

**L. LUCCARINI, F. PAOLUCCI**

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili  
Divisione Smart Energies  
Laboratorio CROSS Technologies  
per distretti urbani e industriali  
Centro Ricerche Bologna

**F. AVOLIO**

Water Quality Hera SpA

# **Brevetto Enea "GRUPPO PER LA GESTIONE AUTOMATIZZATA DI IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO BIOLOGICO DI ACQUE REFLUE"**

Parte 1

Verifica del funzionamento in campo  
e rappresentazione della base di conoscenza del dominio

RT/2023/10/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

L. LUCCARINI, F. PAOLUCCI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili  
Divisione Smart Energies  
Laboratorio CROSS Technologies  
per distretti urbani e industriali  
Centro Ricerche Bologna

F. AVOLIO

Water Quality Hera SpA

# BREVETTO ENEA "GRUPPO PER LA GESTIONE AUTOMATIZZATA DI IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO BIOLOGICO DI ACQUE REFLUE"

## PARTE 1

Verifica del funzionamento in campo  
e rappresentazione della base di conoscenza del dominio

RT/2023/10/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **BREVETTO ENEA "GRUPPO PER LA GESTIONE AUTOMATIZZATA DI IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO BIOLOGICO DI ACQUE REFLUE"**

### **PARTE 1**

Verifica del funzionamento in campo e rappresentazione della base di conoscenza del dominio

L. Luccarini, F. Paolucci, F. Avolio

### **Riassunto**

Il presente rapporto tecnico introduce Constance - COntrollo iNtelligente e geSTione Automatizzata per il trattameNto di aCque rEflue, un sistema brevettato da ENEA per la gestione intelligente e il controllo automatizzato di impianti di depurazione di acque di scarico, con lo studio di fattibilità e le verifiche di funzionalità effettuate in occasione della sua prima installazione in campo su un impianto di depurazione reale. Principalmente, viene rappresentata la base di conoscenza del dominio operativo, costituita dall'insieme di tutti i segnali acquisiti in campo, le relazioni esistenti tra essi e le elaborazioni necessarie al completo controllo del sistema. Constance utilizza logiche di controllo e politiche di gestione basate su tecniche di machine learning e sistemi a regole, usando unicamente segnali indiretti, quali pH e potenziale redox, misurabili con sensori affidabili ed economici, riducendo i costi di realizzazione e aumentando la robustezza del sistema. Constance garantisce un importante incremento dell'efficienza energetica del sistema di aerazione di oltre il 50% rispetto ad impianti non controllati, mantenendo un'elevata efficienza dei processi biologici, garantendo basse concentrazioni degli inquinanti allo scarico.

**Parole chiave:** Knowledge Based System, Machine Learning, Efficienza Energetica, Depurazione acque.



## Sommario

1	INTRODUZIONE .....	3
2	DESCRIZIONE DEL SISTEMA .....	5
3	MATERIALI E METODI.....	9
3.1	IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI GRANAROLO DELL'EMILIA .....	9
3.2	SENSORI, SEGNALI ACQUISITI E CONTROLLATI.....	9
3.3	ARCHITETTURA SOFTWARE.....	10
3.4	SOFTWARE PER L'ELABORAZIONE DEI DATI.....	11
3.5	PULIZIA E CALCOLO DIFFERENZIALE NUMERICO DEI SEGNALI .....	12
4	RISULTATI E ANALISI DATI .....	12
4.1	PROCESSO DI DENITRIFICAZIONE.....	12
4.2	PROCESSO DI NITRIFICAZIONE .....	15
4.3	SVOLGIMENTO EFFICIENTE DEI PROCESSI.....	22
4.3.1	Dati 31 maggio 2018 .....	23
4.4	SVOLGIMENTO NON EFFICIENTE DEI PROCESSI .....	23
4.4.1	Segnali piatti dovuti a carico molto diluito per pioggia intensa e duratura .....	24
4.4.2	Eventi particolari rilevati tramite i segnali .....	25
5	CONCLUSIONI.....	27
6	BIBLIOGRAFIA.....	28

## Lista delle figure

<b>Figura 1.</b>	Consumi elettrici medi impianti di depurazione.....	3
<b>Figura 2.</b>	Costi specifici impianti depurazione.....	3
<b>Figura 3.</b>	Schema di impianto di predenitro/nitro .....	5
<b>Figura 4.</b>	Layout del controllore installato sull'impianto.....	7
<b>Figura 5.</b>	Flussi e planimetria impianto di Granarolo.....	9
<b>Figura 6.</b>	Installazione in campo del controllore.....	11
<b>Figura 7.</b>	Architettura del controllore.....	11
<b>Figura 8.</b>	Valori corretti di pH e ORP in vasca anossica. $-100\text{mV} < \text{ORP} < -300$ .....	14
<b>Figura 9.</b>	Valori non corretti di pH e ORP in vasca anossica. $\text{ORP} > 0 \text{ mV}$ .....	14
<b>Figura 10.</b>	Andamento giornaliero portata .....	16
<b>Figura 11.</b>	Andamento giornale azoto ammoniacale .....	16
<b>Figura 12.</b>	Andamento giornaliero COD.....	16
<b>Figura 13.</b>	Andamento segnale di pH in vasca di ossidazione .....	17
<b>Figura 14.</b>	Andamento DO in vasca di ossidazione .....	18
<b>Figura 15.</b>	Riconoscimento fine basso carico .....	19

<b>Figura 16.</b> Andamento DO basso carico.....	19
<b>Figura 17.</b> Riconoscimento fine alto carico.....	20
<b>Figura 18.</b> Andamento DO alto carico.....	20
<b>Figura 19.</b> Riconoscimento fine medio carico.....	21
<b>Figura 20.</b> Andamento DO medio carico.....	21
<b>Figura 21-a.</b> Portata giornaliera linea 2.....	23
<b>Figura 22-a.</b> Andamento portata linea 2.....	25
<b>Figura 23-a.</b> Aumento portata ore 14:30-15:42.....	26

### Lista degli acronimi

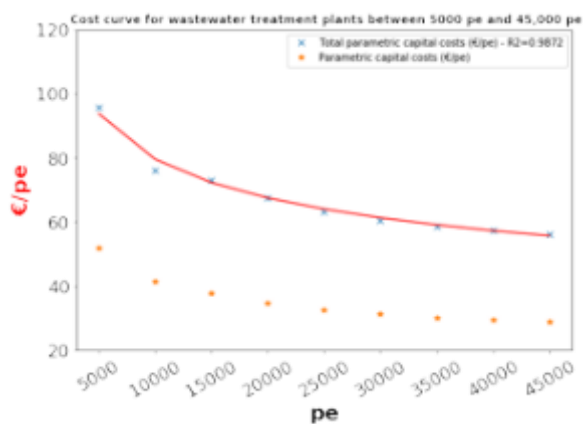
Abbreviazione	Nome esteso
AE	Abitanti equivalenti
CAS	Conventional Activated Sludge
DO	Dissolved Oxygen
ORP	Potenziale redox
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Azoto nitroso
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Azoto nitrico
TN	Azoto totale
COD	Chemical Oxygen Demand
bCOD	COD biodegradabile
COD/TN	COD/Nitrogen ratio
PID	Proporzionale – integrativo – derivativo
PLC	Controllore logico programmabile
SOA	Service Oriented Architecture
ESB	Enterprise Service Bus

# 1 INTRODUZIONE

Circa l'1% del consumo energetico nazionale è legato alla depurazione delle acque [1], occorre quindi che i sistemi di trattamento delle acque reflue, oltre a soddisfare requisiti di qualità dell'effluente sempre più stringenti, assicurino consumi energetici decisamente inferiori di quelli correnti, iniziando a diminuire l'energia consumata per l'aerazione del comparto ossidativo che rappresenta mediamente oltre il 50% del consumo totale (figura 1) [2]. I progettisti sovradimensionano gli impianti per rispondere alle condizioni di carico peggiore, assumendo che il loro funzionamento sia stazionario, nonostante il carico in ingresso sia invece molto variabile, soprattutto per gli impianti di dimensione medio-piccola (fino a 20000 AE), per i quali, a causa delle elevate variazioni del carico tra le ore diurne e quelle notturne [3], i costi operativi specifici sono significativamente superiori a quello dei grandi impianti (figura 2) [4]. Considerando inoltre che essi rappresentano circa il 90% del totale degli impianti in Italia (fonte ISTAT), risulta evidente l'impatto economico derivante dalla diminuzione dei consumi energetici dei compressori di tali impianti. Oggi è possibile gestire gli impianti utilizzando tecnologie che permettono di incrementare notevolmente sia la capacità di rimozione biologica dei nutrienti sia l'efficienza energetica [5].



**Figura 1.** Consumi elettrici medi impianti di depurazione



**Figura 2.** Costi specifici impianti depurazione

A tal fine Enea, dopo diversi anni di studio, ha brevettato Constance [6], sigla che sta per Controllo iNtelligente e geSTione Automatizzata per il trattameNto di aCque rEflue, un sistema intelligente per il controllo automatizzato di impianti a fanghi attivi convenzionali a flusso continuo (CAS), ad oggi tra gli schemi più utilizzati nel mondo. Constance ha bassi costi di installazione, ottenuti grazie alla sostituzione dei molto costosi e poco affidabili sensori per la misura diretta di ammoniaca e nitrati, con sensori per la misura di segnali indiretti, quali pH, potenziale redox (ORP) e ossigeno disciolto (DO), notoriamente molto



economici e robusti. Sfruttando la correlazione esistente tra le dinamiche di questi segnali e quelle dei processi biologici [7] e [8]. Constance è in grado di ridurre sensibilmente i consumi del sistema di aerazione dell'impianto e diminuire le concentrazioni di azoto totale e sostanza organica allo scarico, grazie a semplici ma efficaci strategie per il controllo dei processi di nitrificazione e di denitrificazione. Constance ha superato brillantemente la fase di test sul depuratore di Granarolo dell'Emilia (Bo) di Hera SpA, producendo risultati che dimostrano miglioramenti medi dell'efficienza energetica di oltre il 30%, mantenendo sempre una buona efficienza depurativa anche in condizioni ambientali avverse.

Il presente documento descrive l'attività di monitoraggio effettuata sulla linea 2 dell'impianto di Granarolo dell'Emilia, lungo il periodo che va da giugno a ottobre 2019, presentando i risultati ottenuti a seguito della necessaria analisi dati in previsione della messa in funzione del controllore, oggetto della sperimentazione. In particolare, viene rappresentata la base di conoscenza del dominio operativo, costituita dall'insieme di tutti i segnali e dalle loro elaborazioni, la teoria e l'esperienza dei professionisti che ci operano, nella direzione descritta in [10]. Con i segnali acquisiti sono stati successivamente messi a punto opportuni moduli di machine learning per il riconoscimento di andamenti temporali e la classificazione puntuale di condizioni di processo di particolare interesse, oltre a sistemi a regole fuzzy per tradurre la conoscenza in azioni di controllo: Controllo del processo di nitrificazione e individuazione delle politiche di gestione.

- b. Controllo del processo di denitrificazione e individuazione delle politiche di gestione.
- c. Rilevamento e gestione di malfunzionamenti, compresi quelli dei sensori.
- d. Rilevamento e classificazione eventi di pioggia.
- e. Moduli per il riconoscimento di andamenti temporali.

I vantaggi ottenibili prevedono una maggiore efficienza energetica e una maggiore efficienza dei processi di rimozione dei nutrienti, poiché i processi di nitrificazione e denitrificazione sono costantemente mantenuti in condizioni di buon funzionamento. Rispetto gli obiettivi iniziali non sono stati utilizzati i segnali acquisiti con la sonda per la misura del segnale di ORP in vasca di ossidazione, a causa di un disturbo sistematico sul segnale non eliminabile nemmeno fuori linea, per il quale non si sono individuate le cause, che ne impedisce di fatto l'utilizzo per il sistema. Tale inconveniente ha permesso di ridefinire il numero di sensori necessari, eliminando di fatto la necessità di installare un sensore per la misura del segnale di ORP in vasca di ossidazione, in quanto le informazioni attese da tale misura sono risultate essere presenti completamente nel segnale di DO misurato nella stessa vasca.

