

*Modellazione di processo di un depuratore a
fanghi attivi e sviluppo di strategie di controllo
tramite Business Process*

Relatore

Roberto Ricci

ENEA - Bologna

Gruppo di ricerca

**Roberto Ricci
Luca Luccarini
Carminio Fiorentino
Maurizio Mancini**

**ENEA - Bologna
ENEA - Bologna
Dicam - Università di Bologna
Dicam - Università di Bologna**

Torino, 14-15 Ottobre 2015



Questo lavoro si inserisce in un progetto in collaborazione con
ENEA ed HERA ed Università di Bologna (DICAM)

per la

Definizione di uno strumento per la gestione
automatizzata di impianti di depurazione



Inquadramento generale

Un controllo automatizzato risorsa vantaggiosa

- ✓ qualità dell'effluente
- ✓ economica

In particolar modo se applicato ad impianti medio piccoli per diversi fattori:

- Impianti di depurazione in Italia 18.786 di cui $\approx 90\% < 10000$ A.E.
- Disponibilità di addetti e dotazione tecnologica non adeguati
- Elevata variabilità di ingressi

Per impianti medio grandi in ausilio delle pratiche di gestione esistenti



Obiettivi - Attività

Definizione di una strategia di controllo per minimizzare i costi e ottimizzare i processi di trattamento tramite il controllo dell' azoto in uscita

Approccio alla modellazione e simulazione di strategie di controllo tramite utilizzo di Business Process Management (BPM)

Obiettivi - Attività

Le attività svolte possono essere suddivise in 4 fasi principali:

- 1) *Definizione ipotesi di lavoro* → a) Valutazione tipologia impianto
b) Studio dei dati in ingresso
- 2) *Calibrazione* → Analisi di scenario
- 3) *Analisi delle risposte dell'impianto* → simulazioni con diversi parametri di controllo (WEST)
- 4) *Modellazione statica della strategia di controllo* → programmi basati su BPM

Materiali e Metodi

Impianto pilota



- Situato vicino l'impianto reale di Trebbo di Reno (BO)
- Schema pre-denitrificazione/nitrificazione
- Alimentato in continuo con refluo da impianto reale
- Su di esso è stato sviluppato il modello per simulazioni



	Valore	Unità
Volume Vasca Anossica	94,5	l
Volume Vasca Aerobica	175,5	l
Area Sedimentatore	1963	cm ²
Altezza Sedimentatore	54	cm
Portata Ricircolo Fanghi	430	l/d
Portata Ricircolo Interno	760	l/d
Portata Spurgo	3	l/d
Temperatura	20	°C

Materiali e Metodi

Dati in ingresso

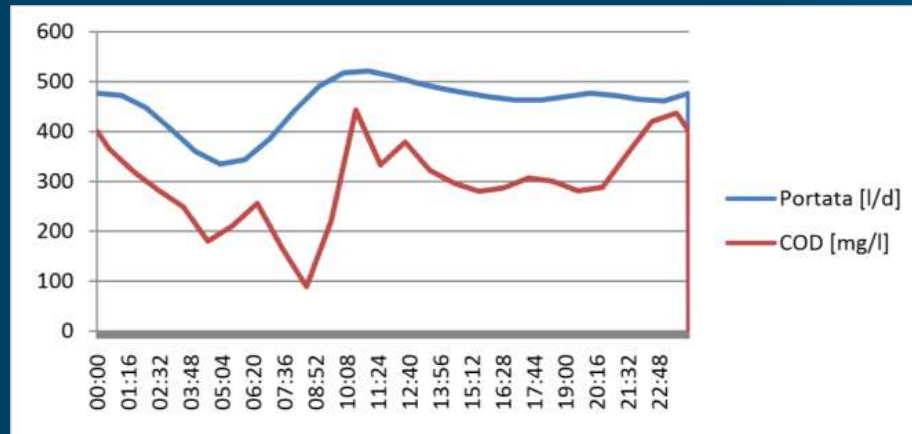
Sono stati presi in esame diversi set di dati giornalieri ricavati durante una campagna di caratterizzazione annuale

Ogni caratterizzazione giornaliera è composta da 24 valori ricavati da campioni estratti dal refluo in ingresso nell'impianto, eseguiti con un passo temporale di 60 minuti da un campionatore automatico

Materiali e Metodi

Dati in ingresso

L'andamento generale dei carichi e delle portate in ingresso è in accordo con l'andamento teorico giornaliero per gli ingressi civili



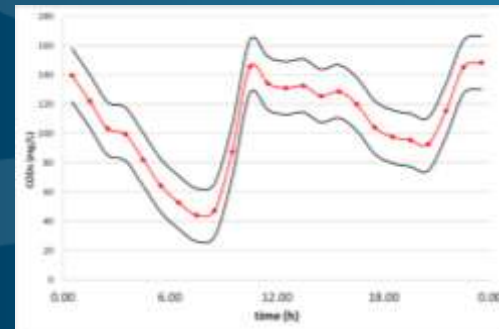
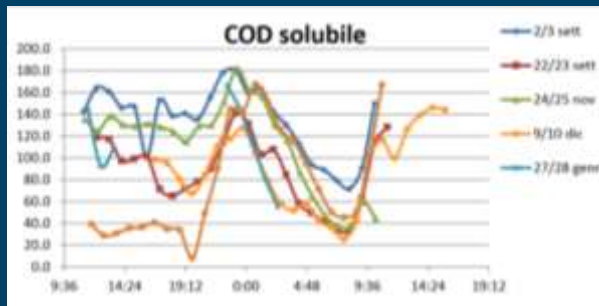
Un basso carico nelle ore notturne; crescita prime ore del mattino con valore massimo verso metà giornata; progressiva diminuzione e ripresa alla fine della giornata, con picco intorno alle 23

