



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
E DELL'INFORMAZIONE

EXECUTIVE SUMMARY OF THE THESIS

## Modellistica e controllo dell'irrigazione in risaia

LAUREA MAGISTRALE IN AUTOMATION AND CONTROL ENGINEERING -  
INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE

Author: GIOVANNI ZOFFOLI

Advisor: PROF. GIANNI FERRETTI

Co-advisors: PROF. DANIELE MASSERONI, ING. FABIOLA GANGI

Academic year: 2022-23

### 1. Introduzione

In Europa, l'Italia contribuisce alla metà della produzione di riso in un'area concentrata principalmente in Lombardia e Piemonte. Il metodo convenzionale di coltivazione del riso prevede di mantenere i campi allagati dalla semina al raccolto, il che richiede una grande quantità di lavoro manuale da parte degli agricoltori per mantenere un livello d'acqua costante [1]. Inoltre, a causa dei cambiamenti climatici che stanno influenzando la disponibilità di risorse idriche per l'agricoltura del riso, diventa sempre più importante trovare soluzioni per aumentare la flessibilità nella gestione dell'irrigazione. L'obiettivo è migliorare l'efficienza nell'uso dell'acqua nel settore risicolo, adattando gli apporti idrici alle effettive esigenze delle colture.

In risposta a questa sfida, il seguente studio presenterà la creazione di un ambiente per la simulazione e il controllo dell'irrigazione nelle risaie. Il lavoro è diviso in due parti principali: in primo luogo, verrà sviluppata una libreria per la modellazione delle risaie nell'ambiente di simulazione Modelica, che consente di ricreare e simulare la dinamica di qualsiasi configurazione di risaia. In secondo luogo verranno confrontati due tipi di controllo per la gestione del flusso attraverso

le valvole automatiche: un controllo decentralizzato con regolatori PI e un tipo di controllo centralizzato Model Predictive Control (MPC). Entrambi i sistemi di controllo saranno testati su un modello che rappresenta una specifica risaia a sud di Milano.

### 2. Materiali e Metodi

#### 2.1. Libreria Risaia

La libreria è stata sviluppata in Modelica [2], un linguaggio orientato agli oggetti, a-causale e multi-dominio, che ha consentito la modellazione di tutti gli elementi che compongono la risaia e ne influenzano la dinamica. Lo sviluppo di una libreria in Modelica inizia generalmente definendo i connettori (**fluxport**), quindi costruendo i componenti e infine creando le istanze necessarie di questi componenti e interconnettendoli in modo appropriato. I componenti della risaia sono interconnessi attraverso un connettore **fluxport**. Esso è definito come:

```
partial connector fluxport
  SI.AbsolutePressure p;
  flow SI.MassFlowRate w;
end fluxport;
```

dove  $w$  è la portata massica dell'acqua nel connettore e  $p$  è la pressione dell'acqua.

### 2.1.1 Campi e canale

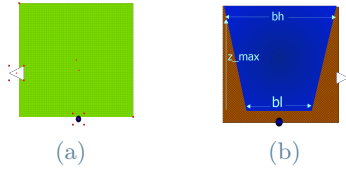


Figura 1: Icone del campo e del canale

Innanzitutto sono stati modellati i componenti principali, come i campi e i canali (Fig. 1). Questi rappresentano gli elementi di contenimento dell'acqua il cui bilancio idrico è determinato da vari fattori, come illustrato nella Figura 2. La pressione al connettore di uscita è data da:

$$p(t) = \rho g z(t) + p_{atm}, \quad (1)$$

dove  $p(t)$  è la pressione che coincide con quella del connettore `fluxport`,  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $z(t)$  è il livello all'interno del campo, e  $p_{atm}$  è la pressione atmosferica. L'equazione del campo è la seguente:

$$\rho A \dot{z}(t) = -c A z(t) + w_{in}(t) - w_{ET}(t) + w_{ER}(t), \quad (2)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $A$  è l'area del campo,  $\dot{z}(t)$  è la derivata del tirante idrico rispetto al tempo,  $c$  rappresenta il coefficiente di infiltrazione idrica del terreno,  $w_{in}$  è la portata in ingresso dal connettore `fluxport`,  $w_{ET}(t)$  è la portata di evapotraspirazione e  $w_{ER}(t)$  è la portata della precipitazione netta sull'area di campo.