## 2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

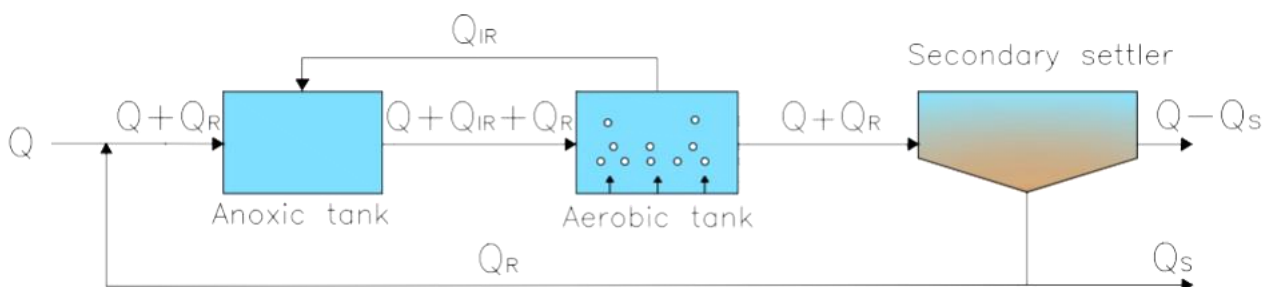
Tutti i sistemi per la rimozione biologica dell'azoto comprendono un comparto aerobico, nel quale ha luogo il processo biologico di nitrificazione, e un comparto anossico, nel quale si svolge il processo biologico di denitrificazione. In questo modo si realizza un sistema in grado di rimuovere biologicamente l'azoto dalle acque di scarico, attraverso l'ossidazione dell'ammoniaca immessa e la successiva riduzione dei nitrati prodotti ad azoto gassoso.

Gli schemi degli impianti per la rimozione dell'azoto si distinguono in relazione alla posizione della vasca anossica rispetto a quella ossidata. Quando la posizione della vasca di denitrificazione è a monte della vasca di ossidazione, la configurazione in assoluto più utilizzata, lo schema è detto predenitro/nitro o Ludzack-Ettinger Modificato, mostrato in figura 3. Tale schema impiantistico è composto da:

- Vasca anossica per la denitrificazione completamente agitata.
- Vasca di ossidazione per la rimozione della sostanza carboniosa e la nitrificazione
- Sedimentatore
- Ricircolo dei fanghi dal sedimentatore  $Q_R$
- Ricircolo interno della miscela areata  $Q_{IR}$

Per ciascuna delle correnti viene specificato il valore di portata dell'influente ( $Q$ ), portata di ricircolo interno ( $Q_{IR}$ ), portata di ricircolo del fango ( $Q_R$ ), portata di supero ( $Q_S$ ) e portata dell'effluente ( $Q - Q_S$ ).

All'interno della vasca di ossidazione è presente un sistema di areazione che permette di mantenere la biomassa in condizioni aerobiche, mentre nella vasca anossica si deve garantire l'assenza di ossigeno (condizioni anossiche).



**Figura 3.** Schema di impianto di predenitro/nitro

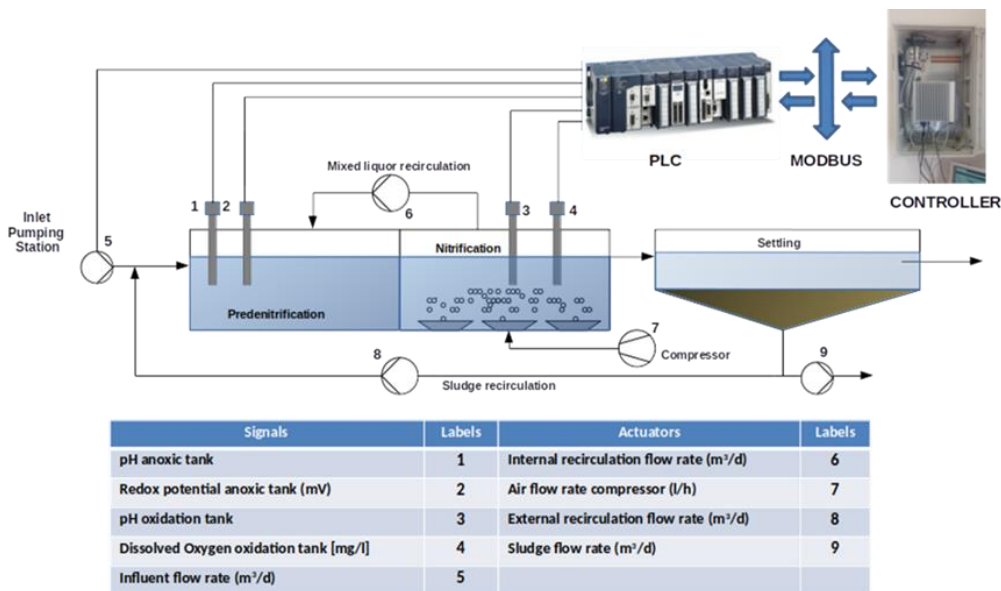
Il refluo contenente azoto e sostanza organica viene caricato con portata  $Q$  nella vasca anossica, dove, in condizioni anossiche e utilizzando il substrato carbonioso normalmente presente nel refluo in ingresso, può svolgersi la riduzione ad azoto gassoso dei nitrati

riciccolati (con portata  $Q_r$ ) dalla vasca di ossidazione, dove avviene, invece, la rimozione della parte restante di sostanza organica e l'ossidazione (nitrificazione) dell'azoto ammoniacale. La miscela aerata passa, poi, al sedimentatore dove la sospensione microbica sedimenta e quindi ispessisce. Una parte della biomassa sedimentata  $Q_r$  viene ricircolata in testa all'impianto per garantire concentrazioni della biomassa ugualmente distribuita in tutto l'impianto. Poiché il processo produce con continuità una quantità di biomassa in eccesso rispetto alle esigenze depurative, una frazione dei solidi ispessiti viene rimossa periodicamente, in modo che non si abbia un eccesso di biomassa all'interno del reattore che potrebbe compromettere l'efficienza depurativa dell'impianto [18].

Constance permette di aumentare sia l'efficienza energetica che quella depurativa, controllando in linea il processo di denitrificazione che si svolge in vasca anossica e il processo di nitrificazione, che si svolge in vasca di ossidazione, acquisendo ed elaborando unicamente i segnali pH e ORP in vasca anossica, di pH e DO in vasca di ossidazione. L'uso dei segnali indiretti, quali pH, ORP e DO, direttamente correlabili con gli andamenti dei processi di denitrificazione e nitrificazione costituisce un'innovazione per gli impianti a flusso continuo convenzionali. Per modellare ed eseguire le politiche di gestione e le strategie di controllo si sono utilizzati modelli predittivi, realizzati utilizzando tecniche di machine learning per la classificazione e la regressione dei segnali, e sistemi a regole, mutuati dagli esperti del dominio, per implementare automaticamente le più opportune politiche di gestione. Il sistema così addestrato, infatti, è capace di riconoscere alcune situazioni note, estraendo le informazioni e le caratteristiche direttamente dai segnali, scegliere autonomamente l'azione di controllo da attuare più idonea, individuando anche stati di malfunzionamento, per i quali può agire in autonomia per ripristinarli, quando possibile, oppure segnalandolo all'esterno negli altri casi. Il montaggio di Constance, non richiede modifiche strutturali all'impianto, ma solo l'installazione dei seguenti componenti, come indicato nel layout dell'impianto di figura 4:

- Un sensore per la misura del segnale di pH e uno per la misura del segnale di ORP in vasca di pre-denitrificazione.
- Un sensore per la misura del segnale di pH e uno per la misura del segnale di DO in vasca di ossidazione.
- Un invertitore di frequenza per permettere la variazione della potenza del compressore e uno per permettere la variazione della portata della pompa di ricircolo della miscela aerata.

- Un computer embedded in cui installare il controllore che dovrà comunicare con il PLC dell'impianto, se presente, utilizzando un protocollo industriale standardizzato (MODBUS). Lo scambio dati tra le due unità avverrà tramite un registro scambio dati (MODBUS), sul quale saranno memorizzate tutte le informazioni necessarie al funzionamento dell'impianto controllato da Constance.



**Figura 4.** Layout del controllore installato sull'impianto

L'architettura del sistema è basata su ESB (Enterprise Service Bus), un middleware di comunicazione tra componenti eterogenei, utilizzato anche per sistemi distribuiti in rete, permette di implementare le seguenti funzionalità:

- Misurare e acquisire tutti i segnali provenienti dai sensori dislocati in campo.
- Impostare le regolazioni dei componenti controllati automaticamente, secondo le condizioni operative definite dal controllore in accordo con le politiche di gestione.
- Memorizzare le serie temporali dei segnali acquisite, garantendone la persistenza in previsione di un loro utilizzo a breve, medio e lungo termine.
- Garantire la funzionalità del sistema abilitando opportune procedure di sicurezza ed autenticazione degli accessi dall'esterno.
- Implementare le logiche e le strategie di controllo definite nel controllore, eseguendo tutti gli algoritmi di machine learning, sistemi a regole e fuzzy logic progettati, garantendo funzionalità di diagnosi, fault detection e supporto alle politiche decisionali.

Il sistema permette di monitorare e controllare in linea il processo di denitrificazione, che si svolge in vasca anossica, e il processo di nitrificazione, che si svolge in vasca di

ossidazione, acquisendo ed elaborando unicamente i segnali pH e ORP. In particolare, per il processo di denitrificazione sono stati individuati 3 campi di funzionamento, di cui 2 anomali ed uno normale, identificabili attraverso l'elaborazione del segnale di ORP. Tramite il monitoraggio della dinamica del segnale di pH è possibile, invece, controllare la transizione tra le diverse condizioni di funzionamento anomalo a quella di corretto funzionamento, modulando opportunamente la portata di ricircolo interno. Il primo campo di funzionamento anomalo, denominato "ossidato", caratterizzato da un valore di ORP positivo, indica un processo di denitrificazione non completato, dovuto principalmente al fatto che una parte degli NOx (nitrati e/o nitriti) presenti in vasca non sono stati ridotti a N<sub>2</sub>. Il secondo campo di funzionamento anomalo, denominato "anaerobico", è caratterizzato da valori di ORP molto negativi. In tali condizioni operative, dovute principalmente alla presenza di sostanza organica biodegradabile (bCOD) in eccesso, l'ambiente è fortemente riducente e le forme azotate ossidate sono insufficienti a ossidare il bCOD. Il campo di corretto funzionamento, caratterizzato da valori di ORP negativi (normalmente tra -200mV e -50mV), è denominato "anossico" ed è caratterizzato da concentrazioni di NOx prossime a zero, dovuto ad un corretto e bilanciato rapporto tra bCOD e azoto totale presente nel refluo in ingresso.

Anche il processo di nitrificazione può essere monitorato acquisendo unicamente il segnale di pH e controllato agendo sulla portata del compressore che immette aria in vasca, responsabile di circa il 60% dei consumi energetici complessivi, in funzione del valore del DO misurato in vasca. Essendo l'ingresso tipico degli impianti medio-piccoli di trattamento per reflui civili caratterizzato da un'alta variabilità in termini di portata e di carico inquinante, il carico in ingresso è stato discretizzato in tre andamenti prestabiliti: alto carico (il mattino), medio carico (il pomeriggio) e basso carico (la notte). L'analisi in continuo del segnale di pH in vasca garantisce il rilevamento della conclusione di ogni fase di carico e il corrispondente inizio della successiva, mentre una semplicissima politica di gestione permette il controllo differenziato del sistema di aerazione. Tale politica prevede il controllo con un regolatore PID sull'ossigeno disciolto, a set-point variabile, il cui valore sarà maggiore quando il carico è elevato, mentre sarà opportunamente diminuito in maniera proporzionale quando il carico è medio e basso. Tale politica di controllo è stata implementata mutuando il controllo del sistema di aerazione con due regolatori PID in cascata, uno con set point sulla misura del DO e l'altro sulla misura dell'azoto ammoniacale, ad oggi considerato il più efficiente sia in termini energetici che di processo [16]. Un'opportuna attività di simulazione ha permesso di ricavare i valori di set-point del DO in funzione dei carichi di azoto ammoniacale in ingresso, divisi per fasce di carico. Infatti, studi recenti hanno dimostrato che il controllo del sistema

di areazione con PID a set-point costante può portare a risparmi tra il 30 e il 50%, mentre controlli più spinti, come il regolatore PID in cascata con set-point sul livello di ammoniaca, simile al controllo a set-point variabile da noi proposto, può fare risparmiare un altro 15% in termini di energia [17].

### 3 MATERIALI E METODI

#### 3.1 IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI GRANAROLO DELL'EMILIA

L'impianto ha una potenzialità di 9500 AE, una portata giornaliera di progetto pari a 2400 m<sup>3</sup>/d ed è composto di due linee. Un partitore in testa all'impianto divide le portate in 65% per la linea 1 e 35% per la linea 2, per cui la potenzialità di trattamento della linea 1 è pari a 6.175 AE, mentre quella della linea 2, sulla quale è stato installato Constance, è pari a 3.325 AE. La vasca di pre-denitrificazione della linea 2 ha un volume di circa 208,5 m<sup>3</sup>, una portata media in ingresso pari a 33,25 m<sup>3</sup>/h, una portata di ricircolo dei fanghi pari a 33,25 m<sup>3</sup>/h, con una portata di ricircolo della miscela aerata prevista di 24,39 m<sup>3</sup>/h e una vasca di ossidazione con un volume di 489 m<sup>3</sup>. In figura 5 è mostrata la planimetria dell'impianto.

