

# **Simulazione dinamica dell'avviamento di un ciclo combinato e verifica con le prestazioni riscontrate "in campo"**

*F. Gasparini – A. Beffani – L. Ottolina*

*Foster Wheeler Italiana – v. Caboto 1 – Corsico (MI) – Italy*

## **1. Abstract**

The start of the Energy Stock Market and the consequent competition introduced new needs in the power plant design.

Foster Wheeler Italiana has designed, commissioned and recently started up for Voghera Energia (Electrabel/ACEA group) a combined cycle power plant in the neighbourhood of the town of Voghera, 50 kilometers south of Milan.

The CCPP is designed for 50 start-ups a year with a high degree of automation. In particular all the start-up and shut-down operations are carried out from the control room with no rovers at site.

An automatic sequence has been implemented in the plant DCS in order to manage all the phases of the start-up, with few commands by operator. The sequence has been studied with a special dynamic simulation program to assess its correctness, especially as far as the nesting of the steps is concerned. During the actual start-up this sequence has then been tested and validated.

This paper describes the start-up sequence, the simulation program and its outputs, in comparison with the actual data measured in field.

## **2. Sommario**

L'avvio della Borsa dell'Energia e la competitività derivatane hanno suscitato nuove esigenze nella progettazione di impianti per la produzione di energia elettrica.

Foster Wheeler Italiana ha progettato, costruito e avviato di recente per Voghera Energia (gruppo Electrabel/ACEA) un impianto a ciclo combinato da 400 MW alla periferia di Voghera.

La centrale è progettata per 50 avviamenti all'anno ed è dotata di un'automazione spinta. In particolare tutte le operazioni di avviamento e fermata della centrale sono svolte da sala controllo senza l'ausilio di personale in campo.

Una sequenza automatica nel DCS gestisce tutte le fasi dell'avviamento, richiedendo solo pochi comandi da parte dell'operatore. La sequenza è stata studiata con uno speciale programma di simulazione dinamica per valutarne la correttezza, con particolare riguardo al concatenamento dei passi. Durante la messa in servizio dell'impianto tale sequenza è stata quindi provata e validata.

Il presente articolo descrive la sequenza, il programma di simulazione e i suoi risultati, in confronto con i dati rilevati in campo.

### 3. Introduzione

L'impianto a ciclo combinato di Voghera Energia (fig. 1) è stato il primo ad ottenere l'autorizzazione dopo la liberalizzazione del mercato elettrico in Italia.

La presentazione dell'iniziativa e la definizione delle principali caratteristiche risalgono al mese di settembre 1999. Nel maggio 2000 è stata avanzata la richiesta di V.I.A. con comunicazione ufficiale all'opinione pubblica. Nel novembre successivo si costituiva la società di progetto "Voghera Energia".

Il Ministero dell'Ambiente emetteva la Valutazione di Impatto Ambientale nel gennaio 2002, mentre il Ministero dell'Industria emetteva l'Autorizzazione alla Costruzione e all'Esercizio in aprile.

Le attività di ingegneria sono iniziate nell'agosto 2002; quelle di costruzione a novembre. Le attività di commissioning sono entrate nel vivo nel settembre 2004. Con il superamento delle prove funzionali, di disponibilità e di prestazione, l'impianto è stato infine consegnato al cliente e, dallo scorso maggio, è in marcia commerciale.

L'impianto ha una ubicazione particolarmente favorevole, essendo localizzato in prossimità sia di un elettrodotto che di un gasdotto ed essendo prossimo a una cartiera. Ciò ha permesso di minimizzare i costi di connessione alle reti, nonché di sviluppare il progetto "in senso cogenerativo".



*Fig. 1 – Vista dell'impianto.*

#### 4. Descrizione dell'impianto

L'impianto di Voghera Energia è costituito dalle seguenti apparecchiature:

- Turbina a gas da 265 MW, modello V-94.3A2, costruita da Ansaldo Energia sulla base di tecnologia Siemens, alimentata a gas naturale, con bruciatori Dry Low NOx (DLN)
- Caldaia a recupero orizzontale a tre livelli di pressione con risurriscaldamento, costruita da Foster Wheeler Italiana, progettata per puro recupero, con camino integrato di 80 m di altezza.
- Turbina a vapore da 130 MW a unico albero monoflusso con risurriscaldamento, costruita da Ansaldo Energia, costituita da due sezioni:
  - alta pressione,
  - media e bassa pressione, a scarico assiale.