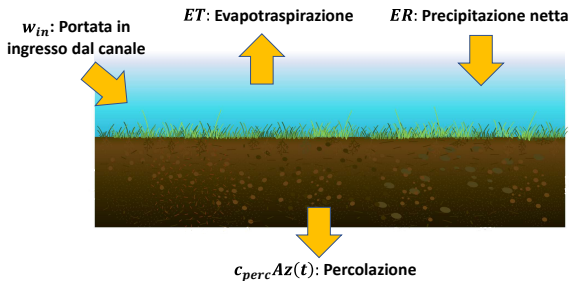


Figura 2: Bilancio idrico

In merito all'equazione che governa la dinamica del canale, il bilancio idrico è simile, ma possono esserci differenze legate alle geometrie del canale rispetto al campo e alla possibile omissione degli effetti dell'evapotraspirazione.

### 2.1.2 Porte a luce battente

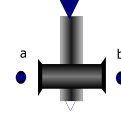


Figura 3: Icona della porta a luce battente

Successivamente sono state modellate le valvole (Fig. 3), che sono porte a luce battente attraverso le quali viene controllato il flusso dell'acqua per il riempimento del campo. Esse seguono la seguente equazione:

$$w(t) = \rho C_c A_V(t) \sqrt{2gh(t)}; \quad (3)$$

dove  $w(t)$  è la portata che passa attraverso la valvola,  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $C_c$  è il coefficiente di costrizione che dipende dalle geometrie della valvola,  $A_V(t)$  è l'area di apertura della valvola,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $h(t)$  è il carico idrico. Attraverso un segnale che varia tra 0 e 1 in ingresso nella relativa interfaccia `Real_Input` viene aperta o chiusa la corrispondente valvola, aumentando e diminuendo la portata passante per la valvola stessa.

### 2.1.3 Porte a stramazzo



Figura 4: Icona della porta a stramazzo

Sono state modellate le porte a stramazzo (Fig. 4) per gestire il flusso d'acqua in eccesso, la cui dinamica è imposta dall'equazione:

$$w_a(t) = \mu \rho L \sqrt{2g} h_a(t)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

dove  $w_a(t)$  è la portata in ingresso al connettore `fluxport_a`,  $\mu$  è il coefficiente di efflusso,  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $L$  è la larghezza della porta a stramazzo,  $h_a$  è il carico sullo stramazzo, ovvero il dislivello tra la superficie a pelo libero a monte ed il bordo superiore dello stramazzo.

### 2.1.4 Altri elementi

Sono stati anche modellizzati altri elementi necessari per convertire i valori nelle unità di misura corrette. Infine, è stata utilizzata la libreria Modelica "External Data" [3], che fornisce

funzionalità per la lettura e la scrittura di dati da e verso file esterni. Questo è stato utile per integrare gli effetti delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione, in quanto i dati relativi sono stati raccolti in file Excel a intervalli di tempo orari. Tramite le funzioni della suddetta libreria e i blocchi `CombiTimeTable` di Modelica è possibile includere nella simulazione le portate dovute alle piogge e all'evapotraspirazione, i cui dati sono poi utilizzati all'interno delle equazioni dei vari componenti attraverso l'utilizzo di blocchi inner/outer.

