima: 5.5 kW.

Nel seguito saranno assunti i valori di riferimento di 2.5 e 15 kW per caratterizzare le potenze ottenibili nei due casi in esame.

Come discusso nel paragrafo 2.1 della Parte I, sono in generale disponibili per la generazione in rete le seguenti tecniche:

- 1) generazione diretta in rete;
- 2) generazione indiretta tramite la mediazione di un convertitore di frequenza.

Come detto, la tecnica di generazione diretta in rete necessita del controllo della velocità di rotazione del generatore che deve poter iniettare corrente in sincronia con la tensione di rete, mentre la tecnica della generazione indiretta consente una completa mancanza di correlazione tra la velocità di rotazione del generatore e la frequenza di rete mentre alla conversione di frequenza provvede un inverter, assistito o meno nell'opera da ulteriori sistemi accessori.

Nel caso della riconversione idroelettrica dei siti in esame, la seconda tecnica appare preferibile.

Nel seguito, si presentano le due alternative evidenziando come le tecniche di generazione diretta portino a rendimenti troppo esigui.

5.1 Schemi possibili di generazione diretta

E' possibile ipotizzare e commentare alcuni schemi di principio delle soluzioni possibili relative a tecniche di generazione diretta, stimando il rendimento complessivo del sistema di conversione.

Conversione diretta, generatore sincrono

Lo schema a blocchi del sistema è riportato in figura II.13.



Figura II.13 Schema a blocchi del sistema di conversione diretta a generatore sincrono.

In condizioni ottimali di controllo di velocità di rotazione il sistema con conversione diretta con generatore sincrono offre le migliori prestazioni di rendimento η :

- η del giunto = 0.95;
- η del cambio con rapporto 30:1 = 0.9;
- η del generatore sincrono a 20 poli per 2.5 kW di potenza: 0.85 circa a velocità di sincronismo, 0 al di fuori;
- η del generatore sincrono a 20 poli per 15 kW di potenza: 0.95 circa a velocità di sincronismo, 0 al di fuori.

Il rendimento elettrico complessivo risulta naturalmente dal prodotto dei rendimenti delle singole componenti:

$$\eta_{el} = \eta_{giunto} \eta_{cambio} \eta_{generatore}$$

Si ha quindi:

- η_{el} complessivo a potenza 2,5kW: 0,7268 a velocità di sincronismo, 0 al di fuori;
- η_{el} complessivo a potenza 15kW: 0,8122 a velocità di sincronismo, 0 al di fuori.

Mancando la possibilità di controllare la velocità della girante questa soluzione al di fuori dei rari momenti di sincronismo in cui può ottenere i rendimenti indicati deve essere considerata con un rendimento prossimo a 0. Il rendimento complessivo nell'arco di un anno può quindi essere ritenuto prossimo a 0.

Conversione diretta, generatore asincrono

Lo schema a blocchi del sistema è riportato in figura II.14.