La turbina a vapore è collegata all'alternatore mediante frizione oleodinamica, in modo da poter essere scollegata durante l'avviamento e la fermata / il blocco.

- Alternatore da 470 MVA, costruito da Ansaldo Energia, raffreddato ad idrogeno.
- Condensatore raffreddato ad aria, con tecnologia monotubo, costruito da GEA, composto da 21 baie disposte in tre file parallele. Ogni fila è composta da cinque moduli di condensazione e due deflagmatori. I moduli deflagmatori sono accoppiati a ventilatori a doppia velocità, mentre gli altri sono a velocità fissa.
- Trasformatore elevatore da 490 MVA, a due avvolgimenti 400/20kV, immersi in olio, costruito da Siemens.

L'impianto comprende anche le seguenti unità ausiliarie:

- Sistema acqua raffreddamento macchine (raffredd. ad aria)
- Sistema acqua di pozzo / servizi
- Sistema acqua demineralizzata
- Sistema aria Strumenti / Impianto
- Stazione di misura e riduzione pressione del gas naturale
- Caldaia ausiliaria
- Sistema trattamento acque di scarico

Le condizioni del vapore in ingresso turbina sono le seguenti:

Alta Pressione	117.5 bar & 559°C
Risurriscaldato	31.17 bar & 559°C
Bassa Pressione	4.8 bar & 234°C
Scarico	80 mbar

L'esportazione di vapore alla vicina cartiera può raggiungere le 26 t/h, alle condizioni di 3.5 barg & 160 °C

Le prestazioni dell'impianto rilevate durante le prove di accettazione sono:

Potenza Elettrica Netta	385	MW
Consumo Specifico Netto	6297	kJ/kWh

## 5. Sequenza di avviamento

L'avviamento dell'impianto coinvolge diverse apparecchiature e regolazioni, che devono essere gestite in modo sequenziale e coordinate durante il transitorio sino al funzionamento di regime.

La sequenza è stata concepita per partire dalla condizione di impianto fermo ed arrivare alla condizione di carico desiderato.

Le prime operazioni (fase 1) riguardano la verifica e l'avviamento dei servizi ausiliari, la predisposizione del vuoto al condensatore e l'avvio delle pompe del ciclo termico (estrazione condensato, alimento caldaia, ecc.).

Successivamente (fase 2) la sequenza avvia la turbina a gas, attende che l'operatore effettui il parallelo con la rete elettrica e porta il carico poco sopra il minimo tecnico (30 MW).