## 2.2. Sito sperimentale

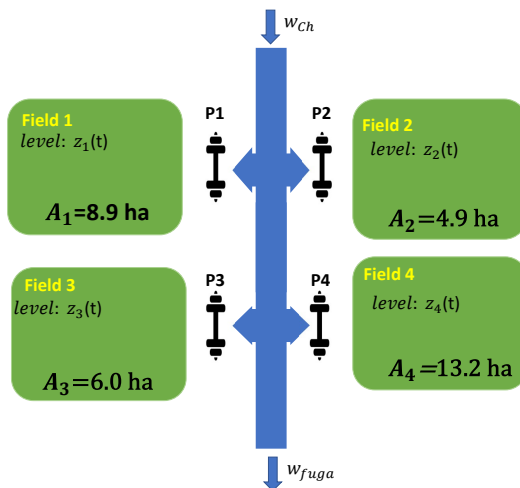


Figura 5: schema del sito sperimentale

Il schema in Figura 5 rappresenta il modello di simulazione utilizzato per i test della libreria e dei sistemi di controllo replica fedelmente un caso di studio reale, la Cascina Ca'Granda Milano, situata nella regione sud di Milano, in cui sono state installate valvole automatizzate PikoMeter™[4] per la regolazione dei flussi e sensori Ferit™ per il monitoraggio dei flussi e dei livelli.

Attraverso le misurazioni delle portate circolanti nell'azienda risicola e dei livelli nelle camere di risaia è stata effettuata una calibrazione dei parametri dei modelli utilizzati. In particolare è stato ricavato il coefficiente di percolazione confrontando i valori misurati con quelli del modello come si vede in Figura 6.

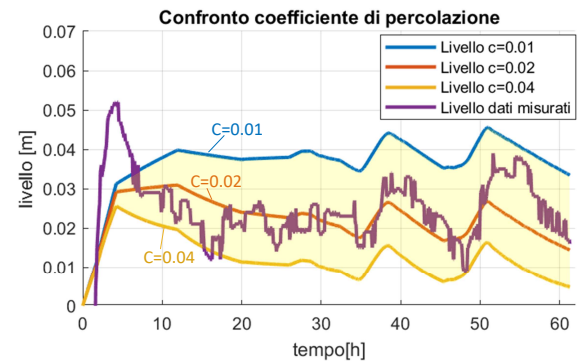


Figura 6: Confronto tra l'andamento del livello misurato (viola) e il livello simulato con diversi coefficiente di percolazione:  $c=0.01$  (blu),  $c=0.02$  (rosso),  $c=0.04$  (Giallo)

Il modello è composto da quattro campi (A1, A2, A3, A4), che coprono un'area compresa tra 5 e 13 ettari, collegati da un canale di irrigazione. Il flusso d'acqua del canale d'irrigazione è alimentato a monte da un flusso non regolato da un sistema di controllo ( $w_{ch}$ ), e presenta una paratoia dedicata per il deflusso di acqua in eccesso ( $w_{fuga}$ ).

## 2.3. Controllo

Sotto l'ipotesi che il controllo venga attivato una volta che i campi sono stati riempiti, trascurando quindi la fase iniziale di riempimento delle varie camere di risaia, sono stati sviluppati due tipologie di controllo: un controllo decentralizzato e un controllo centralizzato.

**Controllo Decentralizzato** Il controllo decentralizzato è stato sviluppato utilizzando le interfacce di controllo già presenti nella libreria standard di Modelica, in particolare attraverso l'uso di controllori Proporzionali-Integrali (PI). Questo tipo di approccio considera gli attuatori, cioè le valvole, in modo indipendente e, in base all'errore tra il livello attuale di ogni campo e un livello di riferimento, ogni controllore agisce sulla valvola corrispondente aprendo e chiudendo il flusso di acqua dal canale al campo. Poiché in questo caso gli attuatori sono valvole e l'azione di controllo coincide con un valore tra 0 e 1 che rappresenta il grado di apertura e chiusura della valvola, il controllore PI è stato implementato con un'azione anti Wind-Up (Fig. 7).

