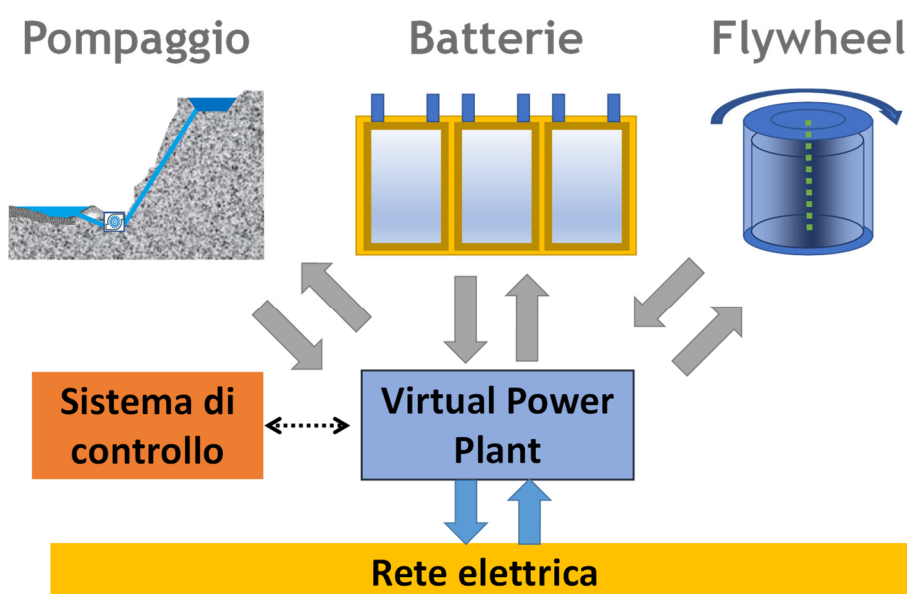


## Modello dinamico ottimizzato del pompaggio ibrido con batterie e flywheel

### MANUALE D'USO DELL'ESEGUIBILE



**Dicembre 2021**

Progetto 2.2 “Modelli di architettura e di gestione del sistema e delle reti elettriche e della regolazione che favoriscano l'integrazione di generazione rinnovabile e non programmabile, autoproduzione, accumuli, comunità dell'energia e aggregatori e che tengano conto della penetrazione elettrica” / WP2 “Risorse di flessibilità”

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale

J. Alterach, S. Canevese, A. Gatti, M. Rapizza, G. Cavazzini (UniPD) e S. Casarin (UniPD)

## Indice

<b>INDICE</b> .....	<b>2</b>
<b>STORIA DELLE REVISIONI</b> .....	<b>3</b>
<b>SINTESI</b> .....	<b>3</b>
<b>SHORT SUMMARY</b> .....	<b>3</b>
<b>SOMMARIO</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>2 CONDIZIONI D'USO DEL SOFTWARE</b> .....	<b>7</b>
<b>3 MANUALE D'USO DELL'ESEGUIBILE</b> .....	<b>8</b>
3.1 Simulazione dell'impianto .....	8
3.1.1 <i>Power Plant Configuration</i> .....	9
3.1.2 <i>Grid 10</i> .....	
3.1.3 <i>Initial conditions</i> .....	10
3.1.4 <i>Control Parameters</i> .....	10
3.1.5 <i>File accessori</i> .....	11
3.1.6 <i>Simulazione</i> .....	14
3.2 Procedura di ottimizzazione .....	14
3.2.1 <i>File di input</i> .....	15
3.2.2 <i>File di output</i> .....	17
<b>4 BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>20</b>
<b>5 RICONOSCIMENTI</b> .....	<b>21</b>
<b>6 ACRONIMI</b> .....	<b>22</b>

## **STORIA DELLE REVISIONI**

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
00	31/12/2021	31/12/2021	Prima emissione

## **SINTESI**

Manuale utente degli eseguibili relativi ad un modello dinamico di impianto idroelettrico di pompaggio ibrido scalabile con batterie (BESS) e flywheel (FESS), per la fornitura di servizi di flessibilità al sistema elettrico (regolazione primaria e secondaria di frequenza). Una procedura identifica la configurazione ibrida ottima che massimizza il VAN (Valore Attuale Netto), tenendo conto dei costi e delle remunerazioni dei servizi.

## **SHORT SUMMARY**

User manual of the object program implementing a customizable model of a hybrid Pumped Storage Hydro Power (PSHP) plant with batteries (BESS) and flywheels (FESS), for the supply of flexibility services to the system (primary and secondary frequency regulation). A procedure identifies the optimal configuration that maximizes the NPV (Net Present Value), considering costs and revenues of the services.

## SOMMARIO

La transizione verso un sistema energetico “*carbon-free*” implicherà un uso sempre più massiccio di generazione da fonti rinnovabili non programmabili, con i relativi problemi di bilanciamento e di regolazione. In questo contesto, un ruolo importante può essere svolto dagli impianti di pompaggio idroelettrico, sia per l'elevata capacità di accumulo sia per la velocità di risposta, specialmente se opportunamente ibridati con tecnologie ultra-rapide.

Il presente rapporto illustra il manuale d'uso dell'eseguibile relativo ad un modello personalizzabile di simulazione e ottimizzazione, per analizzare la capacità di regolazione di un impianto di pompaggio ibrido e identificare la configurazione economicamente ottimale (in termini di parametri della strategia di controllo e di tecnologia e taglia dei componenti ibridanti). Il modello è in grado di simulare servizi di dispacciamento quali la regolazione primaria e secondaria di frequenza; nelle valutazioni economiche, è possibile tenere conto anche dell'eventuale fornitura di regolazione primaria ultra-rapida (assumendo come riferimento il progetto pilota TERNA di *Fast Reserve*).

Come caso di studio, si considera un potenziale impianto idroelettrico reversibile di pompaggio marino (*Pumped Storage Hydro Power* - PSHP), ipotizzato in Sardegna nella località di Foxi Murdegu (NU) e ibridato con sistemi di accumulo elettrochimico (*Battery Energy Storage System* - BESS) e *flywheel* (*Flywheel Energy Storage System* - FESS).

Il modello per la simulazione dinamica dell'impianto ibrido è corredato di curve caratteristiche generalizzate della pompa-turbina e di due strategie di controllo: *Frequency Split* e *Hydro Recharge*. Esso è completo, inoltre, in termini di insieme delle configurazioni: oltre al PSHP da solo, sono simulabili PSHP+FESS, PSHP+BESS e PSHP+BESS+FESS.

Partendo da un elenco di configurazioni di ibridazione candidate, si è sviluppata ed implementata una procedura di ottimizzazione articolata su due livelli: i) ottimizzazione dei parametri di controllo di ogni configurazione di ibridazione candidata, mediante un algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), e ii) scelta della configurazione ibridante che massimizza il *Net Present Value* (NPV).

A partire da questo codice sono risultati due eseguibili: uno, denominato “*Simulazione.exe*”, per la simulazione dell'impianto con o senza ibridazione (e con/senza l'integrazione in un modello di rete), mentre il secondo, denominato “*Ottimizzazione.exe*”, che effettua la procedura di ottimizzazione.

## ABSTRACT

The transition to a “carbon-free” energy system will involve an increasingly massive use of generation from non-programmable renewable sources, with the related balancing and regulation problems. In this context, an important role can be played by Pumped Storage Hydroelectric power plants, both for their high storage capacity and for their speed of response, especially if they are suitably hybridized with ultra-fast technologies.