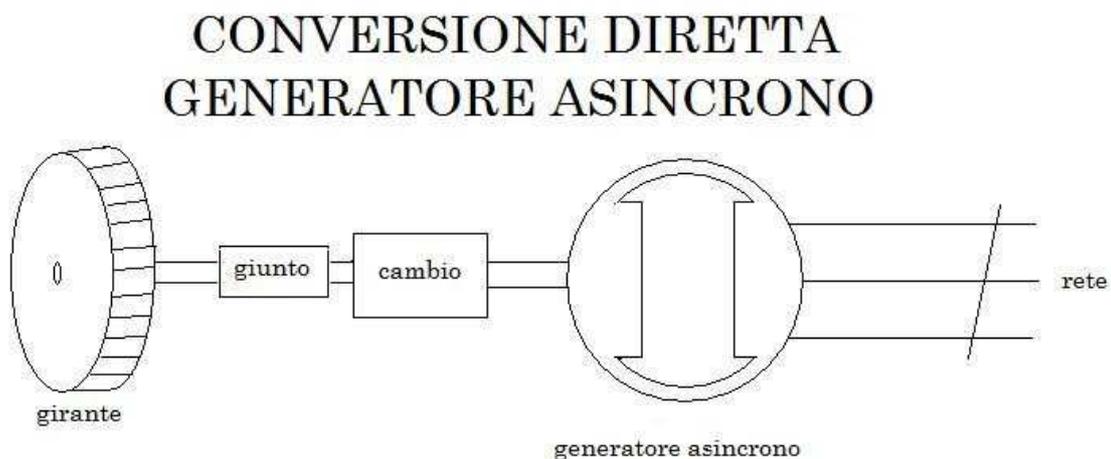


Figura II.14 Schema a blocchi del sistema di conversione diretta a generatore asincrono.

Il generatore asincrono offre una larghezza di impiego in velocità diverse dal sincronismo largamente maggiori del generatore sincrono. Lo scorrimento ottimale ha un valore prossimo a 0,05 ed in quella situazione il generatore asincrono offre un rendimento elevato. All'aumentare dello scorrimento il rendimento diminuisce rapidamente e per scorrimento dell'ordine dello 0,15 possiamo considerarlo già del 50%. La finestra di velocità della girante copre un fattore 2 a cui corrisponde uno scorrimento fino a 0,5.

Per operare da generatore la macchina asincrona deve essere portata a velocità superiore a quella di sincronismo. E' possibile quindi procedere ad una ottimizzazione tra le perdite di rendimento legato

allo scorrimento e l'esclusione di una periodo temporale di potenzialità dovuta alla velocità di sincronismo maggiore rispetto alla velocità di rotazione.

Allo scorrimento ottimale si hanno i seguenti valori di rendimento:

- η del giunto = 0.95;
- η del cambio con rapporto 30:1 = 0.9;
- η del generatore asincrono a 20 poli per 2.5 kW di potenza: 0.8 circa;
- η del generatore asincrono a 20 poli per 15 kW di potenza: 0.95 circa.

Il rendimento elettrico complessivo risulta quindi:

- η_{el} complessivo a potenza 2,5kW: 0.6840 allo scorrimento ottimale, inferiore a 0.43 al di fuori;
- η_{el} complessivo a potenza 15kW: 0.7695 allo scorrimento ottimale, inferiore a 0.43 al di fuori.

Il modello richiede la definizione accurata del generatore asincrono. E' possibile stimare fin d'ora per i due impianti un rendimento complessivo $\eta = \eta_{idr} \eta_{el}$ nell'arco dell'anno significativamente inferiore a 0.25.

5.2 Schemi possibili di generazione indiretta

E' possibile ipotizzare e commentare alcuni schemi di principio delle soluzioni possibili relative a tecniche di generazione indiretta, stimando il rendimento complessivo del sistema di conversione.

Conversione indiretta, dinamo

Lo schema a blocchi del sistema è riportato in figura II.15.

Con un'opportuna progettazione della dinamo, è possibile ottenere una tensione di uscita superiore a quella necessaria per effettuare la conversione DC/AC per ogni velocità della girante.

Sempre con un'opportuna progettazione della dinamo, è possibile anche ridurre di un fattore da 2 a 3 il rapporto del cambio, passando da 30:1 a 10:1 con un aumento del rendimento del cambio.

Infine, il regolatore di tensione è necessario nella taglia di potenza pari a 2.5 kW per rimuovere le armoniche a 100 Hz indotte dalla rete monofase.