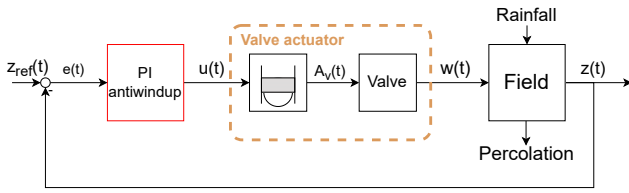


Figura 7: Schema di controllo Decentralizzato con regolatori PI

**Controllo Centralizzato** Il controllo centralizzato, invece, è stato sviluppato utilizzando i software Matlab e Simulink, oltre a Modelica. A differenza del controllo decentralizzato, tiene conto di tutti gli stati della risaia, gestendo tutti gli attuatori del sistema in maniera coordinata. Per realizzarlo, è stata utilizzata una logica di controllo ottimo predittivo, in particolare il Non-linear Model Predictive Control (NMPC), che trasforma il problema di controllo in un problema di ottimizzazione vincolata. Questo è stato testato sul modello di simulazione costruito in Modelica ed esportato in Simulink come modello FMU. Analogamente al controllo decentralizzato, l'obiettivo principale del controllo centralizzato è quello di minimizzare l'errore tra un livello di riferimento e lo stato attuale. Per raggiungere questo obiettivo, è stata definita una funzione di costo con i relativi vincoli. Questa (5) è costituita da due contributi principali: uno sull'errore tra gli stati e il set-point e uno sugli ingressi al fine di dare un peso anche sull'utilizzo dell'acqua del canale.

$$\min_U \sum_{i=0}^{N_p} \|z^{ref}(i|k) - z(i|k)\|_2^2 + \alpha \|u(i|k)\|_2^2; \quad (5)$$

- $k$ : istante di tempo in cui viene calcolato il problema di controllo ottimo;
- $N_p$ : Orizzonte di previsione del problema di ottimizzazione;
- $\alpha$ : Coefficiente di regolarizzazione per penalizzare il contributo sull'ingresso;
- $z^{ref}(i|k)$ : Vettore del livello di set-point all'istante simulato  $i$ ;
- $z(i|k)$ : Vettore del livello di stato del campo all'istante simulato  $i$ ;
- $u(i|k)$ : vettore di ingressi all'istante simulato  $i$ ;

Successivamente sono stati stabiliti dei vincoli basati sui limiti fisici imposti dal sistema, ossia i valori massimi e minimi che gli stati e gli input possono raggiungere, oltre al vincolo di uguaglianza imposto dalla sua dinamica. Inoltre, sono stati inclusi dei vincoli per le presta-

zioni di controllo che servono a mantenere livelli uniformi nelle risaie.

La differenza chiave sta nella capacità del controllo centralizzato di simulare internamente le dinamiche future del sistema. Per fare questo, è stata costruita una funzione Matlab (MatFun Model) come modello di simulazione per calcolare la traiettoria ottimale, simile al modello FMU che nel caso di simulazione in esame rappresenta il sistema reale da controllare. Prevedendo il comportamento del sistema entro un orizzonte temporale prefissato, il controllo centralizzato permette di scegliere l'azione di controllo ottimale da distribuire a tutte le valvole della risaia. Il problema di controllo ottimale viene risolto tramite il Sequential Quadratic Programming (SQP) [5], utilizzando la strategia Receding Horizon [6], che prevede di applicare solo la prima serie della sequenza di controllo ottimale trovata ad ogni iterazione. Inoltre, per ridurre il carico computazionale, è stata utilizzata la strategia Moving Block [7]. Nella Figura 8 è rappresentato lo schema MPC.