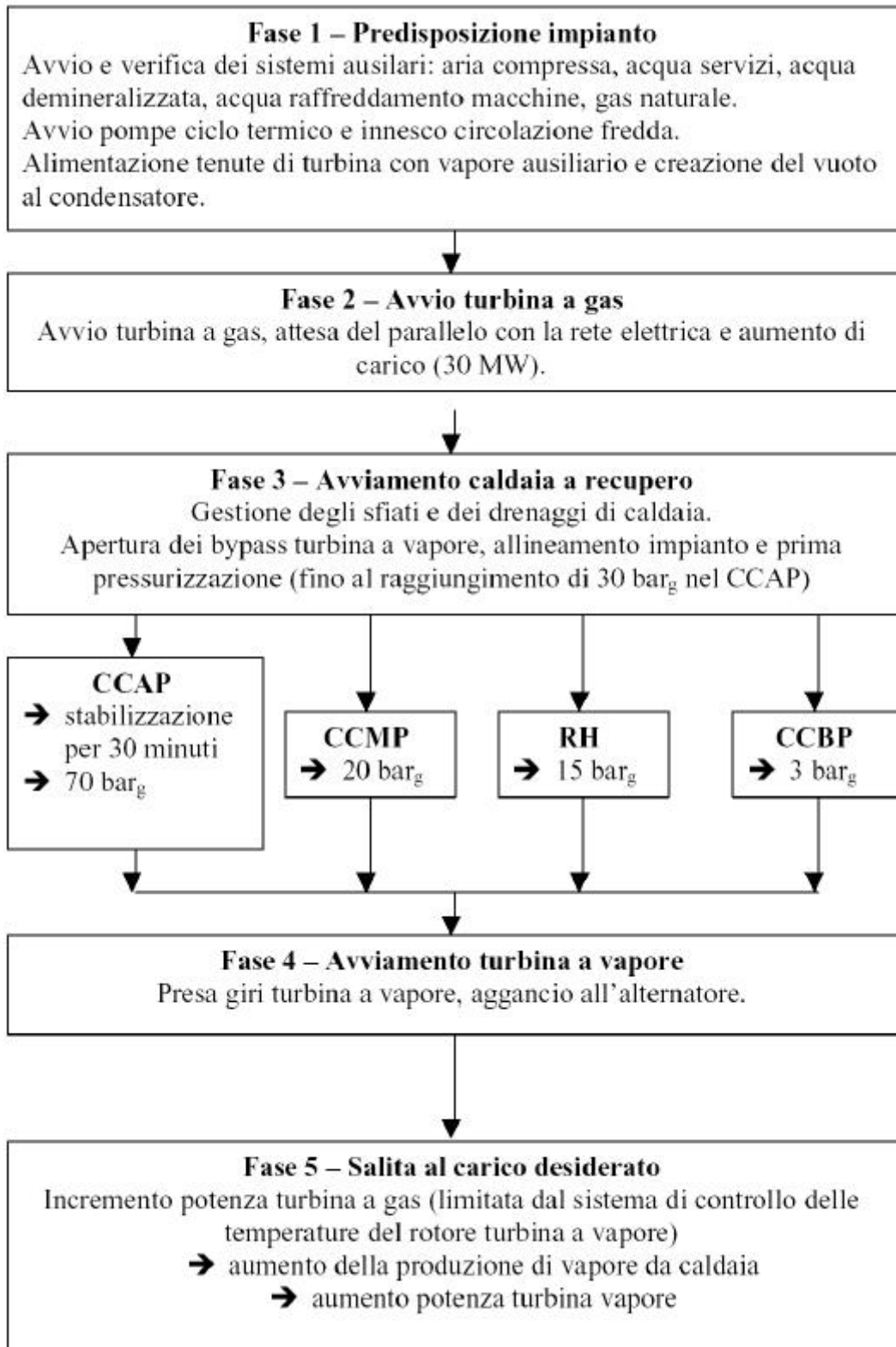
Quindi si attende la pressurizzazione della caldaia a recupero (fase 3). Le pressurizzazioni del corpo cilindrico di alta pressione (CCAP), di media pressione (CCMP) e di bassa pressione (CCBP) devono avvenire nel rispetto dei gradienti massimi ammissibili per la caldaia; la pressurizzazione del circuito di risurriscaldamento (RH) avviene in accordo a quella del corpo cilindrico di media pressione.

Non appena la pressione del CCAP raggiunge 30 barg, si attendono 30 minuti per ottenere l'uniformazione delle temperature di mantello del corpo cilindrico stesso. Al termine di quest'operazione, il carico della turbina a gas viene ulteriormente aumentato a 100 MW in modo da proseguire la pressurizzazione.

Una volta raggiunte le condizioni di pressione e temperatura idonee (70 barg sul vapore di alta pressione, 15 barg sul risurriscaldato), si avvia la turbina a vapore (fase 4). La turbina prende velocità in modo da riscaldarsi gradualmente; una volta raggiunto il sincronismo con l'alternatore – solidale alla turbina a gas – viene agganciata a questo mediante apposita frizione; infine la portata di vapore viene progressivamente aumentata fino al completo spalancamento delle valvole di ammissione, e la contemporanea chiusura delle valvole di bypass.

Da allora si può procedere (fase 5) all'aumento della potenza elettrica prodotta fino al raggiungimento del valore di carico desiderato: parziale o massimo.

Il seguente schema riassume le fasi salienti della sequenza di avviamento.



## **6. Simulazione dinamica**

Nel presente paragrafo vengono brevemente descritti gli obiettivi dello studio di simulazione dinamica, il percorso seguito per mettere a punto il modello dell'impianto al fine di simulare i transitori di funzionamento e le modifiche che si sono rese necessarie per poter simulare la fase di avviamento.

### **6.1 Obiettivi**

La simulazione dinamica è uno strumento largamente impiegato da Foster Wheeler Italiana per la progettazione dei moderni impianti di potenza che sono spesso chiamati ad operare in condizioni non stazionarie.