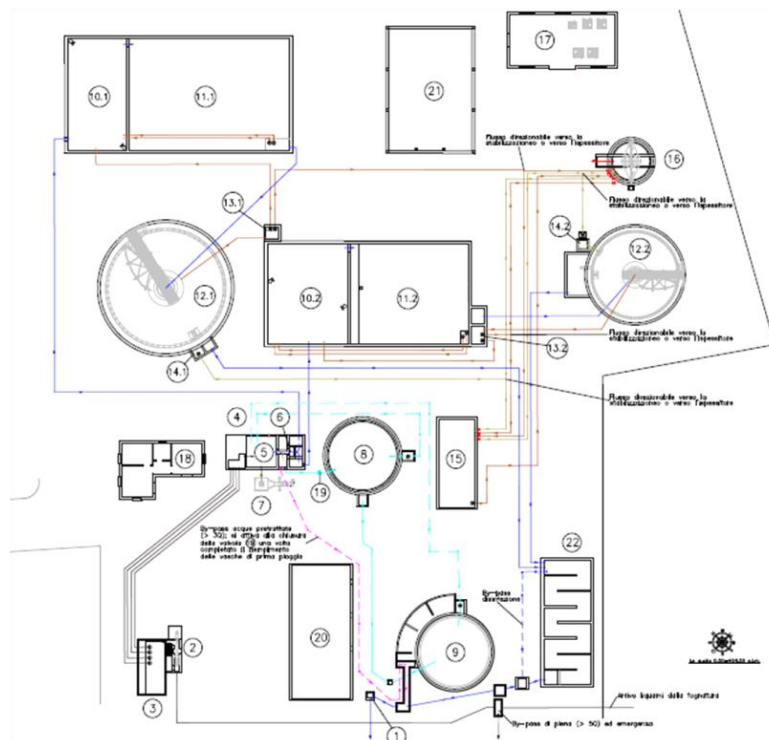


Figura 5. Flussi e planimetria impianto di Granarolo

#### 3.2 SENSORI, SEGNALI ACQUISITI E CONTROLLATI

L'attività di monitoraggio prevede l'acquisizione dei segnali provenienti dai due sensori digitali combinati pH/redox, modello Memosens CPS16D di marca Hendress Hauser,

installate da Hera ex-novo appositamente una in vasca anossica e una in vasca di ossidazione della linea 2, più tutte le misure già disponibili, messe in condivisione da Hera con protocollo ModBus [14] in appositi registri del PLC di controllo, in conformità con la tabella 1. In tabella 2 sono presentati, invece, alcuni dei segnali controllati direttamente da Constance, sempre tramite appositi registri ModBus.

**Tabella 1.** Segnali acquisiti da Constance.

Nome	Sigla	Formato
pH vasca anox	sAnPh	float 32 bit
Redox vasca anox	sAnOrp	float 32 bit
pH vasca ox.	sOxPh	float 32 bi
Redox vasca ox.	sOxOrp	float 32 bit
DO vasca ox.	sOxDo	float 32 bit
Temperatura vasca	sT	float 32 bi
Portata ingresso	sQin	Int 16 bit
Frequenza inverter compressore linea 2	sFrAir	Int 16 bit
Set Point DO	sSetPointDo	Int 16 bit

**Tabella 2.** Segnali controllati da Constance

Comando di marcia compressore linea 2	aOnAir	Bool
Comando marcia pompa ricircolo int. 1	aOnQir1	Bool
Comando pronto controllore Enea	aReadyControl	Bool
Set-point PID Ossigeno disciolto	aSetPointDo	Int 16 bit
Tipo di carico	TypeLoad	Int 16 bit
Stato denitrificazione	StateDen	Int 16 bit
Heart bit	aHeart	Int 16 bit

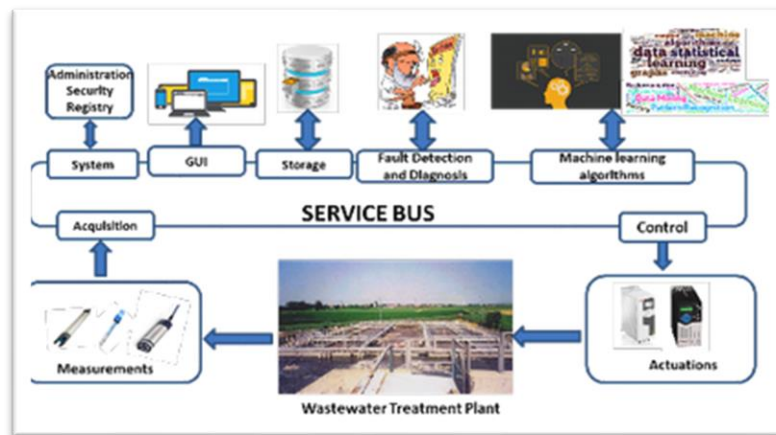
### 3.3 ARCHITETTURA SOFTWARE

Il computer industriale utilizzato per l'implementazione del controllore è di marca Neousys modello Nuvo-5000Lp ed è stato installato in un apposito quadro nella casetta in appoggio all'impianto, come visualizzato in figura 6. Per garantire al sistema di controllo caratteristiche di economicità, modularità, scalabilità, integrazione ed interoperabilità per l'implementazione del controllore è stata utilizzata un'architettura software di tipo Service Oriented Architecture (SOA), che risolve le difficoltà dovute all'integrazione tra moduli e l'applicazione del sistema su più impianti distribuiti. L'architettura [12], rappresentata in figura 7, è basata su ESB (Enterprise Service Bus), un middleware di integrazione tra moduli eterogenei, ognuno corrispondente all'esecuzione di determinati servizi, riguardanti, tra gli altri, l'acquisizione dati, il controllo e la regolazione di pompe e soffianti, la memorizzazione persistente dei dati, la gestione remota del sistema, l'implementazione delle politiche

decisionali e delle logiche di controllo basate sull'analisi dati effettuata con opportune tecniche di machine learning.



**Figura 6.** Installazione in campo del controllore



**Figura 7.** Architettura del controllore

### 3.4 SOFTWARE PER L'ELABORAZIONE DEI DATI

Tutta l'analisi numerica dei dati è stata effettuata utilizzando la piattaforma di sviluppo PyCharm e Jupyter, basati entrambi su linguaggio di programmazione Python, utilizzando le librerie Pandas, Numpy e Scipy per il data-processing, Matplotlib per la produzione dei grafici e Scikit-Learn per la classificazione e gli algoritmi di machine learning in genere.

PyCharm Community Edition è la versione gratuita di un Integrated Development Environment (IDE) per Python, installabile in computer operanti con Windows, Mac e Linux e non richiede risorse stringenti per il suo corretto funzionamento.

Il debugger grafico interno a PyCharm Community Edition consente di elaborare progetti sviluppati in Python per individuare la presenza di errori al fine di correggerli. L'ispezione del codice avviene con i tipici strumenti degli editor di programmazione, grazie specialmente a funzioni avanzate di ricerca. Si riescono infatti con immediatezza ad individuare le stringhe d'interesse, ad esempio per eliminare duplicati o rimpiazzare blocchi di codice. L'interfaccia, pur nella sua inevitabile parziale complessità, è personalizzabile dall'utente così da adattarla alle più diverse esigenze d'utilizzo. È disponibile anche una versione professionale, la quale estende le funzionalità in termini di gestione ed elaborazione del codice.

Jupyter è un'applicazione web, eseguibile quindi online con un browser, open source, che permette di creare e condividere documenti contenenti comandi python direttamente eseguibili, equazioni e testo. Può essere usato per la pulizia e la trasformazione dei dati, la



simulazione numerica, la modellazione statistica, la visualizzazione dei dati e il machine learning.

Inizialmente era stata adottata Anaconda, una piattaforma di sviluppo open source, che permette l'installazione e la gestione integrata di più di 1400 package per la raccolta e l'analisi di dati scientifici tramite Python e R tra cui Spyder, un ambiente di sviluppo scientifico per Python, progettato da e per scienziati, ingegneri e analisti, che offre funzionalità avanzate per l'editing, l'analisi e il debugging combinate con un tool di sviluppo che permette una completa e approfondita esplorazione dei dati, l'esecuzione interattiva e una piacevole presentazione dei dati.

### 3.5 PULIZIA E CALCOLO DIFFERENZIALE NUMERICO DEI SEGNALI

I segnali acquisiti in campo sono risultati essere tutti molto rumorosi, tanto da non potere essere analizzati con le tecniche di regressione messe a punto appositamente in precedenza, basate su finestre mobili. Per questo motivo è stato messo a punto un algoritmo di pulizia dei segnali basato sulla tecnica total-variation regularization [13], che permette anche di calcolare direttamente anche la derivata del segnale. Tale algoritmo (implementato in Python), è risultato molto utile ed è stato utilizzato per tutte le analisi numeriche presentate di seguito nel report.

## 4 RISULTATI E ANALISI DATI

### 4.1 PROCESSO DI DENITRIFICAZIONE

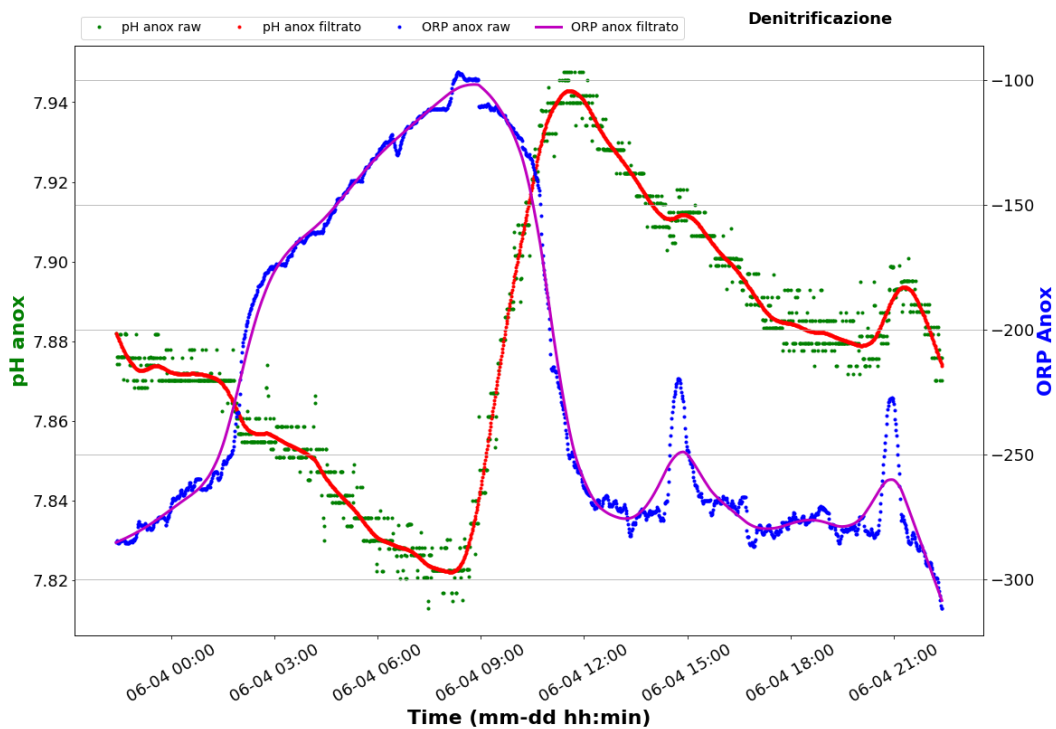
Durante il processo di denitrificazione i composti ossidati dell'azoto ( $N-NO_2^-$  e  $N-NO_3^-$ , identificati di seguito in maniera generica come  $N-NO_x^-$ ) vengono ridotti ad azoto molecolare ( $N_2$ ) in fase gassosa che viene rilasciato in atmosfera. Il processo è riduttivo ed è caratterizzato, in condizioni di funzionamento corretto a regime, da valori del segnale di ORP stabili, caratterizzati da valori di derivata circa nulli, compresi tra  $-250mV$  e  $-50mV$ , tipicamente  $-150 mV$ . In generale, a condizioni stazionarie del processo di denitrificazione corrispondono andamenti stazionari del segnale di ORP, il quale si mantiene nell'intorno di valori che sono funzione dello stato raggiunto dal sistema e che sono indicati e descritti in tabella 3.