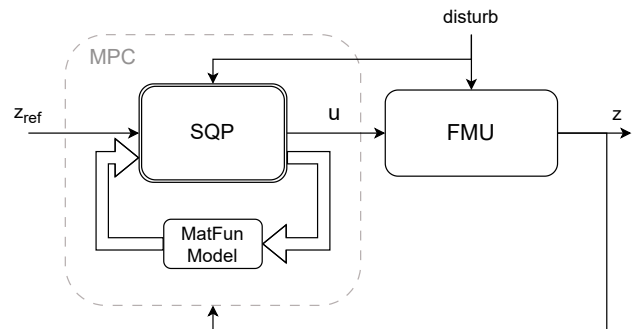


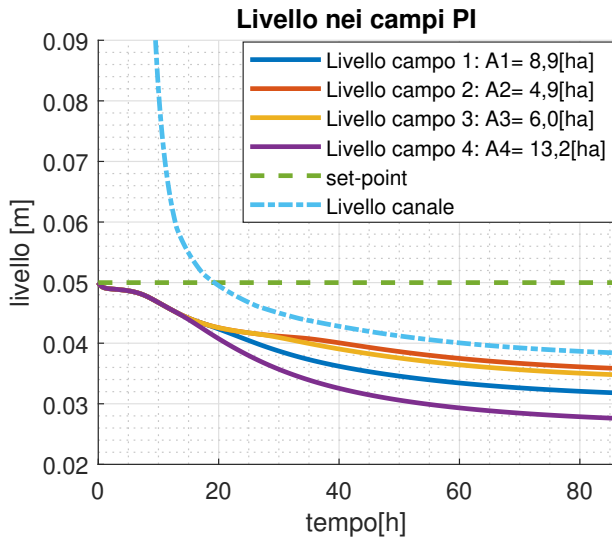
Figura 8: Schema del controllo centralizzato MPC

### 3. Risultati di simulazione

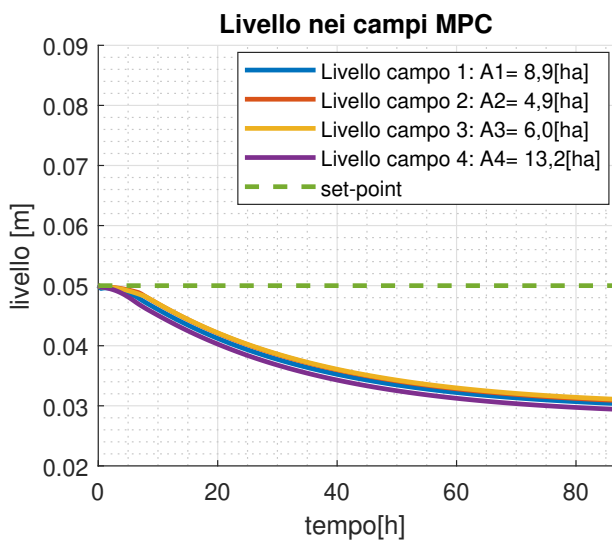
Una volta sviluppati i sistemi di controllo, sono stati testati su diversi scenari. In primo luogo, è stato verificato tramite test preliminari che i due sistemi di controllo fossero coerenti. Ciò significa che allo stato di regime, con una portata nominale di 200 litri al secondo che alimenta il canale, sufficiente a mantenere i livelli nei campi, l'azione di controllo coincide per entrambi i tipi di controllo.

**-Test 1: condizioni di carenza idrica** Dopo aver verificato che entrambi i sistemi di controllo funzionassero correttamente in condizioni

nominali, sono stati testati in condizioni di scarsità d'acqua. In particolare, in assenza di precipitazioni e imponendo una portata in ingresso al canale ridotta del 50% rispetto alla portata nominale (cioè 100 litri al secondo), sono stati eseguiti dei test su entrambi i tipi di controllo.



(a)

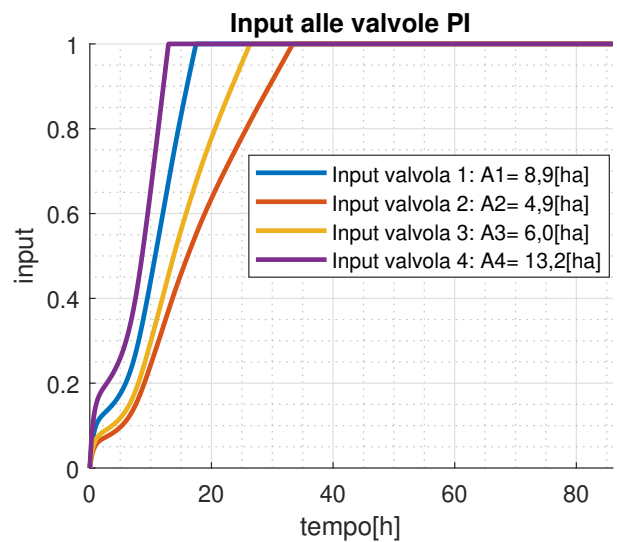


(b)