CONVERSIONE INDIRETTA DINAMO+REGOLATORE+INVERTER

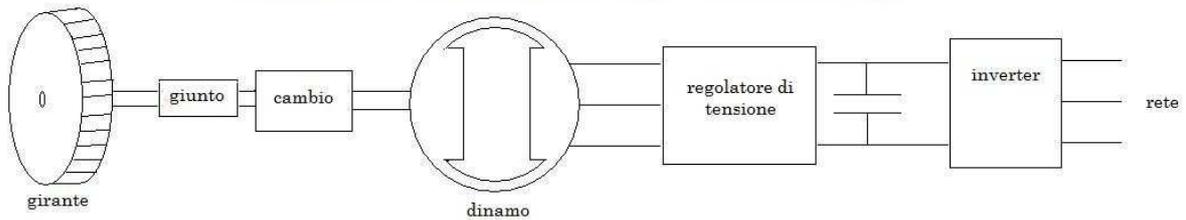


Figura II.15 Schema a blocchi del sistema di conversione in diretta a dinamo.

Si hanno i seguenti valori di rendimento per le componenti del sistema:

- η del giunto = 0.95;
- η del cambio con rapporto 10:1 = 0.93;
- η della dinamo 400V/800V per 2.5 kW di potenza: 0.8;
- η della dinamo 600V/1200V per 15 kW di potenza: 0.9;
- η del regolatore per 2.5 kW di potenza (che elimina armoniche a 100Hz): 0.95;
- η dell'inverter per 2.5 kW di potenza: 0.9;
- η dell'inverter per 15 kW di potenza: 0.95.

Il rendimento elettrico complessivo risulta naturalmente dal prodotto dei rendimenti delle singole componenti:

$$\eta_{el} = \eta_{giunto} \eta_{cambio} \eta_{dinamo} [\eta_{regolatore}] \eta_{inverter}$$

e risulta praticamente indipendente dalla velocità della girante. Si ha quindi:

- η_{el} complessivo a potenza 2,5kW: 0.6043;
- η_{el} complessivo a potenza 15kW: 0.7554.

Conversione indiretta, generatore sincrono

Lo schema a blocchi del sistema è riportato in figura II.16.

CONVERSIONE INDIRETTA SINCRONO+RADDRIZZATORE+REGOLATORE+INVERTER

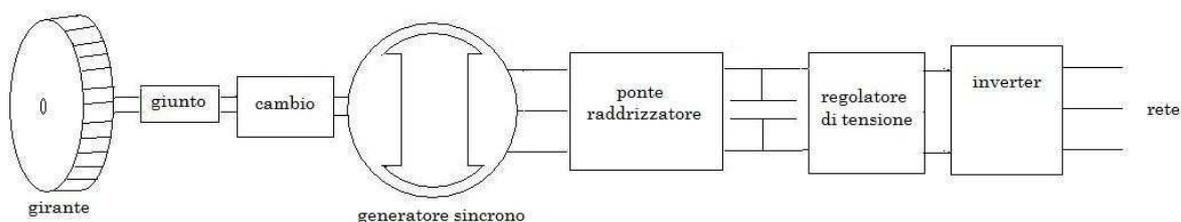


Figura II.16 Schema a blocchi del sistema di conversione in diretta a generatore sincrono.

Con l'opportuna progettazione del generatore sincrono, è possibile ottenere una tensione di uscita superiore a quella necessaria per effettuare la conversione DC/AC per ogni velocità della girante.

Il regolatore di tensione è necessario nella taglia di potenza da 2.5kW per rimuovere le armoniche a 100Hz indotte dalla rete monofase.

Si hanno i seguenti valori di rendimento per le componenti del sistema:

- η del giunto = 0.95;
- η del cambio con rapporto 30:1 = 0.9;
- η del generatore sincrono a 20 poli 400V/800V per 2.5 kW di potenza: 0.85;
- η del generatore sincrono a 20 poli 600V/1200V per 15 kW di potenza: 0.95.
- η del regolatore per 2.5 kW di potenza (che elimina armoniche a 100Hz): 0.95;
- η dell'inverter per 2.5 kW di potenza: 0.9;
- η dell'inverter per 15 kW di potenza: 0.95.

Il rendimento elettrico complessivo risulta anche in questo caso praticamente indipendente dalla velocità della girante e si ha:

- η_{el} complessivo a potenza 2,5kW: 0.6214;
- η_{el} complessivo a potenza 15kW: 0.7716.