**Tabella 3.** Condizioni di funzionamento processo di denitrificazione

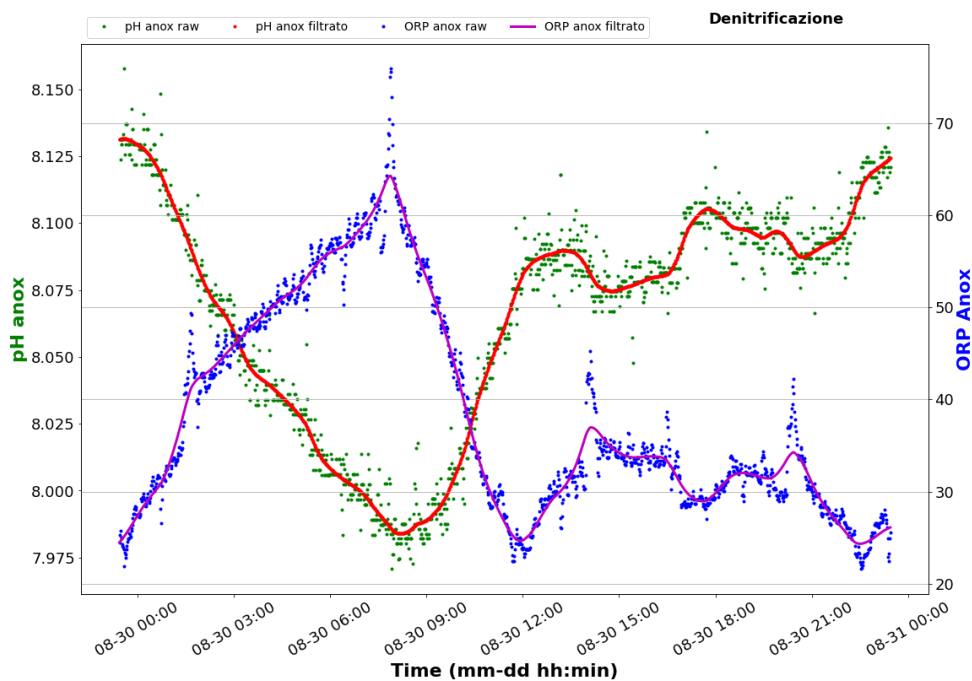
1	<b>Condizione operativa anomala 'Ossidativa'</b>	ORP $\gg 0 mV$ (solitamente intorno ai $100mV$ ), corrispondente a: <ul style="list-style-type: none"><li>• concentrazioni di <math>NO_x^- &gt; 0 mg/l</math></li></ul>
---	--	---

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• carenza di substrato biodegradabile (bCOD) rispetto a sostanze azotate presenti in vasca da denitrificare o diminuzione della velocità di denitrificazione in relazione al carico di <math>\text{NO}_x</math> ricircolato alla vasca di predenitrificazione.</li> </ul>
2	<b>Condizione operativa anomala 'Anaerobica'</b>	<p>ORP <math>\ll</math> 0 mV (~-250 mV fino ~- 400 mV) corrispondente a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{NO}_x^- = \sim 0 \text{ mg l}^{-1}</math></li> <li>• Eccesso di bCOD rispetto a sostanze azotate presenti in vasca da denitrificare</li> </ul>
3	<b>Condizione operativa attesa 'Anossica'</b>	<p>ORP <math>&lt;</math> 0 mV (~-250 mV fino ~- 50 mV) corrispondente a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{NO}_x^- = \sim 0 \text{ mg l}^{-1}</math></li> <li>• rapporto corretto tra bCOD e sostanze azotate presenti in vasca da denitrificare</li> </ul>

Diversamente, il segnale di pH fornisce informazioni dirette riguardo l'evoluzione dinamica del processo di denitrificazione, che tipicamente si manifestano quando il sistema tende a passare da una condizione operativa ad un'altra. Quindi, l'analisi combinata dei due segnali acquisiti in tempo reale permette di individuare e mettere in atto adeguate strategie di controllo per mantenere il processo sempre in condizioni di funzionamento corretto, come confermato dai dati acquisiti in fase di monitoraggio dell'impianto reale. Tali condizioni sono contraddistinte da valori di ORP in vasca anossica compresi tra -100 e -200 mV. Diversamente, valori positivi (tipicamente sopra 50 mV), visibili negli andamenti mostrati in figura 9, e valori molto negativi (tipicamente inferiori a -250 mV), raggiunti più volte nell'andamento di figura 8, di ORP coincidono entrambi a condizioni di funzionamento non ottimale per il processo di denitrificazione, per le quali è possibile intervenire con azioni di controllo mirate. Quando l'ORP assume valori stabilmente positivi, parliamo di condizioni ossidate, in quanto un processo di denitrificazione non completo lascia residui non trascurabili di nitrati e/o nitriti in vasca, compromettendo l'efficienza di rimozione dell'impianto. In questo caso si potrebbe intervenire riducendo opportunamente la portata del ricircolo interno, fino ad un valore facilmente riconoscibile utilizzando una politica di controllo che prevede il pH come variabile controllata. Nel secondo caso, i valori molto negativi di ORP coincidono con un elevato rapporto COD/TN in ingresso, tale da lasciare in vasca concentrazioni significative di COD, che passerà in vasca di ossidazione, dove dovrà essere ossidato con conseguente aumento dell'energia consumata dal compressore. Tale condizione può essere corretta aumentando la concentrazione di nitrati riciccolati, ottenibile aumentando la portata di ricircolo di miscela areata. Anche questa politica di controllo della pompa di ricircolo può essere attuata, utilizzando sempre il pH quale variabile controllata.



**Figura 8.** Valori corretti di pH e ORP in vasca anossica.  $-100\text{mV} < \text{ORP} < -300$



**Figura 9.** Valori non corretti di pH e ORP in vasca anossica.  $\text{ORP} > 0 \text{ mV}$

Esaminando la figura 8, possono essere aggiunte ulteriori osservazioni:

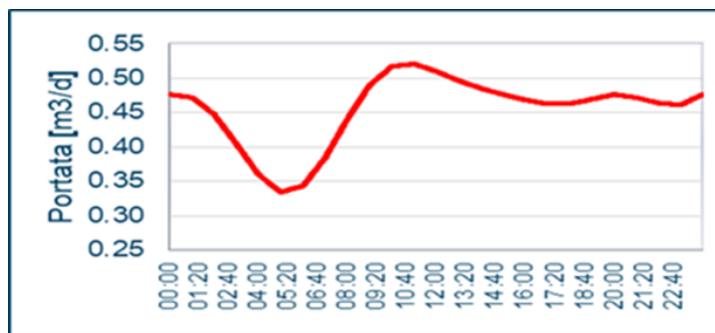
- a. risulta evidente il completo svolgimento del processo di denitrificazione quando, a valle di un aumento evidente del segnale di pH, si individua una repentina discesa del segnale di ORP, in concomitanza con l'inizio dell'alto carico, che adduce all'impianto alte concentrazioni di COD prontamente biodegradabile. La certezza che tale volume di COD

è sufficiente a rimuovere completamente la concentrazione di NO<sub>x</sub>si desume dal fatto che il segnale di pH raggiunge un massimo assoluto per poi discendere, mentre il segnale di ORP raggiunge valori molto negativi.

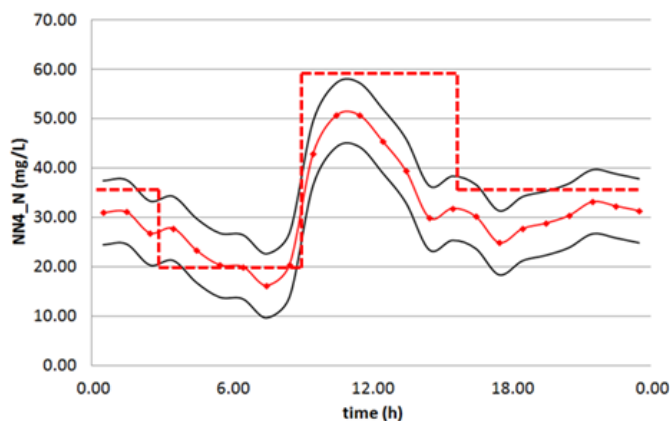
- b. il segnale di ORP supera più volte e per un intervallo di tempo abbastanza lungo il valore di -250mV. Questo significa che il COD in ingresso è alto rispetto il fabbisogno ideale dell'impianto e il sistema, come descritto in tabella 1, raggiunge condizioni anaerobiche. Tali condizioni permetterebbero di aumentare l'efficienza di rimozione dell'impianto se solo si potesse aumentare opportunamente la portata di ricircolo interno.

## **4.2 PROCESSO DI NITRIFICAZIONE**

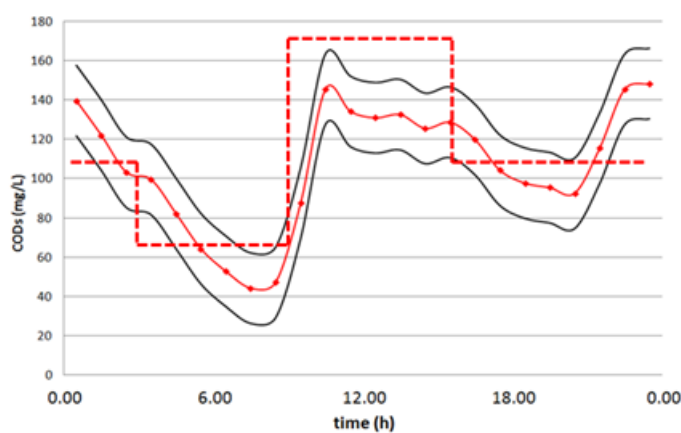
La caratteristica principale degli impianti di depurazione municipali, soprattutto quelli medio-piccoli, è rappresentata dagli andamenti giornalieri della portata e delle sostanze inquinanti in ingresso, che si ripetono ciclicamente. Nelle figure 10, 11 e 12 sono mostrati gli andamenti tipici giornalieri di portata influente (figura 10), azoto ammoniacale (figura 11) e COD (figura 12) in ingresso agli impianti di depurazione. Tali caratteristiche evidenziano che ci sarà un picco nel processo di nitrificazione in vasca di ossidazione, dovuto al picco di ammoniaca in arrivo all'ora di punta (tipicamente la mattina ad orario variabile), cui seguirà una diminuzione della produzione di nitrati nel pomeriggio, che sarà sempre più decisa fino ad arrivare ad un minimo in corrispondenza delle ore notturne. In particolare, l'andamento giornaliero dell'azoto totale è scomponibile idealmente in tre livelli di carico azotato, identificati come alto carico, medio carico e basso carico. Secondo questa scomposizione il processo di nitrificazione passa, ciclicamente ed ininterrottamente, da condizioni con basso carico di azoto totale in ingresso nelle ore notturne, a condizioni di alto carico il mattino, per poi passare a condizioni di medio carico, nelle ore pomeridiane. Tali transizioni avvengono in orari variabili, ma rilevabili grazie il monitoraggio dei segnali pH e DO, i cui andamenti temporali sono direttamente riconducibili agli andamenti dei segnali di riferimento diretti.



**Figura 10.** Andamento giornaliero portata



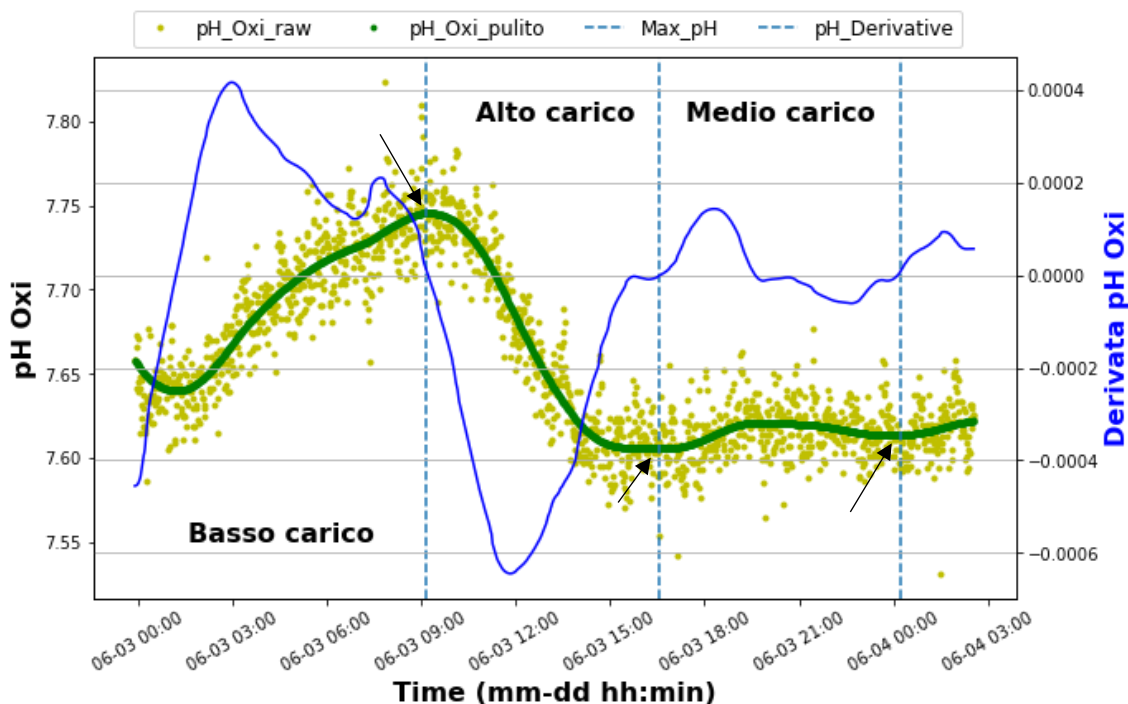
**Figura 11.** Andamento giornale azoto ammoniacale



**Figura 12.** Andamento giornaliero COD

Entrando nel dettaglio, la politica attuata per il controllo dell'insufflazione di ossigeno in vasca di ossidazione prevederà un controllore PID che regola la portata del compressore tramite inverter, utilizzando il DO come variabile controllata e fissando il set-point a un valore (variabile) che sarà funzione della fascia di carico giornaliera assegnata, distinguibile appunto in alto, medio o basso carico. All'ingresso della fascia di alto carico il set-point del DO sarà fissato a 2 mg/l, all'ingresso della media 1.5 mg/l e 1 mg/l se la fascia è di basso carico. In figura 13 è mostrato l'andamento del segnale di pH rilevato

nella giornata del 3/6/2018 in vasca di ossidazione, mentre in figura 14 è mostrato l'andamento del segnale di DO relativo lo stesso giorno.