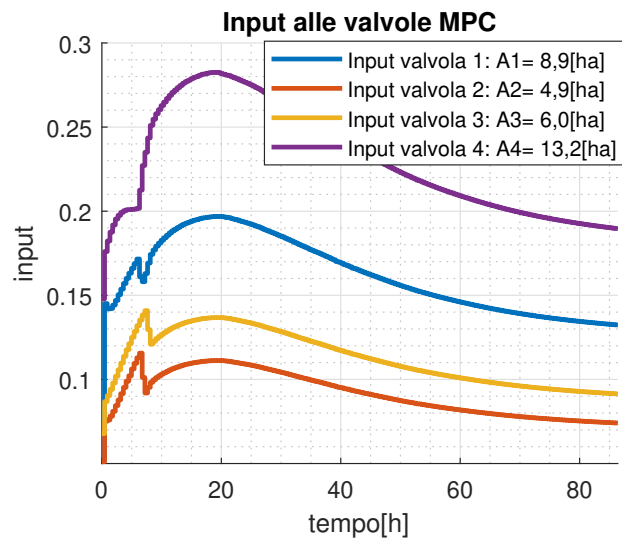
Figura 9: *Test 1*: Confronto livelli dei campi del **controllo decentralizzato PI** (a), rispetto al **controllo centralizzato MPC** (b).

Dalla Figura 9 si evince che in entrambi i casi il livello dei campi non raggiunge il livello di set-point. Tuttavia, con il sistema di controllo decentralizzato PI, i campi vengono riempiti in modo non uniforme poiché i regolatori PI aumentano il valore delle azioni di controllo fino a che non raggiungono il limite di saturazione,

questo porta a sfruttare quasi tutta l'acqua del canale, il cui livello raggiunge un valore di poco superiore rispetto a quello dei campi. Al contrario, nel caso del controllo centralizzato MPC, questo problema viene risolto vincolando che i livelli dei campi rimangano intorno a un valore che può essere raggiunto da tutti i campi (vedi Fig. 9 (b)). Infatti, l'azione di controllo viene adattata alla mancanza di portata nel canale. Questo significa che l'azione di controllo sarà più delicata al fine di mantenere i livelli omogenei, invece di raggiungere il livello di set-point (vedi Fig. 10 (b)).



(a)



(b)

Figura 10: *Test 1*: Confronto input alle valvole del **controllo decentralizzato PI** (a), rispetto al **controllo centralizzato MPC** (b).

### -Test 2: Caso di precipitazioni previste

L'obiettivo di questo test è di valutare come i sistemi di controllo si comportano quando viene introdotta una portata esterna nei campi e nel canale. In particolare le precipitazioni sono interessanti poiché la portata in ingresso può essere prevista con una certa precisione grazie alle previsioni meteorologiche. Si è scelto di analizzare un caso di precipitazione basato su dati reali raccolti durante la stagione 2021 in un'area geografica prossima alla risaia Ca'Granda Milano, durante il quale è stato raggiunto un picco di pioggia di 18 millimetri. In questo caso è stato ipotizzato una portata in ingresso al canale pari alle condizioni standard, ovvero di 200 litri al secondo, in modo da concentrarsi sugli effetti delle sole piogge.