This report illustrates the user manuals of the object program relating to a customizable simulation and optimization model, developed to analyze the regulation capacity of a hybrid pumped plant and to identify the economically optimal configuration (in terms of the parameters of the control strategy and of the technology and size of the hybridizing components). The model is able to simulate ancillary services such as the primary and secondary frequency regulation; in the economic assessment, it is possible to take into account also the ultra-fast primary regulation (by assuming as a reference the TERNA pilot project called *Fast Reserve*).

As a case study, a reversible seawater Pumped Storage Hydroelectric Plant (PSHP), ideally realized in Sardinia near Foxi Murdegu (Italy), and hybridized with electrochemical storage systems (*Battery Energy Storage System* - BESS) and with flywheels (*Flywheel Energy Storage System* - FESS), is considered.

The model for the dynamic simulation of the hybrid plant is equipped with generalized pump-turbine characteristic curves and with two different control strategies: *Frequency Split* and *Hydro Recharge*. The set of configurations is also complete: beside the PSHP itself, one can simulate PSHP + FESS, PSHP + BESS and PSHP + BESS + FESS.

Starting from a list of candidate hybridization configurations, an optimization procedure has been developed and implemented, divided into two levels: i) the optimization of the control parameters of each candidate hybridization configuration, using a Particle Swarm Optimization algorithm (PSO), and ii) the choice of the hybridization configuration which maximizes the Net Present Value (NPV).

Starting from this code, two object programs have resulted: one, called "Simulation.exe", for the simulation of the plant with or without hybridization (and with/without integration into a network model), while the second, called "Optimization .exe", which carries out the optimization procedure.

## 1 INTRODUZIONE

Il presente Rapporto è parte integrante della documentazione delle attività di Ricerca di Sistema previste dal “Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021” nell’ambito del progetto 2.2 “Modelli di architettura e di gestione del sistema e delle reti elettriche e della regolazione che favoriscano l'integrazione di generazione rinnovabile e non programmabile, autoproduzione, accumuli, comunità dell'energia e aggregatori e che tengano conto della penetrazione elettrica” / WP2 “Risorse di flessibilità” e costituisce Rapporto aggiuntivo del deliverable “Modello dinamico ottimizzato del pompaggio ibrido” della Linea di Attività 2.03 “Integrazione nella rete nazionale e ranking sistemi di pompaggio”.

La transizione verso un sistema energetico “*carbon-free*” comporterà negli anni a venire una penetrazione sempre più significativa della generazione da Fonti Rinnovabili Non Programmabili (FRNP), con conseguenti maggiori problemi nella gestione del bilanciamento tra potenza generata e utilizzata. Si prevede quindi che vi sarà una forte necessità di servizi di dispacciamento, in particolare per la regolazione della frequenza della rete. In tale contesto, un ruolo importante potrà essere svolto dagli impianti di pompaggio idroelettrico (*Pumped Storage Hydro Power - PSHP*), grazie sia alla loro elevata capacità di accumulo sia alla loro velocità di risposta. Queste caratteristiche potrebbero essere ulteriormente migliorate tramite un’ibridazione degli impianti di pompaggio stessi con tecnologie di accumulo ultrarapide, ad esempio sistemi di accumulo elettrochimico basati su batterie (*Battery Energy Storage System - BESS*) e sistemi di accumulo mediante volani (*Flywheel Energy Storage System - FESS*).

La ricerca sull’ibridazione di un impianto pompaggio idroelettrico (PSHP) con batterie (BESS) e flywheel (FESS), da cui sono risultati i deliverable della Ricerca di Sistema (RdS) della scorsa annualità (LA2.02) [1] e della presente annualità (LA2.03) [2], si è concretizzata in un codice sviluppato in ambiente MATLAB/Simulink®.

A partire da questo codice sono risultati due eseguibili, il cui uso è descritto nel capitolo 0, con particolare focus sugli *input* richiesti e sugli *output* generati. Il primo eseguibile, per la simulazione dell’impianto con o senza ibridazione (e con/senza l’integrazione in un modello di rete), è denominato “Simulazione.exe” e descritto nel paragrafo 3.1, mentre il secondo, denominato “Ottimizzazione.exe”, effettua la procedura di ottimizzazione presentata nel paragrafo 3.2. Entrambi gli eseguibili sono disponibili per Microsoft Windows e GNU/Linux. Il capitolo 2 illustra preliminarmente le condizioni d’uso del *file*.

Per concetti teorici, formule e metodi, si rimanda il lettore ai rapporti sopra citati.

## **2 CONDIZIONI D'USO DEL SOFTWARE**

Si rammenta che il *software* di simulazione di un impianto di pompaggio ibrido è distribuito per uso gratuito, nel rispetto delle “condizioni d’uso” accettate durante la registrazione on-line sul sito di RSE spa e fornite successivamente via e-mail.

Per comodità del lettore si fornisce una sintesi di tali “condizioni d’uso”:

- Il *software* è liberamente utilizzabile a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare in ogni pubblicazione, relazione e simili mezzi di divulgazione a mezzo stampa e tramite mezzi informatici. A tale fine si fornisce la citazione da riportare: “*Software realizzato da Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A e finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico in ottemperanza al Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 16 aprile 2018*”
- RSE mette a disposizione il *software* così com’è scaricato e/o fornito, senza alcuna garanzia, responsabilità, né supporto tecnico. RSE spa o la Ricerca di Sistema non possono essere ritenuti responsabili per danni diretti e indiretti, conseguenti all’uso del *software* o all’impossibilità di utilizzare il *software*.
- Il *software* è utilizzabile solo dal richiedente e non può essere ceduto a terzi, gratuitamente o dietro compenso, in nessuna forma, nemmeno parziale.
- Il *software* è composto da due eseguibili: “Simulazione.exe (Simulazione.sh)” e “Ottimizzazione.exe (Ottimizzazione.sh)”, disponibili per Microsoft Windows 10 e GNU/Linux.
- Sul dispositivo sul quale si intende eseguire i programmi stessi, deve essere installato “MATLAB Runtime”, versione 9.12 (R2022a) o superiore [3].