**Figura 13.** Andamento segnale di pH in vasca di ossidazione

Prendendo le figure come riferimento e utilizzando per il controllo online il segnale di pH, la politica di controllo della vasca di aerazione prevede l'esecuzione dei seguenti passi, ipotizzando di partire in fascia giornaliera di basso carico all'inizio del giorno:

- a) Set-point DO regolatore PID impostato su 'BASSO CARICO' (1.0 mg/l).
- b) Individuazione dell'intorno dell'istante di inizio della fascia giornaliera di alto carico (punto A), intercettando il massimo nel segnale di pH, che coincide con l'azzerarsi della derivata prima dello stesso segnale e derivata seconda negativa.
- c) Impostazione del set-point DO regolatore PID 'ALTO CARICO' (2 mg/l).
- d) Individuazione del minimo nel segnale di pH, corrispondente all'azzerarsi della sua derivata prima (punto B) e derivata seconda positiva, corrispondente allo smaltimento del picco di carico.
- e) Impostazione del set-point DO regolatore PID 'MEDIO CARICO' (1.5 mg/l)
- f) Individuazione dell'ultimo minimo nell'andamento del segnale di pH, corrispondente allo zero nella derivata prima ad un minimo nella derivata prima del segnale (punto C) e ad una derivata seconda positiva nello stesso punto, indicatore di inizio del carico minimo del giorno.
- g) Impostazione del set-point DO regolatore PID 'BASSO CARICO' (1 mg/l).

h) Ritorno al punto b)

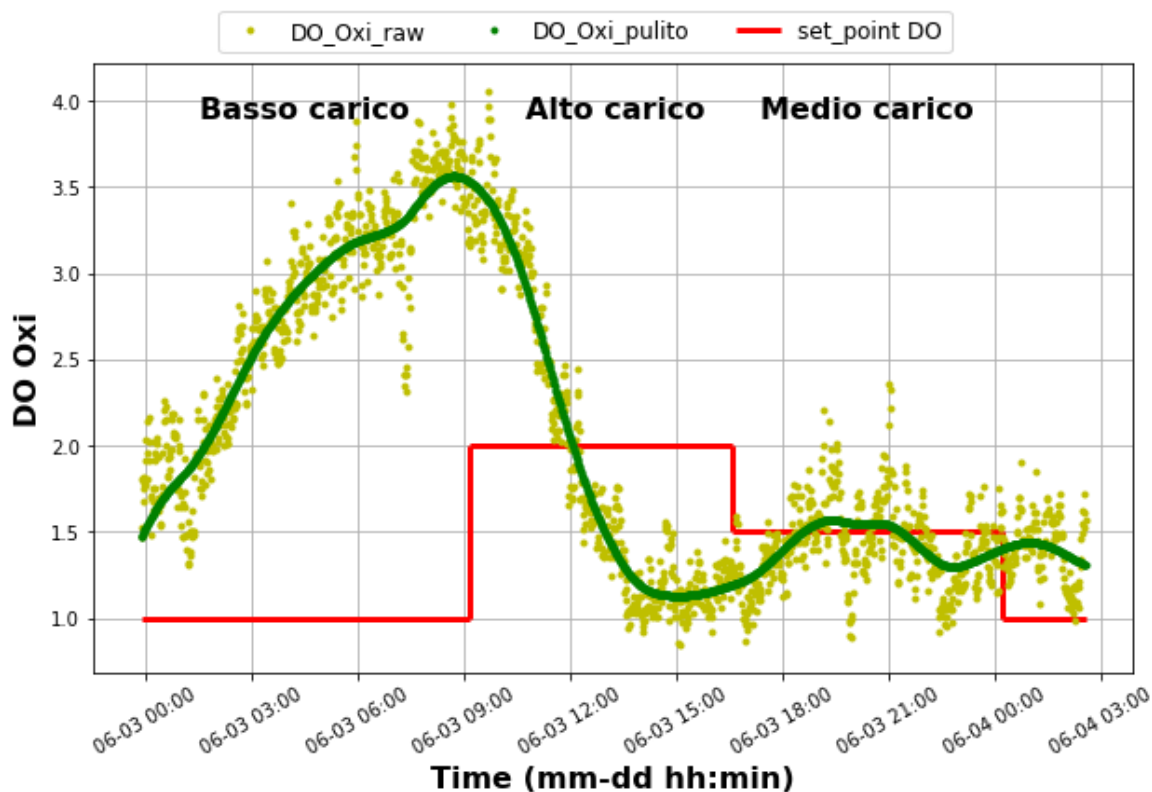


Figura 14. Andamento DO in vasca di ossidazione

Con l'attuazione di questa politica si può osservare in figura 14 quale sarebbe il risparmio energetico dovuto alla regolazione PID del compressore confrontando l'andamento reale del DO (linea verde) con quello che si avrebbe impostando valori di set-point del DO secondo le condizioni di carico in ingresso (linea rossa). Il risparmio energetico ottenibile con l'adozione di tale sistema di regolazione è notevole, soprattutto in corrispondenza delle ore notturne dove la richiesta di ossigeno da parte dei processi è molto bassa. In questo esempio specifico i punti caratteristici, che identificano i passaggi da una condizione di carico alla successiva avvengono alle ore 9:12 (inizio alto carico), alle ore 15:12 (inizio medio carico) e alle ore 00:20 (inizio basso carico). Nelle figure da 15 a 20 sono mostrati gli effetti dell'algoritmo che rileva in linea automaticamente i punti caratteristici per tutti e tre i tipi di carico. Tale algoritmo, oltre a rivelarsi efficace nel riconoscere tutte le condizioni di processo incontrate, ha mostrato robustezza, permettendoci di lavorare con segnali molto disturbati, quali sono quelli acquisiti sull'impianto in oggetto, come si può vedere dai grafici.