In particolare, mediante questo strumento vengono analizzati i transitori conseguenti al verificarsi di eventi sia previsti che imprevisi quali frequenti variazioni di carico, sconnessione dalla rete elettrica con conseguente operazione in isola, possibile fermata di emergenza di uno o più componenti principali (ad es. blocco della turbina a vapore).

Gli obiettivi principali dello studio sono generalmente la verifica del corretto dimensionamento delle apparecchiature, la verifica della correttezza e l'eventuale finalizzazione delle logiche di controllo, la stima preliminare dei valori da attribuire ai principali parametri dei controllori.

Le fasi principali di uno studio di simulazione dinamica sono la costruzione del modello contenente le apparecchiature dinamicamente significative, la verifica del modello in regime stazionario e l'utilizzo del modello stesso per prevedere l'andamento nel tempo di alcune variabili come pressioni, portate e temperature durante i transitori ritenuti più significativi.

Nel caso dell'impianto di Voghera, oltre a questi transitori legati al "normale funzionamento", è stata eseguita per la prima volta anche la simulazione dinamica dell'avviamento da freddo dell'impianto, con lo scopo di verificare la sequenza di avviamento automatica, di verificare il rispetto delle rampe di pressurizzazione della caldaia e di ottenere una stima preliminare del tempo necessario per l'avviamento dell'impianto.

### **6.2 Descrizione dello studio**

La simulazione dell'avviamento ha richiesto la modifica del modello utilizzato per la simulazione dei transitori legati all'operazione dell'impianto al fine di includere tutti quegli aspetti che, pur non essendo significativi dal punto di vista dinamico durante la normale operazione, sono essenziali per la simulazione della fase di avviamento.

Esempi sono: tutti gli sfiati e i drenaggi con le relative linee ed i serbatoi di raccolta, tutte le valvole on-off che in normale funzionamento sono completamente aperte mentre durante l'avviamento sono inizialmente chiuse e vengono aperte in momenti diversi dalla sequenza di avviamento ed in generale tutte quelle apparecchiature utilizzate solamente durante la fase di avviamento e generalmente non incluse in un modello di simulazione dinamica.

Il modello dinamico dell'impianto è stato costruito utilizzando un software per la modellazione dinamica degli impianti di potenza, il ProTRAX sviluppato e commercializzato dalla società americana TRAX Corp.

Il software è dotato di un'estesa libreria di componenti standard per la modellizzazione di apparecchiature presenti in questo tipo di impianti; inoltre nel caso in cui un'apparecchiatura o un sistema di controllo non siano direttamente modellabili con moduli standard è possibile creare dei componenti personalizzati mediante programmazione in linguaggio Fortran.

Una volta completato il modello, esso è stato inizializzato nella condizione corrispondente all'avviamento a freddo imponendo tutte le temperature e le pressioni presenti pari al valore corrispondente alle condizioni atmosferiche, disabilitando tutti i controllori, forzando le valvole nella posizione richiesta dalla procedura di avviamento e annullando tutte le portate.

Ottenuto lo stato stazionario corrispondente a "impianto fermo" sono state implementate, mediante programmazione in linguaggio Fortran, tutte le procedure previste dalla sequenza automatica di avviamento (avviamento delle macchine, apertura/chiusura valvole, messa in automatico dei vari controllori, pressurizzazione secondo le rampe predefinite, etc) che, partendo dalla condizione iniziale, portano l'impianto fino alla condizione impostata dall'operatore.

## 7. Confronto tra dati simulati e dati misurati

Durante la messa in servizio dell'impianto la sequenza programmata nel DCS nella fase di ingegneria è stata provata e rifinita. In particolare sono state apportate due modifiche di rilievo:

### a) *Pressurizzazione caldaia con carichi di turbina a gas differenti*

Durante la prima pressurizzazione del CCAP – ossia fino a 30 barg – la turbina a gas veniva mantenuta in condizione di piena velocità e carico nullo. A seguito di una richiesta del cliente di anticipare il più possibile la produzione elettrica si è deciso di alzare il carico della turbina a gas relativo a questa fase ad un valore prossimo ai 30 MW.

Per la seconda pressurizzazione – che porta la caldaia alle pressioni idonee all'inserimento della turbina a vapore – il carico di turbina a gas veniva portato inizialmente a circa 50 MW. Essendo aumentate le pressioni richieste per avviare la turbina (v. punto b) è stato necessario aumentare la potenza della turbina a gas durante questa fase a 100 MW.