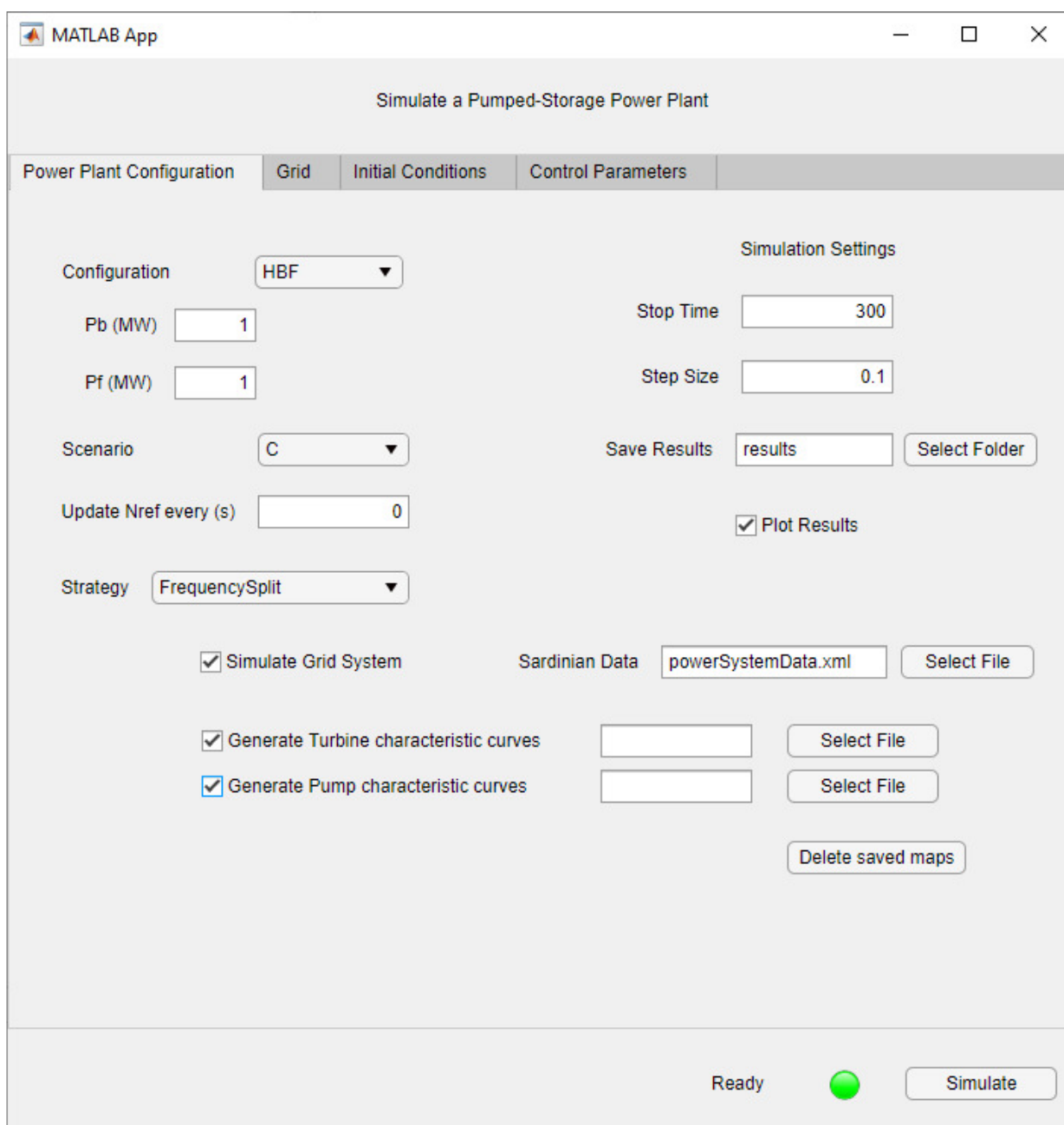
Il tempo di calcolo di ogni simulazione potrebbe andare da alcuni minuti fino a diversi giorni, in funzione del numero di configurazioni da simulare e della conformazione hardware del computer.

### 3 MANUALE D'USO DELL'ESEGUIBILE

Prima di descrivere gli eseguibili prodotti, è necessario ricordare che, sul dispositivo sul quale si intende eseguire i programmi stessi, sia installato "MATLAB Runtime", versione 9.12 (R2022a) o superiore [3].

#### 3.1 Simulazione dell'impianto

Lanciando l'esecuzione di Simulazione.exe (Simulazione.sh) si apre l'interfaccia grafica del *software*, mostrata in Figura 3.1.



The screenshot shows a MATLAB App window titled "Simulate a Pumped-Storage Power Plant". The interface is divided into several sections:

- Power Plant Configuration:** Includes dropdowns for Configuration (HBF), Scenario (C), and Strategy (FrequencySplit). It also has input fields for Pb (MW) and Pf (MW), both set to 1, and Update Nref every (s) set to 0.
- Simulation Settings:** Includes input fields for Stop Time (300) and Step Size (0.1). There is a "Save Results" field set to "results" with a "Select Folder" button, and a checked checkbox for "Plot Results".
- Grid System:** A checked checkbox for "Simulate Grid System".
- Sardinian Data:** An input field set to "powerSystemData.xml" with a "Select File" button.
- Characteristic Curves:** Two checked checkboxes: "Generate Turbine characteristic curves" and "Generate Pump characteristic curves". Each has an empty input field and a "Select File" button.
- Other:** A "Delete saved maps" button.
- Status:** A "Ready" indicator with a green dot and a "Simulate" button.

Figura 3.1 - Interfaccia grafica del *software* Simulazione.exe.

La finestra è organizzata in schede, ciascuna contenente alcuni campi che possono essere modificati. I campi superflui sono automaticamente nascosti (ad esempio, selezionando la configurazione HB scompaiono i campi legati al FESS).

I concetti teorici inerenti alla modellazione dell'impianto e alle diverse modalità operative sono stati esposti nel Rapporto RdS 2020 [1]; la modellazione è stata completata nel 2021, perciò ulteriori dettagli in merito si trovano nel relativo Rapporto RdS [2].

Di seguito si dà una descrizione dei campi di ciascuna scheda.

### 3.1.1 Power Plant Configuration

In questa scheda ci sono campi inerenti alla configurazione d'impianto e alle impostazioni della simulazione.

Per quanto riguarda la configurazione d'impianto:

- Configuration: la configurazione d'impianto: H, HB, HF, HBF;
- Pb, Pf: le potenze nominali di BESS e FESS, rispettivamente (espresse in MW); il rapporto energia nominale/potenza nominale del FESS non va indicato (esso dipende dalla relazione potenza/velocità di rotazione), quello del BESS è contenuto nel *file* params1.xml.
- Scenario: la modalità operativa del PSHP nell'ora simulata. I campi possibili sono i seguenti:
  - A: modalità turbina, con velocità di riferimento fissata pari al valore definito dall'utente (si veda in seguito);
  - B: modalità turbina, con velocità di riferimento fissata pari alla velocità ottima calcolata a partire dalle condizioni iniziali di quota geodetica dell'acqua e di potenza generata della macchina;
  - C: come B, ma con velocità di riferimento che viene ri-calcolata periodicamente (sulla base di quanto indicato nel campo "Update Nref every (s)");
  - P: modalità di funzionamento pompa.
- Strategy: strategia di controllo adottata con l'ibridazione, ossia Frequency Split (FS) o Hydro Recharge (HR);
- Simulate Grid System: se la casella viene spuntata, viene simulato l'impianto inserito nel modello della rete sarda;
- Sardinian Data: questo campo compare se si intende simulare l'impianto inserito nel modello di rete sarda. In questo campo va indicato un *file* xml dal quale vengono caricate le variabili del sistema elettrico sardo. È possibile modificare direttamente il *file* powerSystemData.xml, oppure generarne uno eseguendo lo script "Parametri\_modello\_rete.m";
- Generate Turbine/Pump Characteristic Curves: se le caselle sono spuntate, compaiono i rispettivi campi, dove vanno indicati i *file* contenenti i punti sperimentali da utilizzare per ricostruire le mappe. Se questi campi non sono spuntati, vengono usati i *file* predefiniti. Le mappe così ricostruite sono utilizzate nelle successive simulazioni. Per usare mappe diverse basta selezionare un *file* diverso, mentre per ritornare ad utilizzare le mappe predefinite basta fare click sul pulsante "Delete saved maps".

I *file* di *input* devono avere la seguente struttura:

- per la turbina: un *file* in formato .csv, avente quattro colonne. L'*header* deve essere "alpha", "phi", "psi", "eta", per indicare rispettivamente l'angolo di apertura delle palette (°), il numero di flusso (adimensionale), il numero di pressione (adimensionale) e l'efficienza idraulica (adimensionale). L'ordine delle colonne non è importante. Ogni riga corrisponde ad un punto di funzionamento caratterizzato da una quadrupla di coordinate;
- per la pompa: come per la turbina, ma senza la coordinata "alpha".