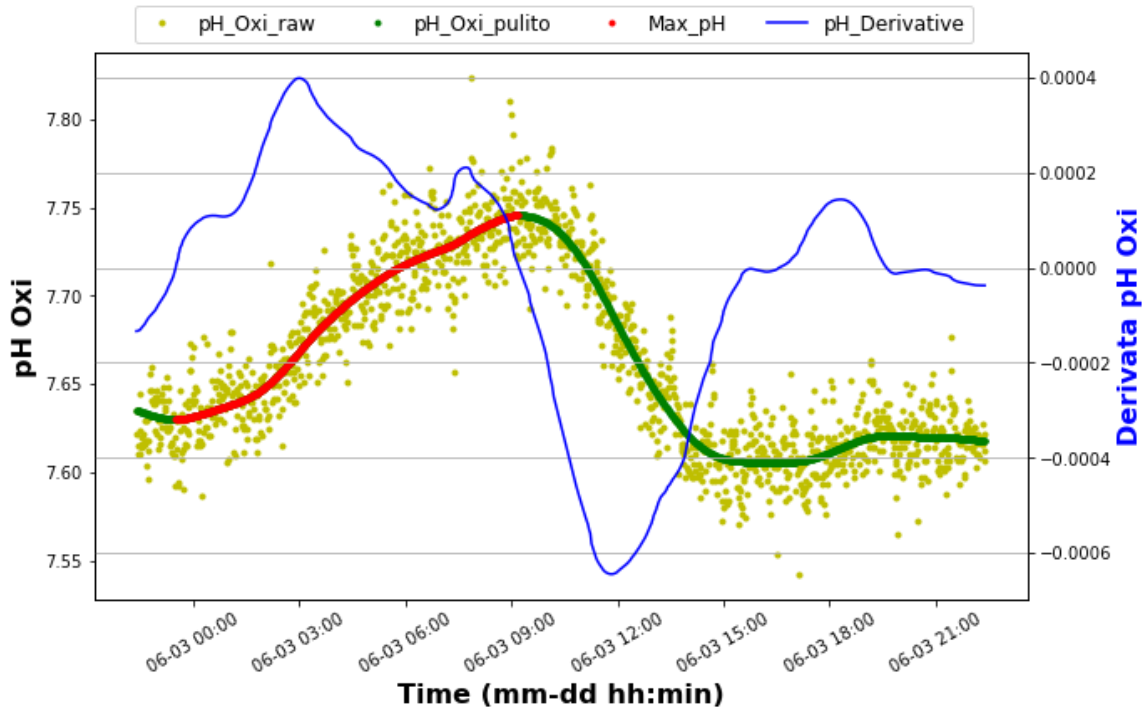


Figura 15. Riconoscimento fine basso carico

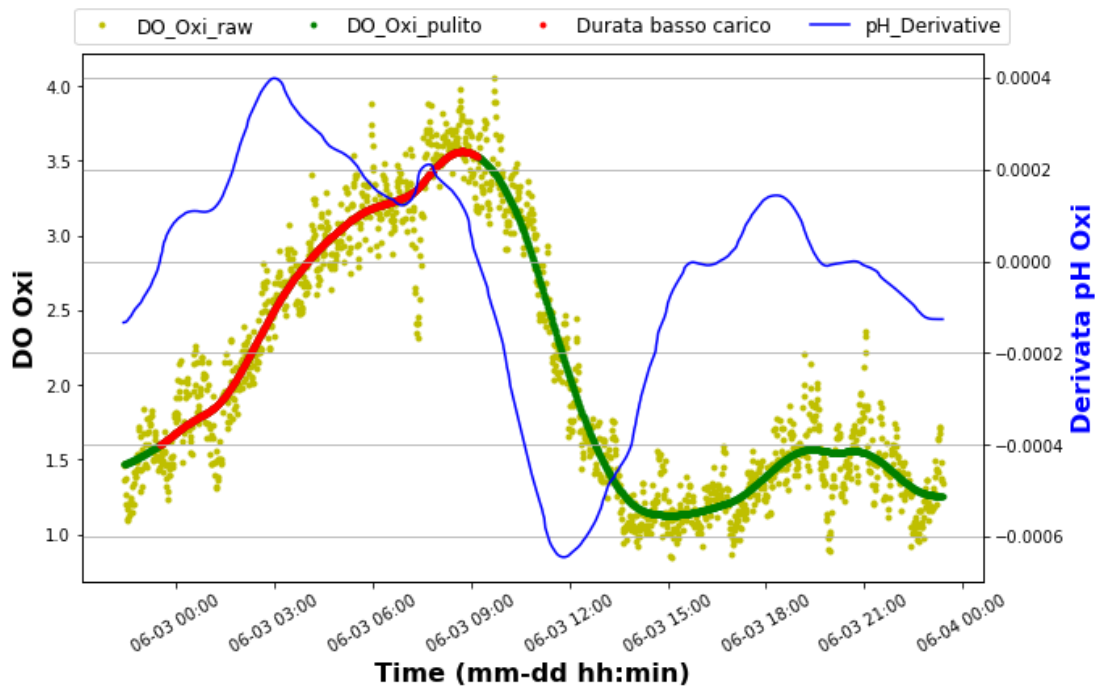


Figura 16. Andamento DO basso carico



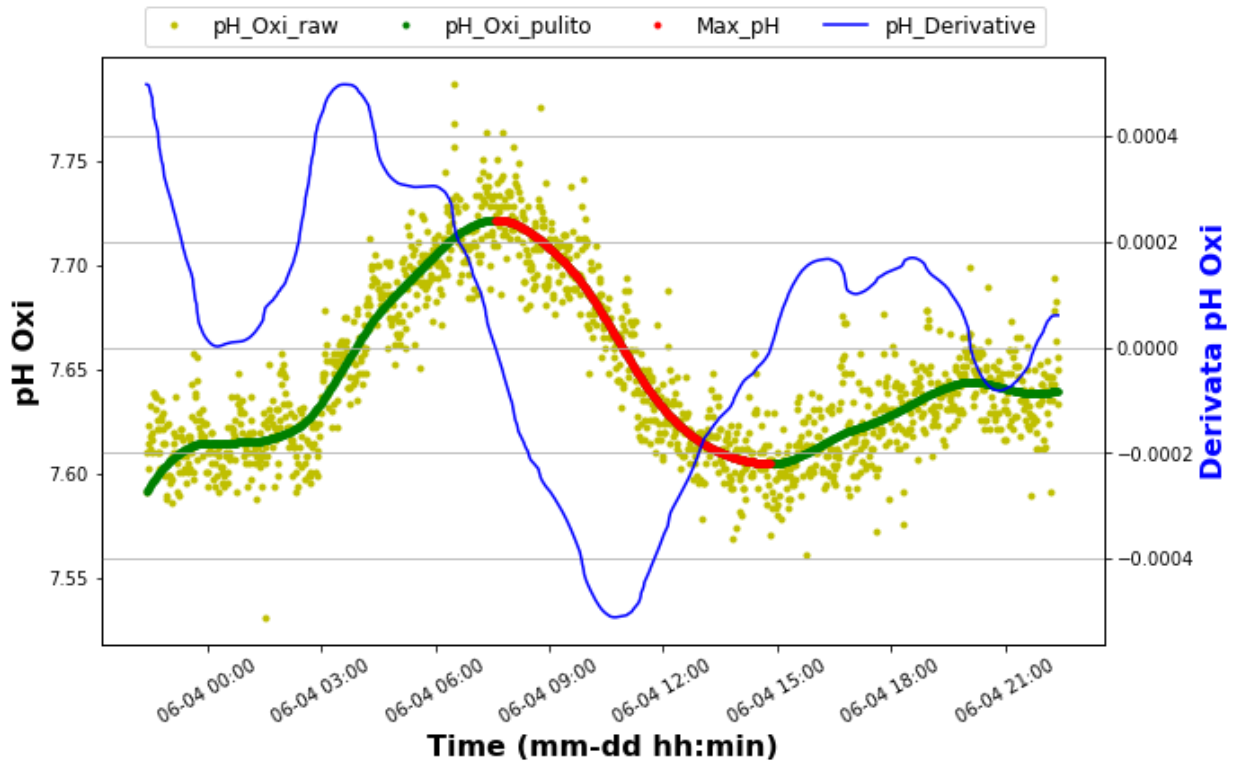


Figura 17. Riconoscimento fine alto carico

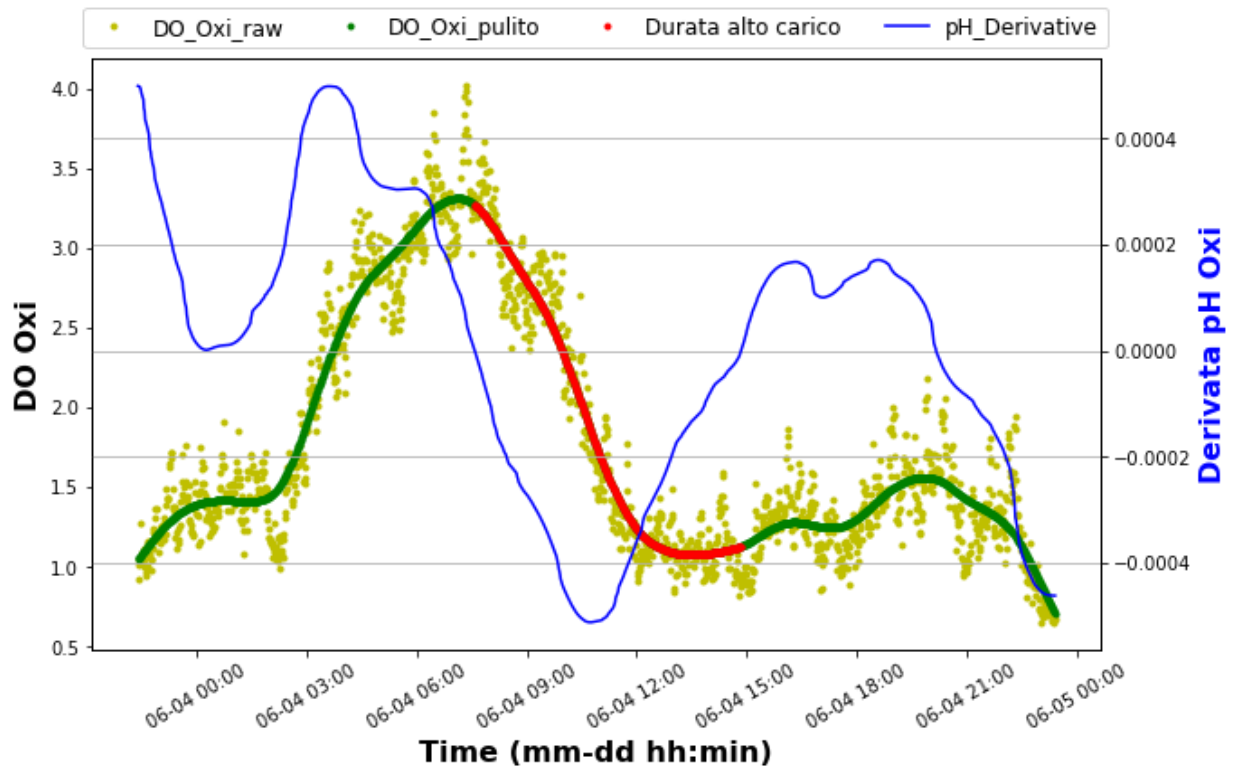


Figura 18. Andamento DO alto carico

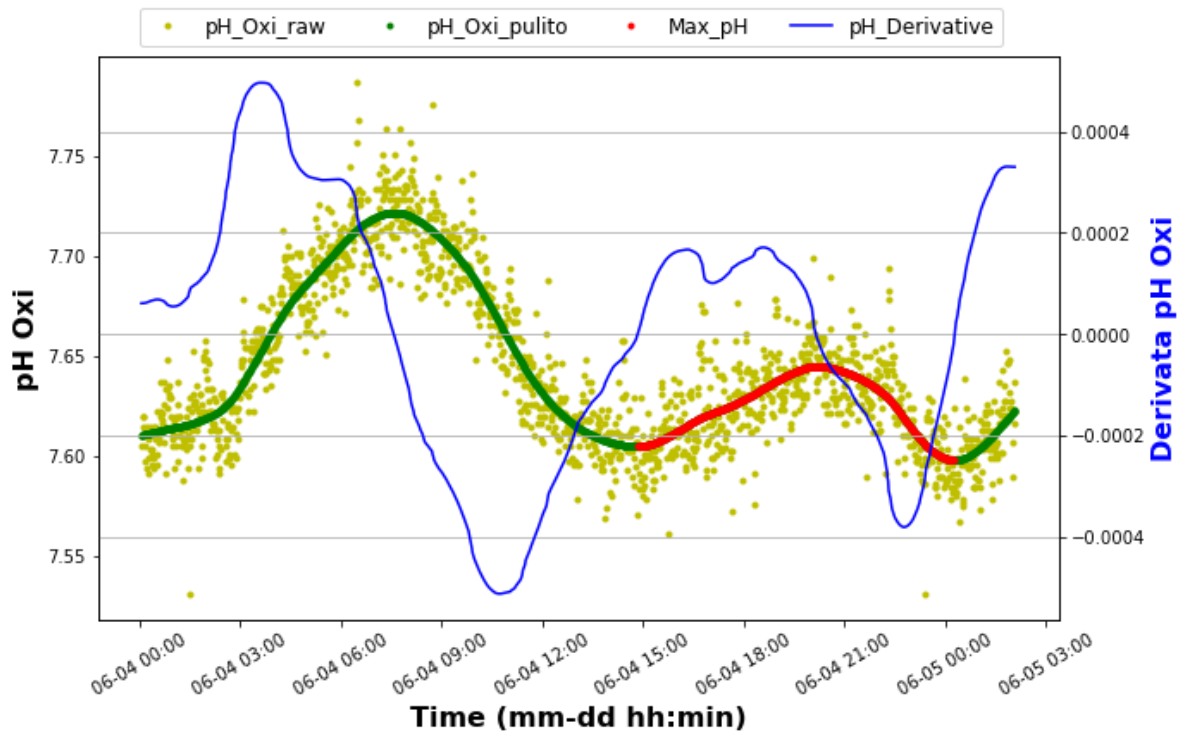


Figura 19. Riconoscimento fine medio carico

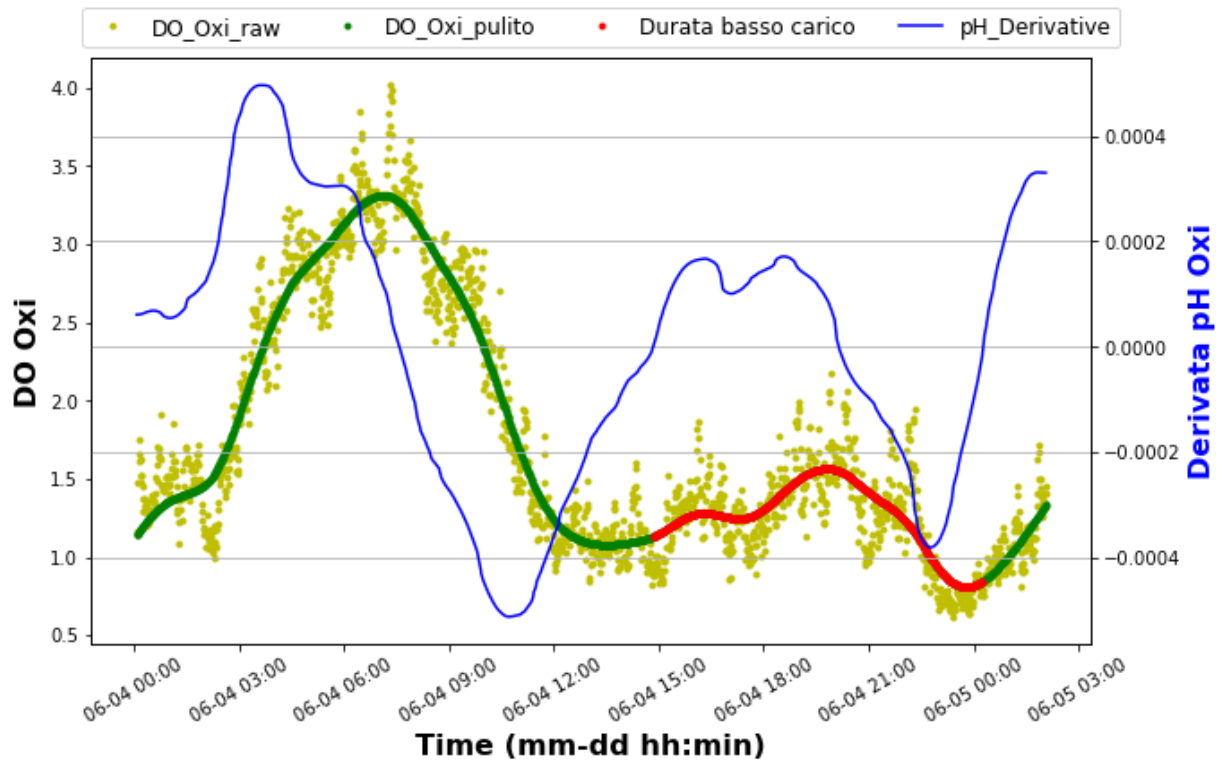


Figura 20. Andamento DO medio carico

I vantaggi ottenibili dal monitoraggio continuo dei segnali, oltre a permette una maggiore efficienza energetica e di rimozione degli inquinanti, permettono anche di mantenere costantemente il controllo dello stato operativo raggiunto dall'impianto in ogni istante.

Intercettare gli eventi esterni che possono causare malfunzionamenti o deviare lo stato dell'impianto verso stati non desiderati, permette di mantenere le condizioni operative dell'impianto sempre all'interno di range desiderati. Infatti, è molto più economico ed efficiente intervenire per correggere i malfunzionamenti nel momento in cui accadono, stimando le problematiche che potrebbero presentarsi, piuttosto che intervenire quando gli effetti di tali problematiche si sono già evidenziati. A titolo di esempio sono mostrati in seguito alcune situazioni tipiche presentatesi e descrivibili attraverso il monitoraggio e l'analisi dei segnali.