Conversione indiretta, generatore asincrono

La macchina elettrica impiegata è analoga al generatore sincrono, ma con un minore rendimento dovuto. Lo schema a blocchi del sistema è analogo a quello riportato in figura II.16 per il caso del generatore sincrono.

Si hanno i seguenti valori di rendimento per le componenti del sistema:

- η del giunto = 0.95;
- η del cambio con rapporto 30:1 = 0.9;
- η del generatore asincrono a 20 poli 400V/800V per 2.5 kW di potenza: 0.8;
- η del generatore sincrono a 20 poli 600V/1200V per 15 kW di potenza: 0.9.
- η del regolatore per 2.5 kW di potenza (che elimina armoniche a 100Hz): 0.95;
- η dell'inverter per 2.5 kW di potenza: 0.9;
- η dell'inverter per 15 kW di potenza: 0.95.

Il rendimento elettrico complessivo risulta anche in questo caso praticamente indipendente dalla velocità della girante e si ha:

- η_{el} complessivo a potenza 2,5kW: 0.5848;
- η_{el} complessivo a potenza 15kW: 0.731.

PARTE TERZA

CONFIGURAZIONE DEGLI IMPIANTI

E

VALUTAZIONI CONCLUSIVE

6. Configurazione degli impianti elettrici

6.1 Premessa

Sulla base dei risultati della caratterizzazione idraulica discussa nella Parte II, si osserva in entrambi gli impianti una significativa differenza fra la potenza massima e minima disponibile all'asse della ruota idraulica. In ogni modo, il dimensionamento delle macchine e dei convertitori deve essere comunque fatto sulla potenza massima. Il fatto di avere dei periodi in cui le macchine e i convertitori funzionano a potenza ridotta, riduce il rendimento di conversione totale.

Partendo dall'asse della ruota idraulica si presenta il problema di inserire un dispositivo meccanico che dovrebbe primariamente assolvere al compito di poter collegare, in modo da superare problemi di disassamento e vibrazione, il sistema elettromeccanico di generazione elettrica a valle del medesimo. E' da evidenziare che anche questo dispositivo ha un rendimento meccanico di trasmissione che abbasserà ulteriormente la potenza disponibile per la trasformazione elettromeccanica.

Per mantenere la funzionalità originaria risulta necessario introdurre un dispositivo di accoppiamento che comprenda la funzione di separare la sorgente meccanica dal sistema di generazione elettrica.

Le giranti dei mulini presentano una velocità di rotazione variabile da 0 a 10 giri al minuto. Questa velocità è di 2 ordini di grandezza più bassa della tipica velocità per cui sono usualmente progettati i generatori elettrici. Per minimizzare il moltiplicatore di giri risulta indispensabile l'impiego di generatori a molti poli. Con 20 poli la velocità di sincronismo è 300 giri al minuto ed un rapporto 30:1 è commercialmente disponibile.

Per quanto riguarda la connessione alla rete elettrica, i due casi si distinguono per taglia di potenza. In particolare, il primo caso riguarda una macchina di 2 kW di potenza che può essere inserita in una rete monofase, mentre il secondo caso riguarda una macchina con più di 6 kW di potenza che deve essere necessariamente inserita in una rete trifase per prescrizione del gestore della rete.

6.2 Analisi degli impianti

Sistema di generazione elettrica adottato

Al di là delle differenze di taglia, le tipologie dei due siti di Pieranica e Romanengo si presentano simili: in entrambi i casi, l'unica soluzione perseguibile consiste nel mantenimento in opera delle due ruote idrauliche esistenti. Tuttavia, in assenza di una curva caratteristica coppia-velocità misurata sulle ruote idrauliche dei due mulini, non è possibile procedere ai calcoli e alle simulazioni indispensabili per la stima ingegneristica dei rendimenti delle diverse configurazioni.