Per quanto riguarda le impostazioni della simulazione:

- Stop Time: il periodo simulato (in secondi);

- Step Time: il “passo” (in secondi) della simulazione (inteso come differenza tra istanti di tempo successivi). Si consiglia di adottare un valore inferiore alla minima costante di tempo utilizzata nei parametri di *input* (espressi in *params1.xml*);
- Save results: si indica la cartella nella quale salvare i risultati della simulazione (la cartella di default è quella indicata nel campo);
- Plot Results: se la casella viene spuntata, al termine della simulazione verranno prodotti i grafici dell'andamento nel tempo delle seguenti variabili:
  - frequenza e segnale di livello, nel caso di simulazione open-loop; in caso di simulazione closed-loop, cioè utilizzando il modello di rete, al posto del grafico del segnale di livello viene prodotto il grafico del ROCOF;
  - variazioni della potenza d'impianto, del PSHP, e di BESS e/o FESS se presenti;
  - variazioni di potenza del PSHP, BESS e FESS, e SOC di questi ultimi, se presenti;
  - velocità di rotazione della girante (N), posizione delle palette distributrici (z), caduta/prevalenza netta alla macchina (H), portata volumetrica elaborata (Q).

### 3.1.2 Grid

In questa scheda ci sono campi inerenti alla rete. Se non è selezionata l'opzione “Simulate Grid System”, vi sono due campi:

- Frequency Signal: nome del *file* contenente i dati di frequenza per il periodo simulato, che saranno usati per la simulazione della regolazione primaria. Un *file* del genere deve
  - non contenere un *header*;
  - avere due e solo due colonne: istante di tempo e frequenza di rete;
  - la prima riga deve avere l'istante di tempo pari a 0;
  - non è necessario che i valori di frequenza siano campionati con periodo costante.

Qualora il *file* di *input* non avesse una risoluzione temporale pari al “Time step”, il programma esegue una interpolazione lineare.

- AGC Signal: nome del *file* contenente i valori del segnale di livello per la regolazione secondaria di frequenza. Valgono le stesse prescrizioni per il *file* del “Frequency Signal”. Se questo campo viene lasciato vuoto, la simulazione viene effettuata con la sola regolazione primaria (il caso con la sola regolazione secondaria non è invece previsto).

In alternativa, il campo “Frequency Signal” può essere riempito manualmente con un valore numerico (positivo o negativo): in tal caso la simulazione verrà eseguita con una perturbazione di frequenza a gradino, di ampiezza (in Hz) pari al valore inserito. La stessa possibilità non è garantita per la regolazione secondaria e/o il campo “AGC Signal”.

Se l'opzione “Simulate Grid System” è selezionata, non vi sono campi da riempire.

### 3.1.3 Initial conditions

In questa scheda si definiscono le condizioni iniziali del sistema. I campi da compilare sono i seguenti:

- Gross Head: la quota geodetica del bacino superiore (m);
- Power: la potenza generata (consumata, rispettivamente) dalla turbina (dalla pompa) (MW);
- Rotational speed: la velocità di riferimento della girante (rpm), necessario solo in caso di scenario A;
- SOC: stato di carica (*State Of Charge* – SOC) iniziale di BESS/FESS, espresso in p.u.

### 3.1.4 Control Parameters

In questa scheda si definiscono i valori dei parametri di controllo per le configurazioni ibride:

- Tl<sub>pfH</sub>: costante di tempo del filtro passa-basso del PSHP (s);

- TlpfB: costante di tempo del filtro passa-basso del BESS (in caso di configurazione HBF) (s); si ricorda che nel caso HB non c'è la costante di tempo TlpfB, quindi il relativo campo non appare nella scheda;
- ChInt: intensità di carica/scarica dell'azione di controllo del SOC del PSHP per BESS/FESS (p.u., con base la potenza nominale di BESS/FESS);
- SOClO/SOChi: limiti inferiore e superiore, rispettivamente, di attivazione del controllo del SOC (p.u.);
- DSOC: ampiezza della banda di SOC che, una volta recuperata, disattiva il controllo del SOC (p.u.).

### 3.1.5 File accessori

Non tutti i parametri di funzionamento sono inizializzati mediante l'interfaccia grafica. Nella stessa cartella in cui si trova l'eseguibile ci sono dei *file* di configurazione che contengono i valori di molti parametri e costanti. Questi *file* possono essere modificati, ma né il loro nome né la loro posizione nelle rispettive cartelle può essere modificata.

Nella cartella "parameters" ci sono 6 *file* di configurazione in formato xml, numerati da 0 a 5. I parametri contenuti in ciascun *file* sono mostrati nelle tabelle seguenti, da Tabella 3.1 a Tabella 3.6.

Questi *file* non vengono modificati dal programma. Nel caso i valori espressi in uno di questi *file* siano diversi da quanto impostato nell'interfaccia grafica del programma, prevalgono quelli dell'interfaccia grafica. Il *software* non può funzionare in assenza di tali *file*.

Nella stessa cartella dell'eseguibile è presente un *file* MATLAB Script chiamato "Parametri\_modello\_rete.m" che contiene tutti i parametri necessari a simulare l'impianto nel modello di rete sarda, compreso l'evento perturbante. Eseguendo tale script viene generato un *file* in formato xml che va indicato in *input* nell'interfaccia grafica.

**Tabella 3.1 - Parametri contenuti nel file params0.xml: parametri fissi.**

Variabile	Descrizione
p0.ag	Accelerazione di gravità (m/s <sup>2</sup> )
p0.tol	tolleranza numerica (valore di default: 1E-12)
p0.pumpExpData.cpsi	Coefficienti polinomiali per il numero di pressione della pompa
p0.pumpExpData.ceta	Coefficienti polinomiali per l'efficienza idraulica della pompa
p0.turbExpData.alpha	Punti sperimentali della turbina: angolo di apertura del distributore (°)
p0.turbExpData.eta	Punti sperimentali della turbina: efficienza idraulica
p0.turbExpData.phi	Punti sperimentali della turbina: numero di flusso
p0.turbExpData.psi	Punti sperimentali della turbina: numero di pressione

**Tabella 3.2 - Parametri contenuti nel file params1.xml: parametri tecnologici di PSHP, BESS e FESS.**

Variabile	Descrizione
BESS	
p1.bess.EPratio	Rapporto energia-potenza (s)
p1.bess.etail	Round-trip efficiency
p1.bess.Tc	Costante di tempo del convertitore (s)
p1.bess.Tdelc	Ritardo del convertitore (s)
p1.bess.Tmeas	Costante di tempo del filtro anti-rumore (s)
FESS	
p1.fess.etail	Round-trip efficiency
p1.fess.I	Momento d'inerzia (kg/m <sup>2</sup> )
p1.fess.Nmax	Massima velocità di rotazione (rpm)
p1.fess.Nmin	Minima velocità di rotazione (rpm)
p1.fess.p1	Coefficienti polinomiali della curva caratteristica del FESS