### **4.3 SVOLGIMENTO EFFICIENTE DEI PROCESSI**

Di seguito, nella figura multipla 21, sono presentati gli andamenti giornalieri dei segnali misurati nelle vasche relativi una giornata tipica, presa come esempio. Le dinamiche di tutti i segnali sono quelle attese e indicano uno svolgimento corretto di entrambi i processi. In particolare, in figura 21-a è rappresentata la portata in uscita alla linea 2, in figura 21-b è mostrato l'andamento del DO in vasca di ossidazione, in figura 21-c l'andamento del segnale di pH in vasca di ossidazione in fase di basso carico, in 21-d l'andamento del segnale di pH in vasca di ossidazione in fase di alto carico, in 21-e l'andamento del segnale di pH in vasca di ossidazione in fase di medio carico, mentre in 21-f gli andamenti di pH e ORP in vasca anossica. Riguardo questi ultimi è importante sottolineare che i valori di ORP sono sempre negativi e, come descritto in tabella 3, il processo di denitrificazione passa da condizioni anossiche (valori di ORP compresi tra -200 e -100 mV), a condizioni anaerobiche (valori di ORP inferiori a -250 mV). Per tutti i grafici valgono le considerazioni già state espresse nel paragrafo precedente. In figura 21-a la portata indica un evento di pioggia intenso (punto A), ma limitato nel tempo, che ha spostato leggermente le traiettorie dei segnali, ma non ha provocato effetti visibili sui processi. La durata dello stato di alto carico (ore 5:24), essendo decisamente inferiore a quelle di basso (ore 10:04) e medio carico (ore 8:19), permette di tenere alti i margini di risparmio energetico.

### 4.3.1 Dati 31 maggio 2018

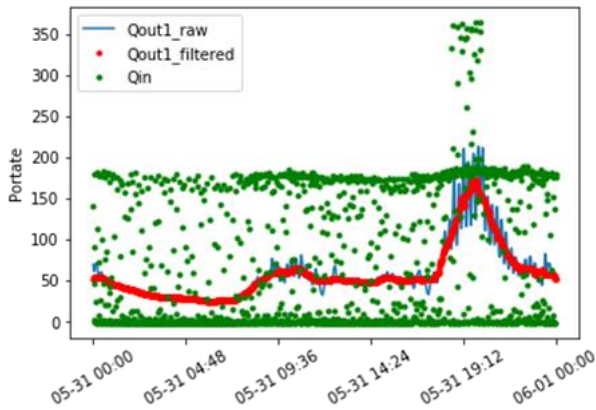


Figura 21-a. Portata giornaliera linea 2

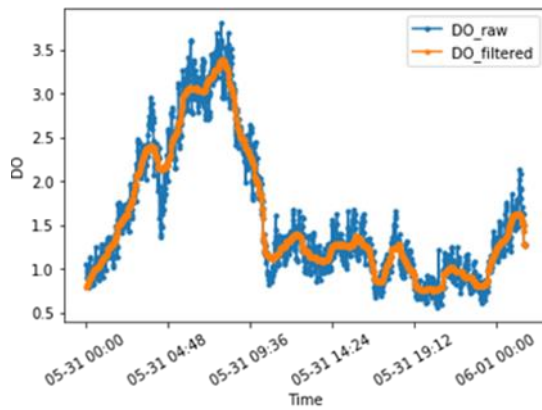


Figura 21-b. Andamento giornaliero DO

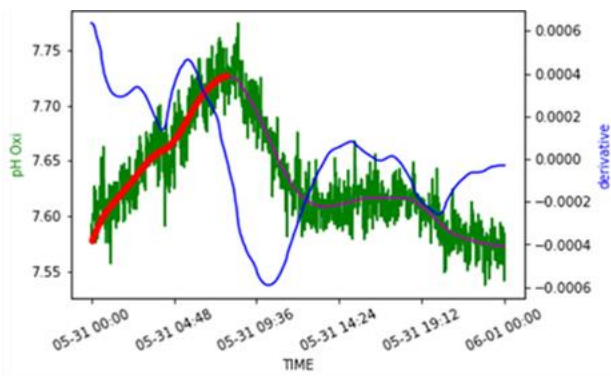


Figura 21-c. Stato Basso Carico

- Ora di uscita: 08:19
- Pendenza media pH= 0.0152906 pH/ora
- Durata Stato Basso Carico: 10:04 (hh:mm)

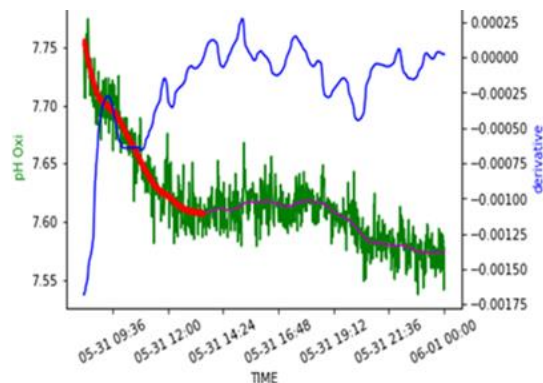


Figura 21-d. Stato Alto Carico

- Uscita ore 13:55
- Pendenza media pH= -0.0262175 pH/ora
- Durata Stato Alto Carico: 5:24 (hh:mm)

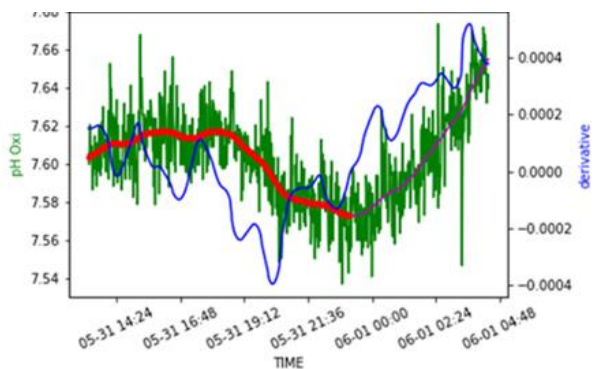


Figura 21-e. Stato Medio Carico - Durata 8:42

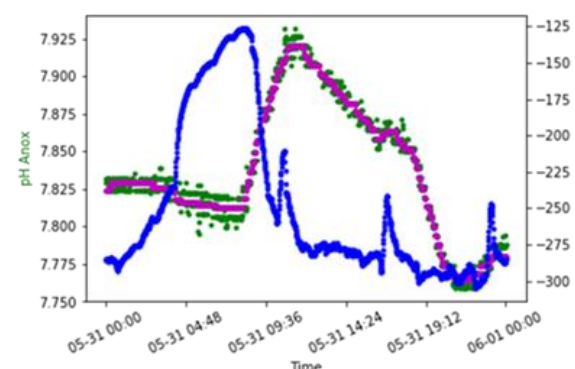


Figura 21-f. pH e ORP in vasca anossica

## 4.4 SVOLGIMENTO NON EFFICIENTE DEI PROCESSI

I segnali presentati nelle figure 22-a-b-c-d-e-f, pur essendo ancora significativi e riconoscibili negli andamenti tipici, cominciano a presentare caratteristiche di instabilità, dovute principalmente agli eventi di pioggia che si sono presentati nella giornata. Il volume di refluo caricato, infatti, è doppio di quello caricato nei giorni precedenti e gli effetti della diluizione

dovuta alla pioggia cominciano a farsi sentire. Al momento, la conseguenza più evidente è stata riscontrata nella fase di basso carico, in concomitanza con il contestuale evento di pioggia, dove il punto di massimo non è univocamente riconoscibile. Nei rimanenti andamenti i punti caratteristici sono ancora riconoscibili, ma occorre allertare il sistema che, se gli eventi di pioggia dovessero ripresentarsi, gli andamenti potrebbero non essere più riconoscibili.

#### **4.4.1 Segnali piatti dovuti a carico molto diluito per pioggia intensa e duratura**

Gli andamenti dei segnali presentati in figura 22 risentono dei lunghi eventi di pioggia intensa verificatisi nelle giornate precedenti, essendo praticamente piatti, hanno perso qualunque significatività e non sono più utilizzabili nel riconoscimento degli andamenti tipici. In questa situazione il sistema si assesterà in uno stato di funzionamento supervisionato, per il quale non è richiesto il riconoscimento degli andamenti, ma solo di mantenere il sistema in funzionamento costante, con set-point del DO che sarà funzione del carico inquinante. Tale situazione sarà mantenuta fino a quando i segnali non cominceranno a ripresentarsi con i loro andamenti caratteristici, ragionevolmente quando gli effetti della diluizione dovuti alla pioggia si esauriranno.

In particolare, possiamo trovare conferma del basso carico in ingresso dall'andamento della frequenza dell'inverter del compressore (figura 22-b), che è sempre in modulazione, confermato dall'andamento del DO che ha valori continui intorno il valore di set-point (figura 22-e). La pendenza del degnale di pH in vasca di ossidazione è praticamente nulla (figura 22-c), come anche quello del pH in vasca anossica che riduce la propria escursione tipica ( $pH_{iniziale} - pH_{finale}$ ) da valori superiori 0.25 unità pH a 0.06 unità pH (figura 22-d). Solo il potenziale redox in vasca anossica continua a mantenersi negativo, il che significa che le condizioni in vasca sono ancora anossiche (figura 22-f).

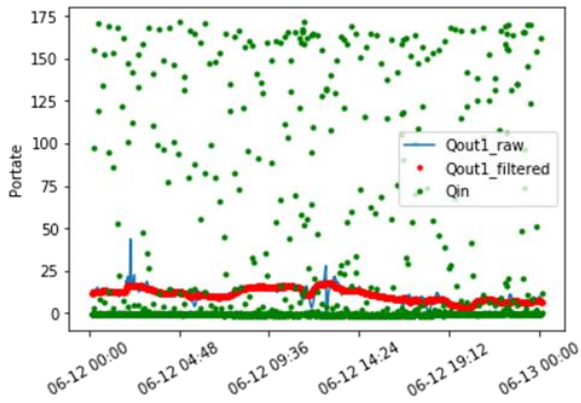


Figura 22-a. Andamento portata linea 2

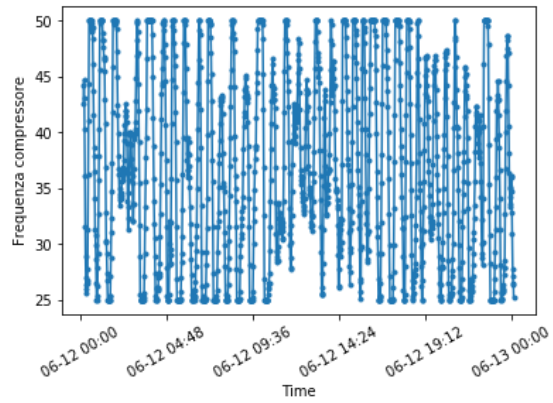


Figura 22-b. Frequenza compressore

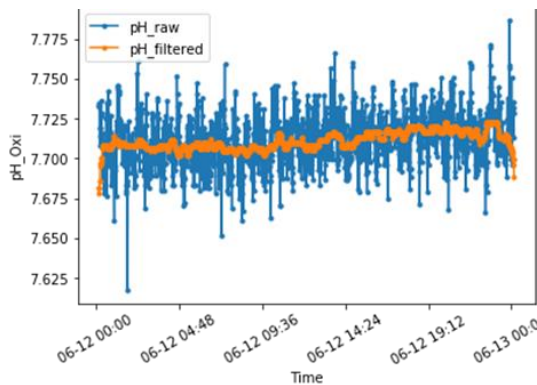


Figura 22-c. Andamento giornaliero pH oxid

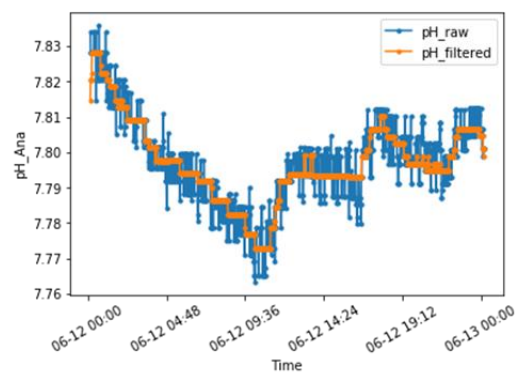


Figura 22-d. Andamento giornaliero pH anox

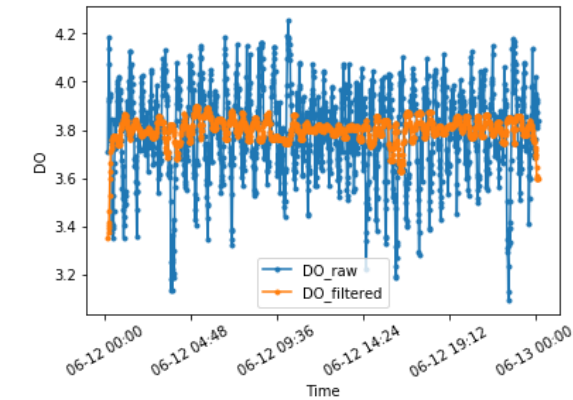


Figura 22-e. Andamento giornaliero DO

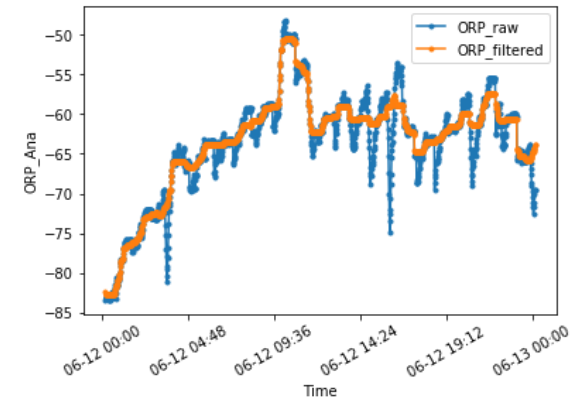


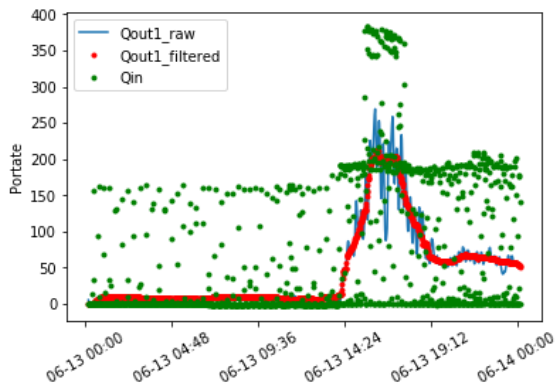
Figura 22-f. Andamento giornaliero ORP anox