Dalle considerazioni svolte precedentemente è però possibile stabilire che i due sistemi di conversione che possono essere presi in considerazione in alternativa sono quelli che presentano i massimi rendimenti complessivi, ovvero:

- quello asincrono tradizionale collegato alla rete, per cui si ha un rendimento di 0.68 per una potenza di 2.5 kW e di 0.77 per una potenza di 15 kW;
- quello sincrono con inverter, per cui si ha un rendimento di 0.62 per una potenza di 2.5 kW e di 0.77 una per potenza di 15 kW.

Considerata l'impossibilità di regolare la velocità di rotazione e, quindi, nell'aspettativa di osservare valori di scorrimento molto elevati, è però improbabile che il sistema asincrono tradizionale possa rivelarsi competitivo con la macchina sincrona assistita da raddrizzatore ed inverter, in quanto in presenza di elevati scorrimenti i rendimenti della macchina asincrona si riducono drasticamente.

Di conseguenza, per la riconversione idroelettrica dei siti di Pieranica e Romanengo si consiglia l'adozione di un sistema di conversione indiretta con macchina sincrona e inverter, come descritto al paragrafo 3.2.2. della Parte II.

Si nota inoltre che la tipologia del sistema elettrico proposto presenta una completa similitudine con quella adottata per gli impianti mini-eolici: di conseguenza, tutte le misure di sicurezza impiegate in questi impianti possono essere mutate per gli impianti in esame.

Ci si attende infine che la curva di coppia-velocità di rotazione della girante sia tale da presentare un picco di potenza instabile: per questa ragione è da considerare l'impiego di un algoritmo di inseguimento del punto di massima potenza.

Nel caso del Mulino Razzica, inoltre, per mantenere l'operatività della macina in essere è necessario introdurre un opportuno innesto meccanico per operare la linea di ingranaggi della macina.

Rendimenti complessivi degli impianti idroelettrici

Il rendimento complessivo degli impianti mini-idroelettrici installabili nei siti selezionati è ottenuto moltiplicando il rendimento idraulico η_{idr} (stimato al paragrafo 2 della Parte II) per il rendimento elettrico complessivo η_{el} (stimato, per il sistema di conversione indiretta con macchina sincrona adottato, al paragrafo 3.2.2. della Parte II).

Per il mulino Pieranica si ottengono i seguenti valori:

- rendimento della ruota idraulica: $\eta_{idr} = 0.53$;
- rendimento della conversione elettrica con macchina sincrona da 2.5 kW: $\eta_{el} = 0.6214$, indipendente dalla velocità della girante;
- rendimento complessivo dell'impianto: $\eta = 0.3293$.

Per il mulino Razzica si ottengono invece i seguenti valori:

- rendimento della ruota idraulica: $\eta_{idr} = 0.55$;
- rendimento della conversione elettrica con macchina sincrona da 15 kW: $\eta_{el} = 0.7716$, indipendente dalla velocità della girante;
- rendimento complessivo dell'impianto: $\eta = 0.4244$.

6.3 Valutazioni economiche

Valutazione dei costi dell'impianto elettro-meccanico

Fondamentalmente a causa della bassa velocità di rotazione della girante, è necessario considerare generatori con un numero di poli elevato per una taglia relativamente piccola: in particolare, una macchina sincrona o asincrona a 20 poli da 2,5kW va considerata una macchina speciale.

La componentistica elettronica di conversione non presenta particolari necessità e può probabilmente essere mutuata dagli impianti mini-eolici, eventualmente con modifiche di software. A nostra conoscenza non vengono però utilizzati inseguitori di punto di massima potenza nell'ambito dell'eolico.

La scelta di una soluzione sulla base delle indicazioni sopra riportate, va comunque validata anche da uno studio di stabilità del sistema al fine di definire i necessari dispositivi di regolazione nonché di protezione.

A causa della natura pseudo-prototipale dei casi in oggetto, non è quindi possibile fornire una stima precisa dei costi né dei generatori né dei convertitori: deve essere comunque considerato un investimento complessivo di diverse migliaia di euro; indicativamente, si può assumere un costo compreso tra € 5,000 e € 8,000.