p1.fess.p2	
p1.fess.p3	
p1.fess.p4	
p1.fess.Pbase1f	Potenza nominale di un singolo modulo di FESS (W)
p1.fess.Td	Costante di tempo del ritardo del convertitore del FESS (s)
p1.fess.Tloss	Coppia resistente (Nm)
Idroelettrico	
p1.hydro.ap	Velocità dell'onda di pressione nella condotta forzata (m/s)
p1.hydro.B1	Sezione di ingresso dell'acqua nella macchina (m)
p1.hydro.Bl	<i>Backlash</i> del meccanismo che regola le palette distributrici
p1.hydro.cemmax	Massima coppia elettromotrice tollerabile dal motore elettrico (p.u.)
p1.hydro.cemmin	Minima coppia elettromotrice tollerabile dal motore elettrico (p.u.)
p1.hydro.D1	Diametro della girante della pompa-turbina (m)
p1.hydro.Dp	Diametro della condotta forzata (m)
p1.hydro.epsilon	Coefficiente di scabrezza della colonna forzata
p1.hydro.Hgmax	Massima quota geodetica dell'acqua nel bacino superiore (m)
p1.hydro.Hgmin	Minima quota geodetica dell'acqua nel bacino superiore (m)
p1.hydro.L	Lunghezza della condotta forzata (m)
p1.hydro.lambda	Coefficiente di attrito di Darcy
p1.hydro.mxgctr	Massima velocità di chiusura del distributore (p.u.)
p1.hydro.mxgtr	Massima velocità di apertura del distributore (p.u.)
p1.hydro.nge	Numero di elementi finiti per la discretizzazione della condotta forzata (nel modello ne sono stati usati 3)
p1.hydro.Nmax	Massima velocità di rotazione della girante (rpm)
p1.hydro.Nmin	Minima velocità di rotazione della girante (rpm)
p1.hydro.Nrated	Velocità di rotazione nominale della girante (rpm)
p1.hydro.nsyn	Velocità sincrona (p.u.)
p1.hydro.prmmax	Massima potenza al rotore della macchina elettrica (p.u.)
p1.hydro.prmmin	Minima potenza al rotore della macchina elettrica (p.u.)
p1.hydro.Qrated	Portata volumetrica nominale (m <sup>3</sup> /s)
p1.hydro.rho	Densità dell'acqua (kg/m <sup>3</sup> )
p1.hydro.Tc	Costante di tempo del convertitore al rotore della macchina elettrica (s)
p1.hydro.Td	Costante di tempo derivativa dell'emulazione di inerzia sintetica (s)
p1.hydro.Tfnf	Costante di tempo del convertitore allo statore della macchina elettrica (s)
p1.hydro.Tm	Tempo di avviamento del motore/generatore elettrico (s)
p1.hydro.Ts	Costante di tempo del servomotore (s)
Impianto	
p1.powerPlant.fbase	Frequenza di rete nominale (Hz)
p1.powerPlant.sigma	Statismo dell'impianto (p.u.)

**Tabella 3.3 - Parametri contenuti nel file params2.xml: potenze nominali di default di PSHP, BESS e FESS, e riserva secondaria.**

Variabile	Descrizione
p2.FrrReserve	Riserva secondaria (p.u. sulla base della potenza efficiente dell'impianto)
p2.PB	Potenza installata di BESS (MW)
p2.PF	Potenza installata di FESS (MW)
p2.PH	Potenza nominale del PSHP (MW)

**Tabella 3.4 - Parametri contenuti nel file params3.xml: valori dei parametri di controllo.**

Variabile	Descrizione
<b>BESS</b>	
p3.bess.deltasoc	Controllo del SOC del BESS: SOC recuperato (p.u.)
p3.bess.sochigh	Controllo del SOC del BESS: livello di attivazione della "scarica" (p.u.)
p3.bess.soclow	Controllo del SOC del BESS: livello di attivazione della "carica" (p.u.)
p3.bess.Tlpf	Costante di tempo del filtro passa-basso del BESS (s)
<b>Strategia di controllo</b>	
p3.controlStrategy. FrequencySplit	Strategia di controllo attiva: Frequency Split (0/1)
p3.controlStrategy. HydroRecharge	Strategia di controllo attiva: Hydro Recharge (1/0)
<b>FESS</b>	
p3.fess.deltasoc	Controllo del SOC del FESS: SOC recuperato (p.u.)
p3.fess.sochigh	Controllo del SOC del FESS: livello di attivazione della "scarica" (p.u.)
p3.fess.soclow	Controllo del SOC del FESS: livello di attivazione della "carica" (p.u.)
<b>Idroelettrico</b>	
p3.hydro. BESSchargeIntensity	Potenza dedicata al controllo del SOC del BESS (p.u., base: potenza installata del BESS)
p3.hydro. FESSchargeIntensity	Potenza dedicata al controllo del SOC del FESS (p.u., base: potenza installata del FESS)
p3.hydro.Ki	Guadagno integrale del controllore PI del regolatore della velocità
p3.hydro.Kp	Guadagno proporzionale del controllore PI del regolatore della velocità
p3.hydro.Tlpf	Costante di tempo del filtro passa-basso del PSHP (s)

**Tabella 3.5 - Parametri contenuti nel file params4.xml: condizioni iniziali.**

Variabile	Descrizione
p4.bess.soc0	SOC del BESS (p.u.)
p4.fess.soc0	SOC del FESS (p.u.)
p4.hydro.Hg0	Livello dell'acqua nel bacino superiore (m)
p4.hydro.N0	Velocità di rotazione della girante (rpm)
p4.hydro.P0	Potenza generata (consumata, rispettivamente) dalla turbina (pompa) (MW)

**Tabella 3.6 - Parametri contenuti nel file params5.xml: impostazioni di default della simulazione.**

Variabile	Descrizione
p5.config	Configurazione dell'impianto. Valori validi: H, HB, HF, HBF
p5.fixedStepSize	Passo di tempo della simulazione (s)
p5.gridModel	Simulazione dell'impianto non inserito/inserito nel modello di rete sarda (0/1)
p5.NoptRefrehPeriod	Periodo di tempo di ri-calcolo della velocità di rotazione di riferimento della girante (solo scenario C; per gli altri scenari il valore di tale parametro è irrilevante) (s)
p5.scenario	"Scenario", ossia modalità di funzionamento del PSHP. Valori validi: A, B, C, P. I primi tre riguardano il tipo di controllo della velocità nel caso di modalità di funzionamento in turbinaggio
p5.stoptime	Durata della simulazione (s)