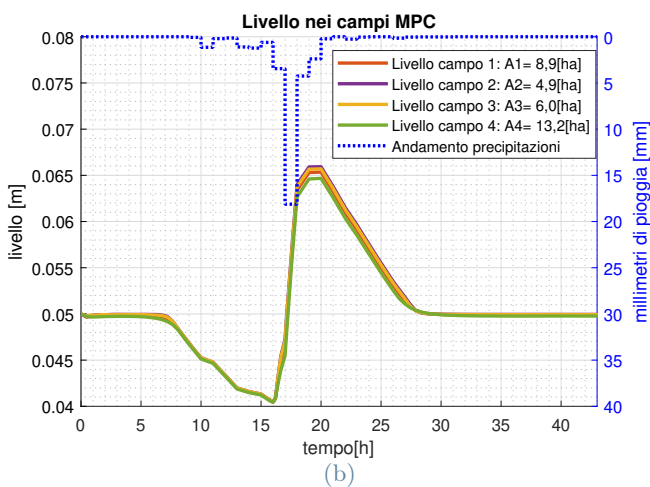
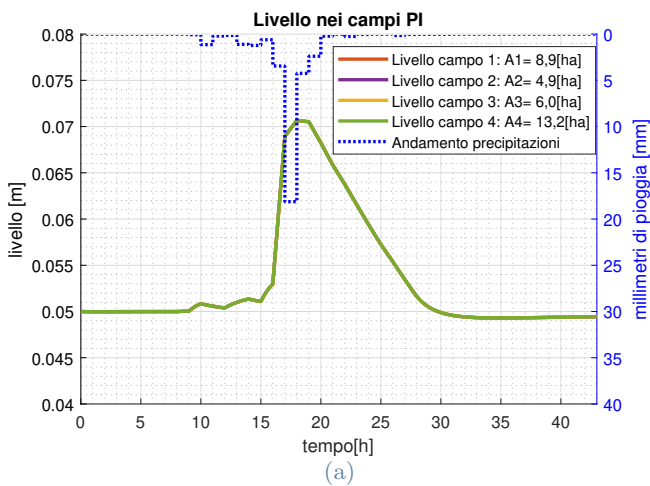


Figura 11: Test 2: Confronto livelli dei campi del controllo decentralizzato PI (a), rispetto al controllo centralizzato MPC (b).

Nel controllo decentralizzato (Fig. 11 (a)), le

valvole vengono chiuse solo dopo che il livello dell'acqua si è alzato a causa delle precipitazioni, provocando un innalzamento anomalo del livello che poi si riassetta grazie alla percolazione. Nel controllo centralizzato MPC, invece, l'azione di controllo è predittiva e anticipa l'innalzamento del livello dovuto alle precipitazioni, chiudendo le valvole in anticipo (Fig 12)(b) e permettendo alla portata dovuta alle precipitazioni di colmare i dislivelli causati dalla chiusura anticipata delle valvole (Fig 11)(b). L'azione di controllo minimizza l'errore quadratico medio tra i livelli e il valore di set-point, ma come si vede presenta un picco poco prima delle precipitazioni a causa della limitazione dell'orizzonte di predizione a 20 ore. Si ritiene che potrebbero migliorare le performance del controllo agendo sui parametri del MPC.