Una scatola cambio di rapporto 30:1 per coppia da 13000Nm relativa alla macchina da 15kW può essere commercialmente reperibile ad un costo tra € 1,000 e € 2,000.

Una scatola cambio 30 di rapporto:1 per coppia da 2300Nm relativa alla macchina da 2,5kW può essere commercialmente reperibile ad un costo inferiore a € 1,000.

I componenti meccanici customizzati per ospitare il giunto cardanico ed il generatore possono essere valutati indicativamente in € 1,000.

Anche il costo del giunto di innesto per il ripristino del movimento della macina, necessario nel caso del Mulino Razzica, può essere stimato indicativamente in € 1,000.

Il costo delle opere di cantieristica per la posa ed i collaudi può essere stimato complessivamente in una cifra inferiore a € 2,000.

Ciò porta a stimare i costi dell'impianto elettromeccanico, in primissima approssimazione, in € 9,000 – 12,000 per la riconversione della ruota idraulica del mulino di Pieranica e in € 10,000 – 14,000 per la riconversione della ruota idraulica del Mulino Razzica.

Si deve inoltre far notare che, ai costi dell'impianto elettro-meccanico, devono essere aggiunti i costi delle opere civili idrauliche e delle paratoie automatiche di sicurezza, che non sono oggetto del presente studio, ma che possono non essere trascurabili specialmente nel caso del mulino di Pieranica, dove è necessario ripristinare il canale di adduzione alla ruota idraulica, oggi cementato.

Stima della producibilità elettrica

La producibilità elettrica annua degli impianti preventivati è ottenuta integrando su un periodo di un anno la potenza istantanea erogata dall'impianto.

Dato che, con il sistema di conversione elettrica proposto, si ottiene un rendimento indipendente dalla velocità della girante e, quindi, dalla portata, l'energia prodotta risulta:

$$E = \int_{t=0}^{\text{1anno}} W(t) dt = \int_{t=0}^{\text{1anno}} \rho g \eta Q(t) \Delta H dt = \rho g \eta \Delta H \int_{t=0}^{\text{1anno}} Q(t) dt = \rho g \eta \Delta H \mathcal{V}$$

dove \mathcal{V} è il volume totale annuo disponibile alla sezione dell'impianto, calcolato ai paragrafi 1.2.2. e 1.3.2. della Parte II. Si ottengono quindi le seguenti stime per la producibilità elettrica annua dei due impianti:

Mulino di Pieranica

- potenza massima ottenibile: $W = 2.14 \text{ kW}$

- rendimento: $\eta = 0.3293$
- salto utile: $\Delta H = 0.83$
- volume totale annuo disponibile: $V = 20657715 \text{ m}^3$
- produzione elettrica annua stimata: $E = 15.37 \text{ MWh}$

Mulino Razzica, Romanengo

- potenza massima ottenibile: $W = 9.72 \text{ kW}$
- rendimento: $\eta = 0.4244$
- salto utile: $\Delta H = 2.05$
- volume totale annuo disponibile: $V = 25765038 \text{ m}^3$
- produzione elettrica annua stimata: $E = 61.02 \text{ MWh}$

6.4 Osservazioni conclusive

La presente relazione presenta uno studio sulla possibilità di riconvertire ad uso idroelettrico due salti idraulici, utilizzati da mulini per la macinazione, siti nel territorio della Provincia di Cremona.

I due salti sono situati rispettivamente nel comune di Pieranica, lungo il fontanile Capri, e nel comune di Romanengo, in corrispondenza del Mulino Razzica lungo la roggia Marinona.

E' stato eseguito uno studio preliminare idraulico-idrologico per caratterizzare il regime delle portate nei due salti ed è stata effettuata una valutazione sulla tipologia di sistema di conversione elettrica da adottare, in modo da massimizzare i rendimenti ottenibili in relazione alla variabilità delle portate in arrivo.