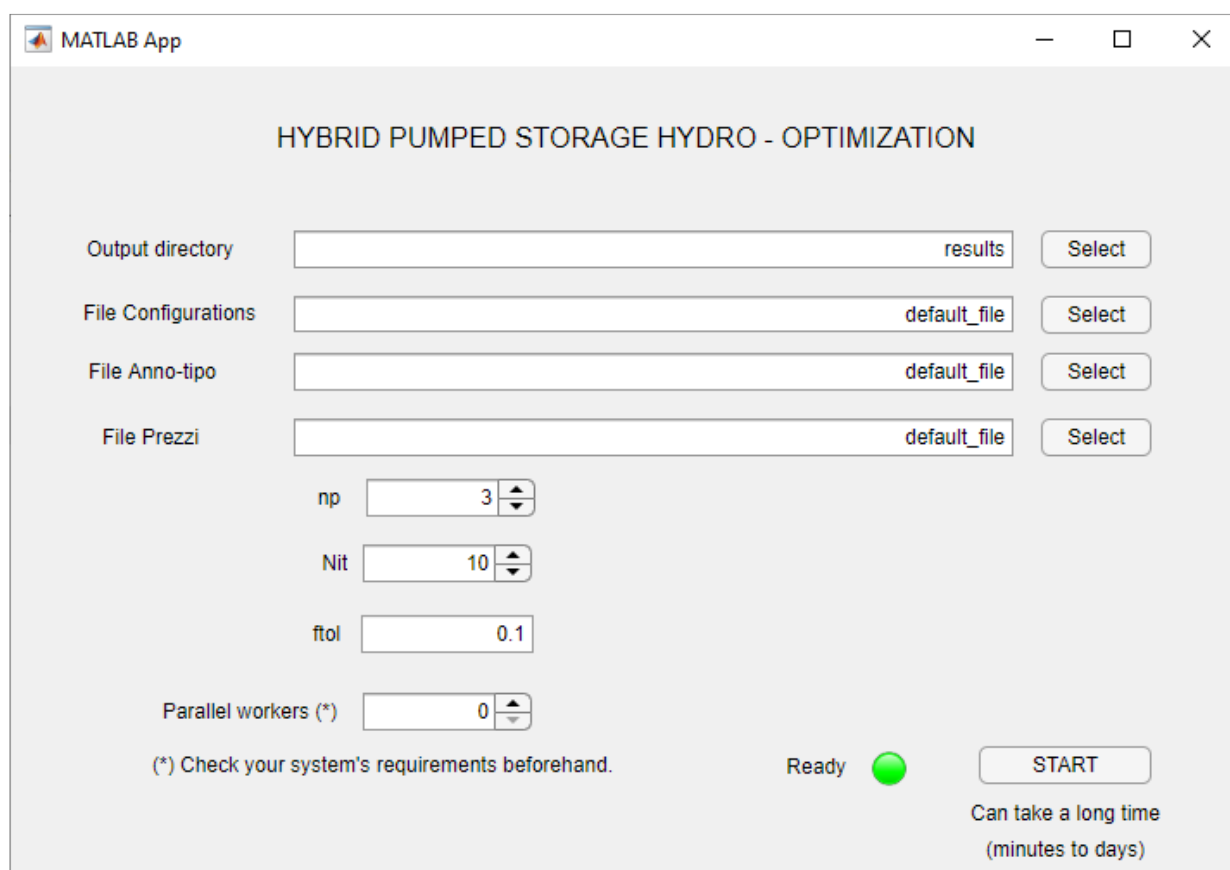
### 3.1.6 Simulazione

Una volta che tutti i campi sono stati modificati a piacimento, si può premere il tasto “Simulate”. La spia a sinistra del pulsante diventa gialla durante la simulazione. Se la simulazione ha buon esito ritorna verde, mentre se fallisce per qualche motivo diventa rossa.

Un *file* di log è automaticamente creato nella stessa cartella in cui si trova l'eseguibile.

## 3.2 Procedura di ottimizzazione

Dopo l'esecuzione del *file* Ottimizzazione.exe (Ottimizzazione.sh) si apre l'interfaccia grafica del *software* mostrata in Figura 3.2.



**Figura 3.2 - Interfaccia grafica del programma di ottimizzazione.**

Facendo click sui vari pulsanti “Select” si potrà selezionare il *file* o la cartella corrispondente al campo. Di seguito si elencano i vari campi da compilare.

- **Output directory:** la cartella nella quale saranno salvati i risultati. Se nella cartella specificata sono già presenti dei risultati, verranno sovrascritti. Esempio: Risultati
- **File Configurations:** il nome del *file* con le configurazioni candidate all'ottimizzazione. Esempio: configurazioni.csv
- **File Anno-tipo:** il nome del *file* con l'insieme delle ore-tipo costituenti l'anno. Esempio: impostazioniAnno.csv
- **File Prezzi:** il nome del *file* contenente i parametri economici. Esempio: prezzi.csv
- **np:** popolazione del solutore (numero di individui)
- **Nit:** numero massimo di iterazioni di stallo

- **ftol**: tolleranza per l'arresto del solutore.
- **Parallel workers**: numero di *workers* da usare nelle computazioni in parallelo. Se posto pari a 0, il programma selezionerà automaticamente un numero a seconda delle risorse del sistema.

In seguito, è possibile iniziare la procedura di ottimizzazione facendo click sul pulsante "START". La spia luminosa rimane gialla finché il *software* sta processando, diventa rossa in caso il processo fallisca, e ritorna verde una volta che il processo è completato con successo. È importante ricordare che il tempo di calcolo totale potrebbe essere da pochi minuti a diverse ore, in funzione del numero di configurazioni utilizzate nella procedura di ottimizzazione e alla quantità di ore-tipo che costituiscono l'anno sintetico.

I valori predefiniti sono i seguenti: per le configurazioni, le tre possibili combinazioni dell'ibridazione con 1 MW di BESS e/o FESS; per l'anno-tipo e i prezzi, i medesimi valori utilizzati in questo documento. A seguire, nella sottosezione 3.2.1, si descrive la struttura che devono avere i *file* di *input* di cui sopra. Come per l'eseguibile per la simulazione d'impianto, i *file* di configurazione *params0.xml*, ..., *params5.xml*, contenuti nella cartella *parameters*, sono necessari per il corretto funzionamento del *software*. Anche in questo caso, prima si caricano i dati di default degli *xml*, in seguito si caricano i dati dai *csv*. Pertanto, i valori indicati nel *file* delle configurazioni e dell'anno-tipo "prevalgono" su quelli indicati negli *xml*: nel caso la stessa variabile compaia in entrambi i *file*, avrà il valore indicato nel *.csv*.

Ogni volta che una configurazione viene ottimizzata (ossia si ricava la soluzione ottima per ciascuna strategia di controllo e, dopo il confronto di tali due soluzioni, si stabilisce quale delle due sia l'ottima), il risultato viene salvato nella "Output directory" indicata. In questo modo, se l'esecuzione dovesse interrompersi prematuramente, le soluzioni trovate non sono perse. Solo la soluzione ottima per la configurazione selezionata viene salvata.

Di seguito, nella sottosezione 3.2.2, si descrivono gli *output* prodotti.

### 3.2.1 File di input

#### 3.2.1.1 File delle configurazioni

Il *file* delle configurazioni è un *.csv* contenente 4 campi (colonne). L'ordine delle colonne è ininfluente, ma è fondamentale che la prima riga (l'*header*) non sia modificata. Ogni riga di tale documento corrisponde a una configurazione candidata dell'ibridazione.

Le colonne sono le seguenti.

*Power\_BEES*: la potenza in MW del BESS nella configurazione ibridata. Sono ammissibili solo valori maggiori o uguali a 0. È ammissibile che questo campo, in una riga, sia lasciato vuoto, il che è equivalente ad usare il valore 0.

*Power\_FESS*: la potenza in MW del FESS nella configurazione ibridata. Sono ammissibili solo valori maggiori o uguali a 0. È ammissibile che questo campo, in una riga, sia lasciato vuoto, il che è equivalente ad usare il valore 0.

*Max\_Delay\_H*: il limite superiore, in secondi, che la costante di tempo del filtro passa-basso del PSHP può assumere. È un valore obbligatorio per qualunque tipo di ibridazione. Può assumere valori maggiori o uguali a 0.

*Max\_Delay\_B*: il limite superiore, in secondi, che la costante di tempo del filtro passa-basso del BESS può assumere. È obbligatorio solamente quando la configurazione è di tipo HBF. In tutti gli altri casi può essere omissso, e in ogni caso viene ignorato.

Le righe del foglio in cui entrambe le potenze di BESS e FESS siano 0 vengono ignorate.

### 3.2.1.2 File dell'anno-tipo

Il *file* dell'anno-tipo è un .csv contenente 13 campi (colonne). L'ordine delle colonne è ininfluente, ma è fondamentale che la prima riga (l'*header*) non sia modificata. Ogni riga di tale documento corrisponde a un'ora-tipo che costituisce l'anno.

Le colonne sono le seguenti.