#### 4.4.2 Eventi particolari rilevati tramite i segnali

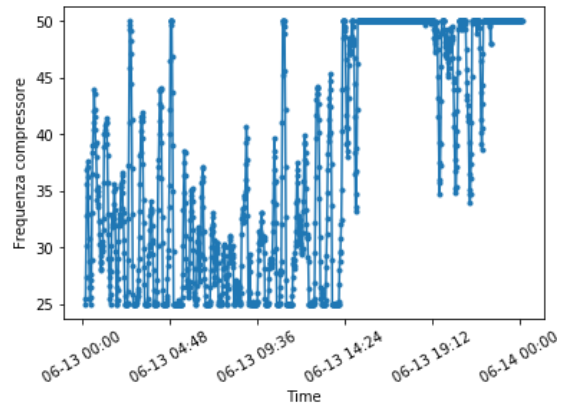
Il monitoraggio dei segnali ha permesso di intercettare in tempo reale e spiegare eventi che altrimenti sarebbero passati inosservati. In particolare, il 13 giugno, i cui andamenti sono mostrati in figura 23, è una giornata con segnali piatti dovuti a carico molto diluito per pioggia intensa e duratura, così come il 12 giugno (figura 22), caduta nei giorni precedenti. In questo caso, alle ore 14 circa, ad un notevole aumento improvviso della portata in uscita alla linea 2 (figura 23-a), corrisponde un incremento altrettanto elevato nei valori di pH in vasca



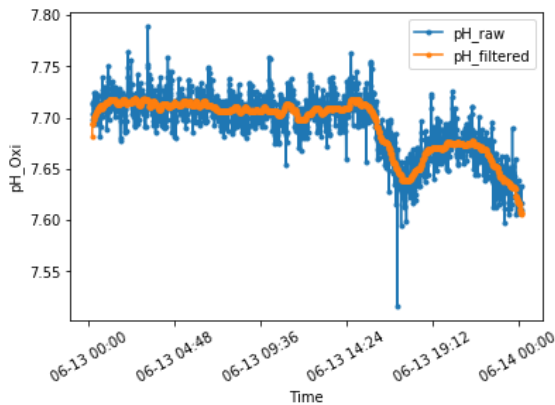
anossica (figura 23-d) e una diminuzione decisa nei valori di pH in vasca di ossidazione (figura 23-c), DO (figura 23-e) e ORP in vasca anossica (figura 23-f).



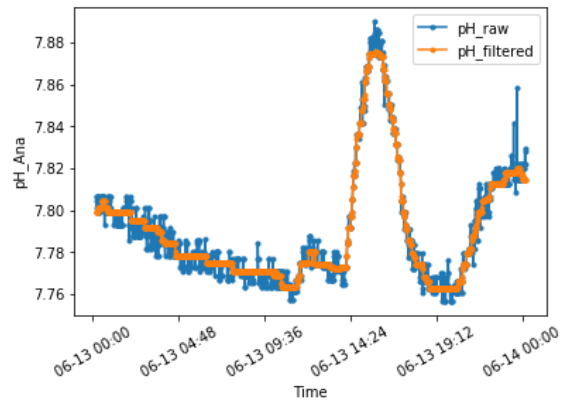
**Figura 23-a.** Aumento portata ore 14:30-15:422



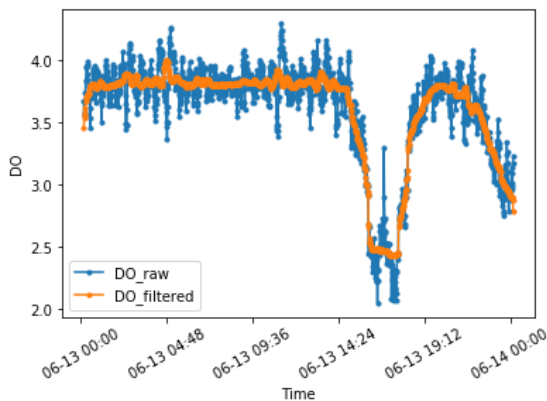
**Figura 23-b.** Andamento frequenza compressore



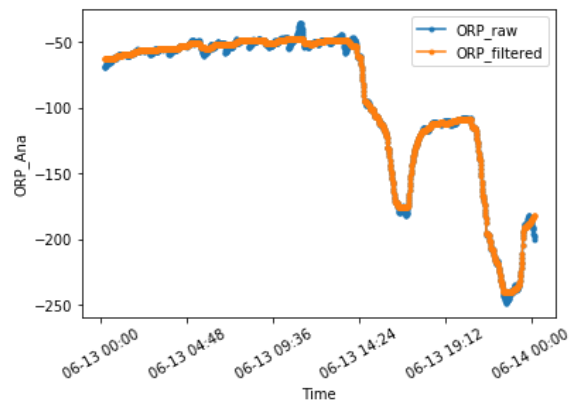
**Figura 23-c.** Andamento giornaliero pH oxid



**Figura 23-d.** Andamento giornaliero pH anox



**Figura 23-e.** Andamento giornaliero DO



**Figura 23-f.** Andamento giornaliero ORP anox

Come ipotesi più probabile si ritiene che ci sia stato uno scarico importante, in termini di volume, non autorizzato di refluo comunque non tossico, perché l'impianto ha trattato completamente il materiale immesso. Il processo di nitrificazione si è improvvisamente attivato, confermato dal segnale di pH in decrescente, maggiore consumo di ossigeno e

frequenza inverter al massimo per tutta la durata del picco di carico. Anche il processo di denitrificazione ha avuto un picco di attività, testimoniato dall'aumento dell'aumento repentino del segnale di pH in vasca anossica alle ore 14 circa (figura 23-d) e dalla diminuzione del segnale di ORP (figura 23-f) alla stessa ora, indicatori univoci di un aumento di attività del processo di denitrificazione.

## **5 CONCLUSIONI**

Le attività svolte e i risultati ottenuti dimostrano come il sistema brevettato soddisfi le premesse presentate. L'analisi in linea effettuata sui segnali misurati e acquisiti sull'impianto permette di affermare che il sistema è in grado di soddisfare le specifiche di controllabilità degli impianti di depurazione utilizzando unicamente segnali misurabili con sonde robuste e a basso costo. I risultati della fase di analisi dati dimostrano che i risultati attesi, stimati in un risparmio energetico superiore al 15% rispetto ai valori di consumo energetico medio desunto dalla diagnosi funzionale ed energetica dell'impianto, già controllato con un PID a set-point costante, possono essere ragionevolmente raggiunti. Il dato più confortante riguarda la durata effettiva della fase detta di alto carico, che risulta essere sempre molto più corta rispetto a quelle di medio e basso carico, ragione per cui le condizioni di massimo assorbimento da parte del compressore si avranno per un percentuale ridotta della giornata. Ad oggi il controllore non è stato ancora avviato, anche per la bassa qualità dei segnali acquisiti che ha richiesto un'attività specifica di messa a punto di algoritmi specifici per la pulizia online dei segnali. In particolare, occorre anche sottolineare che non si è potuto utilizzare il segnale di potenziale redox in vasca di ossidazione perché il sensore ha presentato disturbi sistematici importanti non eliminabili. Questo fatto ha obbligato ad utilizzare solo il pH per il controllo e la gestione del processo di nitrificazione, chiedendo un apposito approfondimento nello studio degli andamenti di questo segnale. I risultati indicano che, con opportuni rilassamenti delle condizioni, è possibile controllare il processo di nitrificazione con il solo segnale di pH e il DO, in quanto le informazioni che veicolano ORP e DO sono praticamente le stesse.

Per questi motivi, tutte le ipotesi di lavoro sono state rispettate e le condizioni per l'avvio del controllore Constance sono state verificate. Hera ha dato quindi il permesso per il proseguo delle attività, che sono proseguite con la messa in linea e l'avvio del controllore.

Il secondo rapporto tecnico verterà sulla presentazione dei risultati inerenti al controllo automatico dell'impianto di Granarolo dell'Emilia.



## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] **Spagni A., Ferraris M., Mattioli D., Petta L., Brunori C.** (2016). Water-energy nexus: la parte oscura del ciclo dell'acqua, cambiamenti climatici ed energia circolare. *Energia, ambiente e innovazione (EAI)*. 1/2016: 82-87.
- [2] **Ozdemir B., Yenigun O.** (2013). A pilot scale study on high biomass systems: Energy and cost analysis of sludge production. *Journal of Membrane Science* (428).
- [3] **Olsson G.**, (2012). ICA and me – A subjective review. *Water research* 46, pp. 1585-1624.
- [4] **Acampa G., Giustra M. G., Parisi C. M.** (2019). Water Treatment Emergency: Cost Evaluation Tools. *Sustainability* (11).
- [5] **Olsson, G., Nielsen, M.K., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A., Steyer, J.P.**, (2005). *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Treatment Systems*. Scientific and Technical Report No. 15. IWA Publishing, London, UK
- [6] **Luccarini Luca**. "GRUPPO PER LA GESTIONE AUTOMATIZZATA DI IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO BIOLOGICO DI ACQUE REFLUE", Brevetto Europeo per invenzione industriale n. 3390289 valido dal 12/8/2020.
- [7] **Ruano M. V., Ribes J., Seco A., Ferrer J.** (2009). Low cost-sensors as a real alternative to on-line nitrogen analysers in continuous systems *Water Sci Technol* 2009 -60(12).
- [8] **Thürlimann C. M., Dürrenmatt D. J., Villez K.** (2018). Soft-sensing with qualitative trend analysis for wastewater treatment plant control *Contr. Engin. Pract.* Vol. 70 pp 121-123
- [9] **Luccarini L., Pulcini D., Sottara D., Di Cosmo R., Canziani R.** (2017). Monitoring denitrification by means of pH and ORP in continuous-flow conventional activated sludge processes. *Desalination Water and Treatment*, 61.
- [10] **Luccarini L., Pulcini D., Canziani R., Giunchi D., Mello P., Sottara D.**, (2012). Signal monitoring toward intelligent and automatic control of wastewater treatment plants. *SIDISA 2012 – 9th Edition of Sustainable Technology for Environmental Protection, International Symposium of Sanitary and Environmental Engineering*. Milan, Italy
- [11] **Di Cosmo R., Pulcini D., Canziani R., Luccarini L.**, (2014). Energy efficient WWTPs: simulation and validation of a decision support system through modelling. *Proceedings of the 2nd IWA Specialized International Conference ecoSTP2014 - EcoTechnologies for Wastewater Treatment, Technical, Environmental & Economic Challenges*. Verona (Italy)Volume: ISBN 9788869250026.
- [12] **Sottara D., Manservigi, A., Mello P., Colombini G., Luccarini L.**, (2009). A CEP-based SOA for the management of WasteWater Treatment Plants. Submitted to 2009

IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, Crema, Italy, 25 September 2009.

- [13] **Rick Chartrand** (2011). Numerical Differentiation of Noisy, Nonsmooth Data. *Applied Mathematics* 2011(1–4) doi:10.5402/2011/164564
- [14] [https://www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](https://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)
- [15] **Poch M., Comas J., Rodríguez-Roda I., Sanchez-Marrè M., Cortés U.** (2004). Designing and building real environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software* Volume 19, Issue 9, Pages 857-873.
- [16] **Åmand L., Olsson G. Carlsson B.**, (2013). Aeration control - a review. *Water Sci Technol* 67 (11): 2374–2398.
- [17] **Luccarini L., Pulcini D., Sottara D: e Alessandro Spagni** (2015). Investigation of the potential energy saving in a pilot-scale sequencing batch reactor. In book: *Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency* (pp.311-326). Chapter: 17 - Publisher: IWA Publishing Editors: Konstantinos P. Tsagarakis, Katerina Stamatelatou
- [18] **Masotti L.** (2011) *Depurazione delle acque. Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto.* Hoepli editore.

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
maggio 2023