Data la bassa producibilità elettrica già preventivabile in fase di impostazione dello studio, si è ritenuto di studiare una tipologia di impianto che prevedesse la riconversione delle ruote idrauliche esistenti invece di ipotizzarne la sostituzione con macchine idrauliche più efficienti.

Operata questa scelta preliminare, si ritiene che la tipologia di sistema di conversione elettrica che è in grado di massimizzare i rendimenti ottenibili sia quella di conversione indiretta con macchina sincrona e inverter.

I risultati presentati hanno però valore indicativo, in quanto necessitano di una validazione ed integrazione incompatibili con la tempistica di esecuzione del presente studio, così come prevista dal bando.

In particolare, ad avviso degli scriventi, sarà necessario in futuro:

- integrare lo studio idrologico per la definizione del regime delle portate con un monitoraggio dei corsi d'acqua interessati di durata almeno annuale, con il quale ridurre il

marginale di incertezza legato alle numerose ipotesi semplificative assunte come base delle elaborazioni qui presentate;

- effettuare una caratterizzazione meccanica delle ruote idrauliche esistenti, sottoponendole a coppie resistenti note in modo da ricavare sperimentalmente le curve coppia-velocità di rotazione necessarie a completare la definizione dell'impianto elettrico.

7 BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI SU WEB

- [1] *Censimento dei salti utili per lo sfruttamento idroelettrico nella zona-studio del progetto S.M.A.R.T.*, 2009, Priscila Escobar Rojo; Marco Mancini – DIIAR Politecnico di Milano. Reperibile alla pagina:
http://www.smarthydro.eu/resource/deliverables/cr_2009_ranking_microhydro_sites_cremona.pdf
- [2] *I fontanili della Provincia di Cremona*, 2005, Giovanni D’Auria; Franco Zavagno - Provincia di Cremona, Settore Ambiente
- [3] *Metodi irrigui*, U.R.B.I.M. Lombardia unione regionale Bonifiche Irrigazioni e Miglioramenti fondiari. Reperibile alla pagina:
http://www.urbimlombardia.it/sistemi_irrigazione.htm
- [4] Bear, J. *Hydraulics of groundwater*, 1979, McGraw-Hill, N.York
- [5] *Idraulica delle acque di falda*, 1994, Guido Chiesa - Dario Flaccovio Editore
- [6] *Acque sotterranee in Lombardia, gestione sostenibile di una risorsa strategica*, giugno 2001, Regione Lombardia – Risorse idriche e Servizi di pubblica utilità
- [7] *Geologia degli Acquiferi della Regione Lombardia : relazione tecnica*, 2002, Cipriano Carcano; Andrea Piccin . - Firenze : S.E.L.C.A
- [8] *Piano di Governo del territorio: Studio geologico del territorio comunale, relazione geologica di piano*, maggio 2009, Comune di Pandino (CR) – Geol. Giovanni Bassi
- [9] *Idrologia tecnica*, 1998, Ugo Moiselto – La goliardica pavese
- [10] *Sfruttamento del Mini-Micro Idro sul Territorio Cremonese e Criticità Ricontrate*, 8 ottobre 2010, Priscila Escobar Rojo; Marco Mancini; Elia Grandini; Emiliano Ruggeri – Workshop S.M.A.R.T. Mini idroelettrico in europea: strumenti e idee per ridurre le barriere non tecnologiche
- [11] *Ricerca sui consumi irrigui e le tecniche di irrigazione in Lombardia*, 2003, Università degli Studi di Milano-Istituto di idraulica agraria
- [12] <http://www.addaconsorzio.it/Oglio>
- [13] *Servizio meteorologico regionale - Arpa Lombardia*, Archivio dati meteorologici. Disponibile al sito <http://www.arpalombardia.it/meteo/dati/riciesta.asp>
- [14] *Geoportale della Lombardia - Regione Lombardia*. Disponibile al sito <http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale/ptk>