- **Frequency**: nome del *file* contenente i dati di frequenza dell'ora-tipo. Un *file* del genere deve
    - non contenere un *header*;
    - avere due e solo due colonne: istante di tempo e frequenza di rete;
    - la prima riga deve avere l'istante di tempo pari a 0;
    - l'ultima riga deve avere l'istante di tempo pari a 3600;qualora il *file* di *input* non avesse una risoluzione temporale pari a 100 ms, il programma esegue una interpolazione lineare.
  - **Livello**: nome del *file* contenente i dati del segnale di livello (per la regolazione secondaria) dell'ora-tipo. Valgono le stesse prescrizioni per quanto riguarda la colonna Frequency e l'interpolazione lineare.
  - **Hydroconfig**: la modalità operativa del PSHP nell'ora simulata. Sono accettabili solamente questi valori:
    - A: modalità turbina, velocità di riferimento fissata, pari a *Init\_N* (si veda in seguito);
    - B: modalità turbina, velocità di riferimento fissata, pari alla velocità ottima calcolata a partire dalle condizioni iniziali di quota geodetica dell'acqua e potenza generata della macchina;
    - C: come B, ma con la velocità di riferimento che viene ri-calcolata periodicamente (sulla base di quanto indicato nel *file* *p5.xml*);
    - P: modalità di funzionamento pompa.
  - **Probability**: la probabilità che si verifichi quell'ora-tipo nel corso dell'anno. La somma delle probabilità delle ore-tipo può essere inferiore a 1. In tal caso l'analisi non presuppone il funzionamento durante 8760 ore.
  - **Sec\_Reserve\_Allocation**: semibanda della riserva secondaria messa a disposizione durante l'ora-tipo (*SB*), espressa in p.u rispetto alla potenza efficiente dell'impianto ( $P_h + P_b + P_f$ ).
  - **Init\_P**: la potenza di setpoint in MW generata (consumata, rispettivamente) dalla turbina (pompa). Può essere indicata con segno positivo anche in modalità pompa.
  - **Init\_H**: differenza di quota tra bacino superiore e inferiore, in metri. Tale valore è assunto costante durante tutta l'ora simulata.
  - **Init\_N**: la velocità di rotazione della girante del PSHP all'istante iniziale, in rpm. In caso di modalità di funzionamento pompa, il valore viene ignorato (in quanto il valore dipende dalle condizioni idrauliche dell'impianto).
  - **Init\_SOCb**: SOC del BESS all'istante iniziale, espresso in p.u.
  - **Init\_SOCf**: SOC del FESS all'istante iniziale, espresso in p.u.
  - **p\_mgp**: prezzo dell'energia nel Mercato del Giorno Prima (MGP), espresso in €/MWh.
  - **p\_frr\_up**: prezzo della regolazione secondaria a salire (nella fase in tempo reale del Mercato per il Servizio di Dispacciamento – MSD, detta Mercato di Bilanciamento – MB), espresso in €/MWh.
  - **p\_frr\_down**: prezzo della regolazione secondaria a scendere (nel MB), espresso in €/MWh.
- Se una riga ha un campo vuoto, il codice lo riempie copiando il valore corrispondente della riga precedente. L'ordine delle colonne non è importante, ma l'*header* non deve cambiare.

### 3.2.1.3 File dei prezzi

Il *file* dei prezzi dell'anno-tipo è un .csv contenente 19 campi (colonne). L'ordine delle colonne è ininfluente, ma è fondamentale che la prima riga (l'*header*) non sia modificata.

Le colonne sono le seguenti.

- `Inv_BESS_Eur_kWh` e `Inv_FESS_Eur_kWh`: costi di investimento di BESS e FESS, indicati rispettivamente in €/kWh e €/kW;
- `OM_fix_BESS_Eur_kWh`, e `OM_fix_FESS_Eur_kWh`: costi fissi per l'*Operation and Maintenance* (OM) del PSHP, BESS, e FESS, rispettivamente, espressi in €/kW;
- `OM_var_HYDRO_Eur_kWh`, `OM_var_BESS_Eur_kWh`, e `OM_var_FESS_Eur_kWh`: costi variabili per l'OM del PSHP, BESS, e FESS, rispettivamente, espressi in €/kWh;
- `rampCost_Hydro_Eur_MW_s`: costo delle rampe di potenza per il PSHP, espresso in €/(MW/s);
- `replacement_BESS_Eur_kWh`, `replacement_FESS_Eur_kWh`: costo, espresso in €/kWh e €/kW, da sostenere quando BESS e FESS, rispettivamente, giungono a fine vita;
- `k_rs_upw`, `k_mgp_upw`, `k_rs_dww`, `k_mgp_dww`: costanti annuali, espresse in €/kWh, per la determinazione della remunerazione della regolazione primaria come modifica del prezzo MGP;
- `FastReserve_Eur_MW`: remunerazione annuale per il servizio di *Fast Reserve* (FR), espressa in €/MW;
- `min_P_FR_MW`, `max_P_FR_MW`: quantità minima e massima di potenza, in MW, messe a disposizione per la *Fast Reserve* che rientrano nella remunerazione. La remunerazione per la FR si ha solamente se  $(P_b + P_f) \geq \text{min\_P\_FR\_MW}$  e  $(P_b + P_f) \leq \text{max\_P\_FR\_MW}$ .
- `discountRate`: tasso di sconto (adimensionale);
- `years`: durata attesa (in anni) dell'investimento.

Nessun campo può essere omissso.

### 3.2.1.4 Altri file

Un altro *file* di *input* (contenuto nella stessa cartella in cui si trova il *file .exe*) è il `bounds.csv`, che contiene i limiti inferiori e superiori delle variabili.

Questo *file* è strutturato in questo modo: la prima colonna contiene le “chiavi” di ciascuna riga: `lb` per i limiti inferiori, `ub` per quelli superiori. La prima riga (*header*) contiene i nomi delle variabili di decisione. La coppia (riga, colonna) corrisponde al limite (superiore o inferiore) della rispettiva variabile.

Qualora si desideri ottimizzare una configurazione ibrida (es. `hbf`), tutti i campi vanno riempiti. Se nella medesima esecuzione ci sono anche configurazioni diverse (es. `hb`), i limiti non pertinenti vengono ignorati.

### 3.2.2 File di output

Sono generati 5 *file*:

- `optConfig.csv` e `optConfig.mat`: ciascuno dei due contiene la stessa tabella, nella quale a ciascuna riga corrisponde una configurazione ottimizzata e ciascuna colonna corrisponde ad una voce di costo/ricavo. La medesima tabella è salvata sia come *file .csv* che come *file .mat*;
- `optGains.csv` e `optGains.mat`: ciascuno dei due contiene una tabella nella quale sono salvati i valori ottimi delle variabili di decisione (colonne) per ciascuna configurazione ottimizzata (righe);
- `stats.mat`: struttura di dati contenente una tabella con delle statistiche per ciascuna ora-tipo, per ciascuna configurazione ottimizzata.

A seguire si presenta nel dettaglio ciascun *file* di *output*.