### b) *Avvio turbina vapore con pressioni di caldaia più alte*

Le condizioni termodinamiche del vapore, richieste per l'avviamento da freddo della turbina, erano inizialmente: 45 barg per il vapore surriscaldato di alta pressione; 5 barg per il vapore risurriscaldato.

Durante le attività di avviamento dell'impianto è stato ritenuto opportuno elevare queste pressioni come segue:

- 70 barg per il vapore surriscaldato di alta pressione
- 15 barg per il vapore risurriscaldato

Nelle pagine seguenti sono riportati alcuni grafici contenenti i risultati dallo studio di simulazione dinamica confrontati con i valori ottenuti sperimentalmente durante l'avviamento dell'impianto. Fra tutte le variabili analizzate durante lo studio sono state scelte le pressioni dei corpi cilindrici di caldaia e la potenza totale prodotta, essendo le più rappresentative di questo transitorio.

Le figure 2 e 3 riportano i risultati della simulazione iniziale (senza considerare le modifiche di rilievo apportate in campo e descritte in questo paragrafo), mentre le figure 4 e 5 mostrano quelli relativi alla simulazione finale, che recepisce dette modifiche.

Da notare che il gradiente di presa di carico dell'impianto, a partire dall'inserimento della turbina a vapore (approssimativamente dal minuto 170), è stata limitata in modo notevole (circa 2.5 MW/min) durante la prova in campo, al fine di evitare l'eventuale intervento del sistema di limitazione automatico basato sul controllo delle temperature del rotore turbina a vapore. Questo si traduce ovviamente in un aumento del tempo richiesto per l'avviamento rispetto a quanto previsto.

Tuttavia tale gradiente è sicuramente inferiore al limite di intervento del sistema automatico, e durante l'ottimizzazione finale della sequenza verrà aumentato (portando ovviamente ad un accordo ancora migliore con i risultati della simulazione).

#### *Andamento Pressioni*

Il confronto tra gli andamenti delle pressioni misurate e quelle simulate (fig. 4) rivela un buon accordo tra i due valori.

Le curve relative al corpo cilindrico di alta pressione (CCAP) presentano un andamento molto simile fino al minuto 210, quando cominciano a divergere per il più rapido aumento della potenza calcolata dalla simulazione rispetto a quella misurata, secondo quanto precedentemente descritto.

Anche per i corpi cilindrici di media pressione (CCMP) e bassa pressione (CCBP) si presenta una situazione sostanzialmente analoga..

#### *Andamento Potenza*

Anche in questo caso il confronto tra l'andamento della potenza misurata e quella simulata (fig. 5) rivela un buon accordo tra i due valori. Le curve presentano un andamento molto simile nella prima parte dell'avviamento, ovvero nei primi 210 minuti. In seguito la potenza simulata cresce con un gradiente più elevato di quello misurato.

Come già accennato, la ragione di tale divergenza risiede principalmente nella limitazione all'aumento di carico imposta al fine di evitare l'eventuale intervento del sistema di limitazione automatico basato sulle temperature del rotore turbina a vapore. La turbina è infatti equipaggiata di un sistema che controlla le temperature del rotore al fine di garantirne l'innalzamento graduale con minimizzazione dello stress termico. Essendo il riscaldamento legato all'aumento di carico si comprende come anche questo debba necessariamente avvenire in maniera graduale.