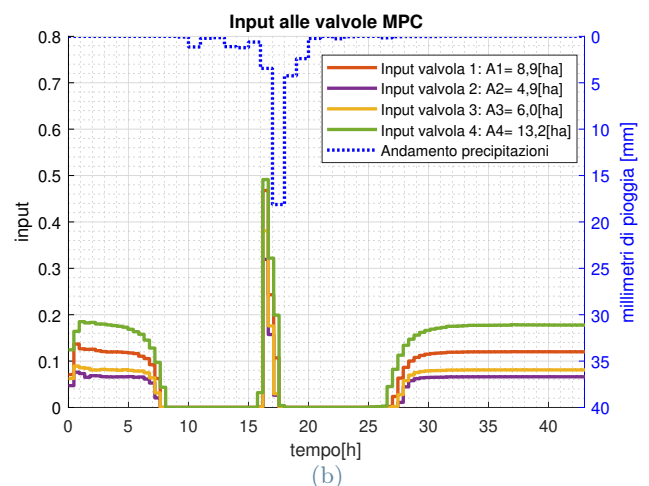
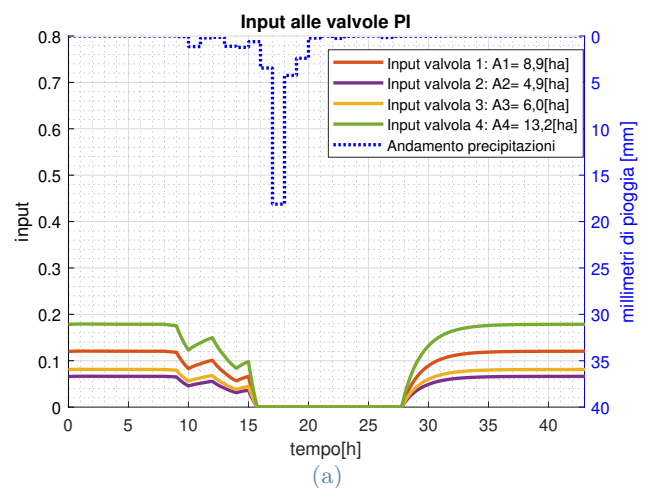


Figura 12: Test 2: Confronto input alle valvole del controllo decentralizzato PI (a), rispetto al controllo centralizzato MPC (b).

Integrando i dati delle portate d'acqua, si è visto che l'utilizzo del controllo centralizzato MPC porta a un risparmio dell'acqua del 7,8% rispetto al controllo decentralizzato, nonostante la presenza del picco correlato all'apertura delle valvole del controllo MPC a ridosso delle precipitazioni. Si ritiene che migliorando le caratteristiche del controllo MPC, sia possibile raggiungere performance ancora migliori e un risparmio di acqua ancora più significativo.

## 4. Conclusioni

La ricerca ha dimostrato che l'utilizzo di sistemi di controllo dell'acqua in risaia può essere molto efficace per garantire un livello idrico costante. Nel caso in cui sia presente una limitazione di disponibilità idrica, l'adozione del sistema MPC è risultata essere la migliore scelta in quanto ha minimizzato le differenze tra i livelli nelle diverse camere. L'ultimo test ha dimostrato che l'adozione di un controllo MPC ha permesso di utilizzare l'intera aliquota di portata meteorica e di ridurre la portata utilizzata di quasi il 10% rispetto al controllo decentralizzato. In conclusione, l'uso di sistemi automatici di regolazione dell'acqua in risaia può migliorare l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua, riducendo il fabbisogno di manodopera e aumentando la sostenibilità degli adacquamenti.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Daniele Masseroni, Peter Moller, Reece Tyrell, Marco Romani, Alberto Lasagna, Guido Sali, Arianna Facchi, and Claudio Gandolfi. Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in europe. *Agricultural Water Management*, 201, 2018.
- [2] Dr. Michael M. Tiller. Modelica by example, 2019.
- [3] Thomas Beutlich and Dietmar Winkler. Efficient Parameterization of Modelica Models. Number 181, pages 141–146. Modelica Association and Linköping University Electronic Press, 2021.
- [4] Rubicon Water. Rubicon pikometer data sheet (english mld), 2021.
- [5] Lorenzo Fagiano. Constrained numerical optimization for estimation and control. Lecture Notes, 10 2021. Course 052358 - M.Sc.

Programme in Automation and Control Engineering.

- [6] Jacob Mattingley, Yang Wang, and Stephen Boyd. Receding horizon control. *IEEE Control Systems Magazine*, 31, 2011.
- [7] Sang Hwan Son, Tae Hoon Oh, Jong Woo Kim, and Jong Min Lee. Move blocked model predictive control with improved optimality using semi-explicit approach for applying time-varying blocking structure. *Journal of Process Control*, 92, 2020.