#### 3.2.2.1 Soluzione: il file *OptConfig*

Questo *file* consiste in una tabella. Ciascuna riga contiene i dati di una configurazione ottima. Le colonne sono le seguenti:

- `Power_BESS`: potenza (in MW) del BESS nella configurazione ottimizzata;
- `Power_FESS`: potenza (in MW) del FESS nella configurazione ottimizzata;
- `Strategy`: strategia ottima di controllo per la configurazione (FS o HR);

- Investment\_BESS: costi di investimento del BESS (€);
- Investment\_FESS: costi di investimento del FESS (€);
- OM\_fix\_BESS: costi fissi di OM del BESS (€);
- OM\_fix\_FESS: costi fissi di OM del FESS (€);
- OM\_var\_Hydro: costi variabili annuali di OM del PSHP (€);
- OM\_var\_BESS: costi variabili annuali di OM del BESS (€);
- OM\_var\_FESS: costi variabili annuali di OM del FESS (€);
- costRamps\_H: costi annuali imputabili alle rampe di potenza del PSHP (€);
- costLC\_B: costi annuali imputabili al consumo di vita del BESS (€);
- costLC\_F: costi annuali imputabili al consumo di vita del FESS (€);
- Revenues\_Primary\_Regulation: profitti annuali dovuti alla fornitura della regolazione primaria (€);
- Revenues\_Secondary\_Regulation: profitti annuali dovuti alla fornitura della regolazione secondaria (€);
- Revenues\_Fast\_Reserve: ricavi annuali dovuti alla FR (€);
- minusOFcontrol: il valore della funzione obiettivo (€) del problema di ottimizzazione ( $OF_{control}$ ) cambiato di segno (ricavi – costi);
- Net\_Present\_Value: il valore attuale netto della configurazione (€).

### 3.2.2.2 Soluzione: il file OptGains

Questo file contiene una tabella. Ciascuna riga contiene i dati di una configurazione ottima. Le prime due colonne sono le potenze (in MW) rispettivamente di BESS e FESS, la terza colonna indica la strategia ottima per la configurazione, le restanti colonne indicano le variabili di decisione, come viste in Tabella 3.1 del Rapporto 2021 [2], qui riportata, per completezza, come Tabella 3.7. Nel caso più generale (configurazione HBF), le variabili di decisione sono 10: le costanti di tempo dei filtri passa-basso, i limiti inferiore e superiore del SOC del BESS e del FESS, i margini di ripristino  $\Delta SOC$  rispetto a tali limiti, i due parametri  $CI_b$  e  $CI_f$  che descrivono la quantità di potenza che il PSHP impiega per il controllo del SOC rispettivamente del BESS e del FESS. Per le configurazioni HB o HF, invece, la funzione obiettivo del problema di ottimizzazione dipende solo da 5 di tali 10 variabili.

**Tabella 3.7 - Variabili di decisione del problema di ottimizzazione, unità di misura, configurazioni d'impianto nelle quali compaiono, e limiti inferiore (LB) e superiore (UB), rispettivamente. I campi contrassegnati con (\*) dipendono dalla configurazione.**

Simbolo	Unità di misura	Configurazione	LB	UB
$T_{lpfH}$	s	HB-HF-HBF	0	(*)
$T_{lpfB}$	s	HBF	0	(*)
$CI_b$	%	HB-HBF	10	100
$SOC_{low}^b$	%	HB-HBF	10	70
$SOC_{high}^b$	%	HB-HBF	10	90
$\Delta SOC^b$	%	HB-HBF	5	50
$CI_f$	%	HF-HBF	10	100
$SOC_{low}^f$	%	HF-HBF	10	70
$SOC_{high}^f$	%	HF-HBF	30	90
$\Delta SOC^f$	%	HF-HBF	5	45

### 3.2.2.3 Soluzione: il file stats

Questa struttura di dati contiene tante “chiavi” quante configurazioni ottimizzate. Ogni chiave è denominata con riferimento alla relativa configurazione: ad esempio la chiave `Pb1_Pf0` contiene la tabella della configurazione con 1 MW di BESS e 0 MW di FESS.

In ogni campo vi è una tabella: ciascuna riga della tabella corrisponde a una delle ore-tipo dell'anno simulato, mentre le colonne sono le seguenti:

- `Lwg`: distanza percorsa dalle palette distributrici (p.u.);
- `Nwg`: numero di movimenti effettuati dalle palette distributrici;
- `LCb`: consumo di vita del BESS (p.u. rispetto alla vita utile stimata);
- `LCf`: consumo di vita del FESS (p.u. rispetto alla vita utile stimata);
- `rampsH_MW_s`: l'ammontare totale, nell'arco dell'ora-tipo, delle rampe di potenza subite dal PSHP (MW/s);
- `PrimaryEnergyUp_MWh`: energia a salire scambiata per la regolazione primaria (MWh);
- `PrimaryEnergyDown_MWh`: energia a scendere scambiata per la regolazione primaria (MWh);
- `SecondaryEnergyUp_MWh`: energia a salire scambiata per la regolazione secondaria (MWh);
- `SecondaryEnergyDown_MWh`: energia a scendere scambiata per la regolazione secondaria (MWh).

#### **4 BIBLIOGRAFIA**

- [1] J. Alterach, S. Canevese, A. Gatti, M. Rapizza, G. Stella, R. Calisti, G. Cavazzini e S. Casarin, «Sviluppo di un modello numerico dinamico di pompaggio idroelettrico ibrido e impostazione metodologica per la localizzazione degli impianti,» Ricerca di Sistema, RSE, prot. 20010322, Milano, 2020.
- [2] J. Alterach, S. Canevese, A. Gatti, M. Rapizza, G. Cavazzini e S. Casarin, «Modello dinamico ottimizzato del pompaggio ibrido,» Ricerca di Sistema, RSE, Prot. 21012476, Milano, 2021.
- [3] MATLAB, «MATLAB Runtime,» [Online]. Available:  
<https://it.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>.

## **5 RICONOSCIMENTI**

Per il presente lavoro ci si è avvalsi di un Contratto di Ricerca con l'Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII).

EERA – European Energy Research Alliance, tramite il Joint Program Energy-Storage Mobility Scheme, ha finanziato un periodo di mobilità. L'Ateneo ospite Universidad Politécnica de Madrid ha fornito gli spazi e il personale a supporto dello sviluppo di parte di questa ricerca.

Si ringrazia in particolare il Dott. Marcos Lafoz, per il supporto durante lo sviluppo del modello del FESS e per le consulenze in merito ai parametri economici impiegati nell'ottimizzazione.

Infine, l'Università di Padova ha fornito le risorse di “CAPRI: Calcolo ad Alte Prestazioni per la Ricerca e l'Innovazione”, finanziate con riferimento al “Bando Infrastrutture Strategiche di Ricerca (ISR)” del 2017.

## **6 ACRONIMI**

<b>Acronimo</b>	<b>Descrizione</b>
<b>BESS</b>	<i>Battery Energy Storage System</i> (Sistema di accumulo di energia a batterie)
<b>FESS</b>	<i>Flywheel Energy Storage System</i> (Sistema di accumulo di energia a volano)
<b>FR</b>	<i>Fast Reserve</i>
<b>FRNP</b>	Fonti Rinnovabili Non Programmabili
<b>FS</b>	<i>Frequency Split</i>
<b>HR</b>	<i>Hydro Recharge</i>
<b>LC</b>	<i>Life Consumption</i> (Consumo di vita utile)
<b>MB</b>	Mercato di Bilanciamento
<b>MGP</b>	Mercato del Giorno Prima
<b>MSD</b>	Mercato per il Servizio di Dispacciamento
<b>NPV</b>	<i>Net Present Value</i> (Valore Attuale Netto - VAN)
<b>OM</b>	<i>Operation and Maintenance</i> (Esercizio e Manutenzione)
<b>PSHP</b>	<i>Pumped Storage Hydro Power</i> (Impianto idroelettrico di pompaggio)
<b>PSO</b>	<i>Particle Swarm Optimization</i>
<b>RdS</b>	Ricerca di Sistema
<b>RSE</b>	Ricerca Sistema Energetico
<b>ROCOF</b>	<i>Rate of Change Of Frequency</i> (derivata della frequenza di rete nel tempo)
<b>SOC</b>	<i>State Of Charge</i> (Stato di carica)