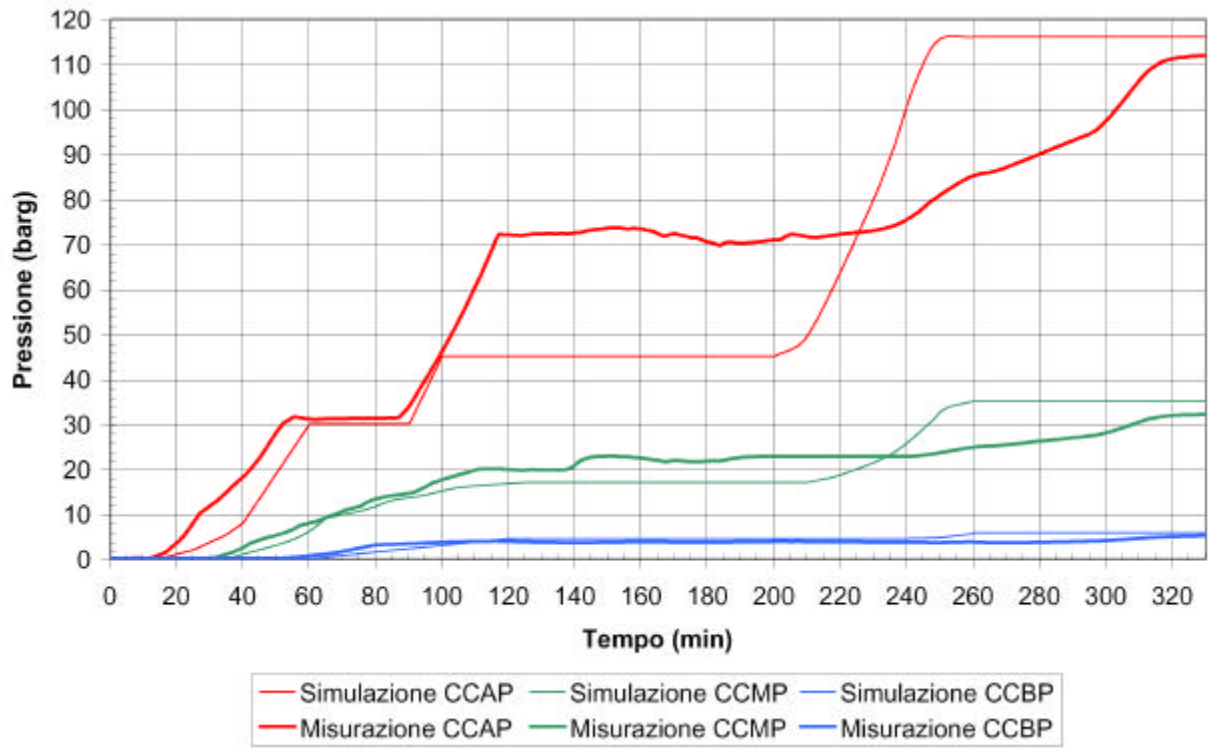


Fig. 2 – Pressurizzazione dei corpi cilindrici di caldaia (I° simulazione).

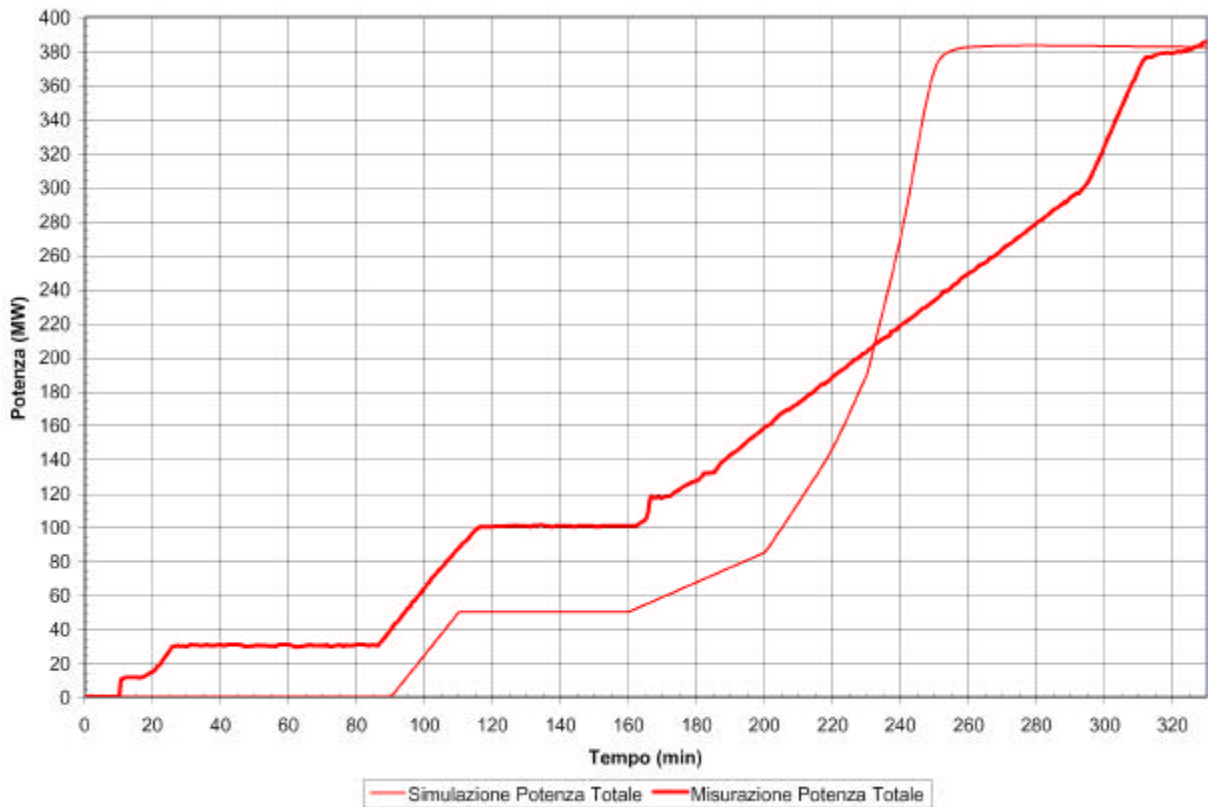
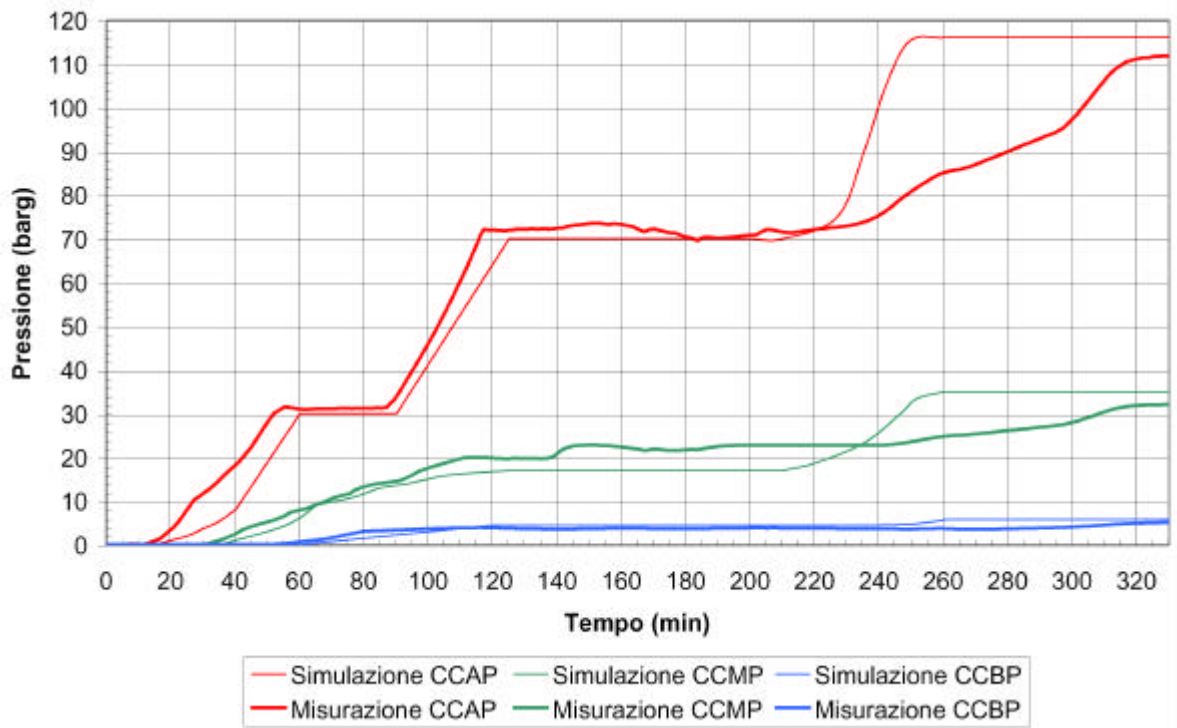
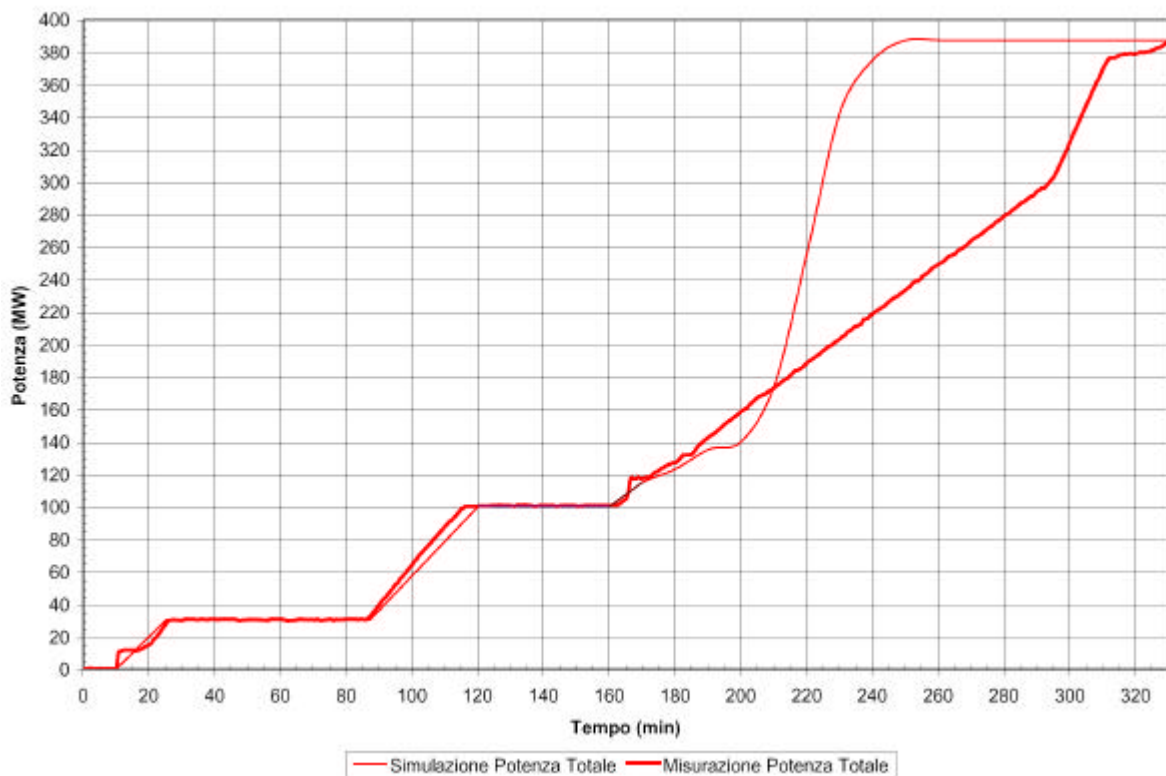


Fig. 3 – Presa di carico TG + TV (I° simulazione). ANIMP/ATI, Giugno 2005 pag. 10



*Fig. 4 – Pressurizzazione dei corpi cilindrici di caldaia (II° simulazione).*



*Fig. 5 – Presa di carico TG + TV (II° simulazione).*

## 8. Conclusioni

Si è potuto osservare un buon accordo tra i risultati della simulazione dinamica e quelli sperimentali, in particolare dopo l'implementazione nel modello di simulazione dinamica delle modifiche di rilievo apportate durante la messa in servizio dell'impianto.

In particolare, la sequenza di avviamento automatica ha portato l'impianto fino alla condizione di massimo carico, partendo da condizioni conseguenti ad una lunga fermata, rispettando senza difficoltà le rampe di pressurizzazione caldaia imposte e senza che si verificassero eventi potenzialmente critici o pericolosi.

Inoltre, la stima del tempo richiesto per l'avviamento dell'impianto (intorno alle quattro ore e mezza / cinque, seguendo la sequenza proposta), si è rivelata sostanzialmente corretta (ovviamente non tenendo conto del maggiore tempo impiegato nella seconda parte dell'avviamento a causa dell'impostazione di una rampa di presa carico più lenta di quella prevista e dovuta alle ragioni precedentemente esposte); individuando nella simulazione dinamica uno strumento utilizzabile per l'ottimizzazione di sequenze automatiche di avviamento, al fine di ridurre il più possibile il tempo necessario (parametro oggi sempre più importante).

Infine, l'aver simulato la sequenza di avviamento già durante la fase di progettazione, ha permesso di risolvere in anticipo le incongruenze derivanti dalla inevitabile necessità di conciliare la progettazione teorica con le problematiche della pratica operativa, contribuendo così a ridurre il tempo necessario per la fase di commissioning.