Materiali e Metodi

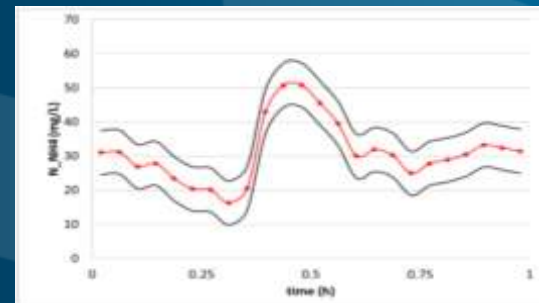
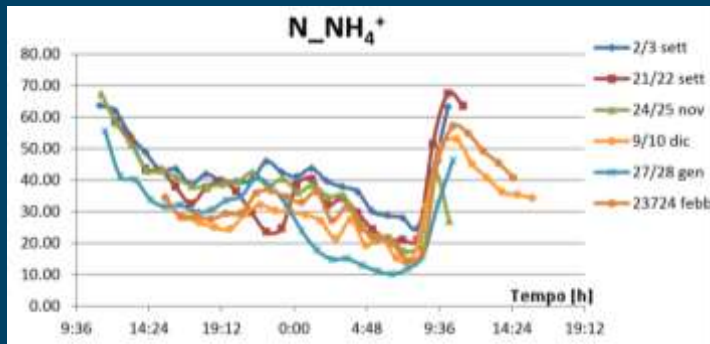
Principali variabili di controllo

Dati in ingresso

Andamento profili medi con range di confidenza 95%



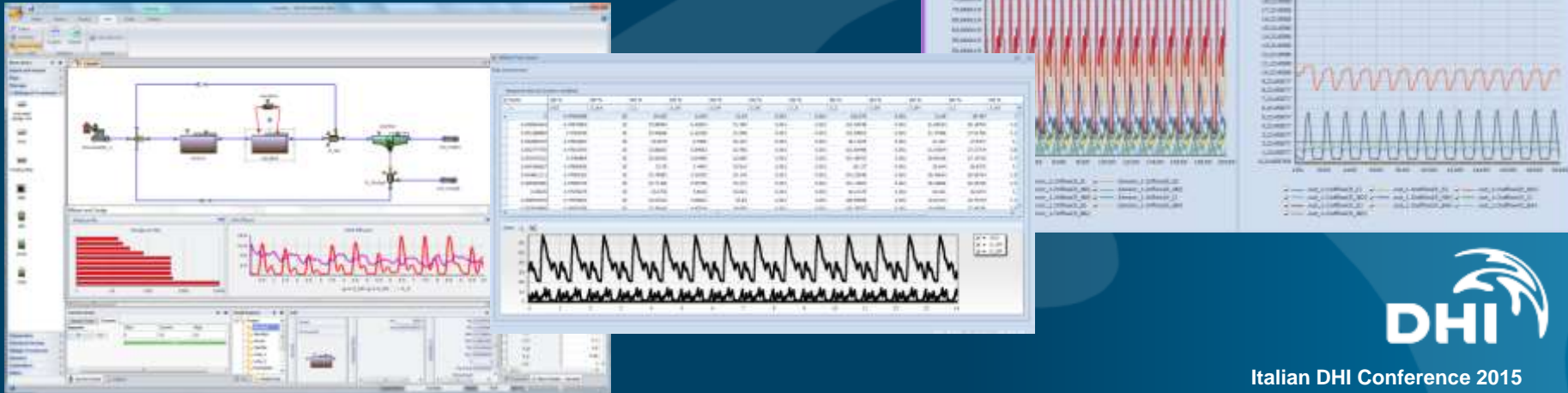
$COD/TKN < 8$



Materiali e Metodi

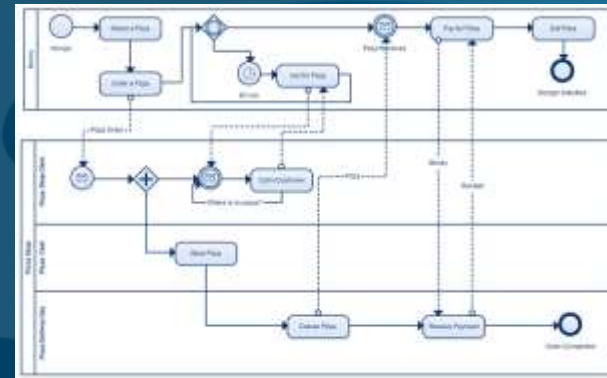
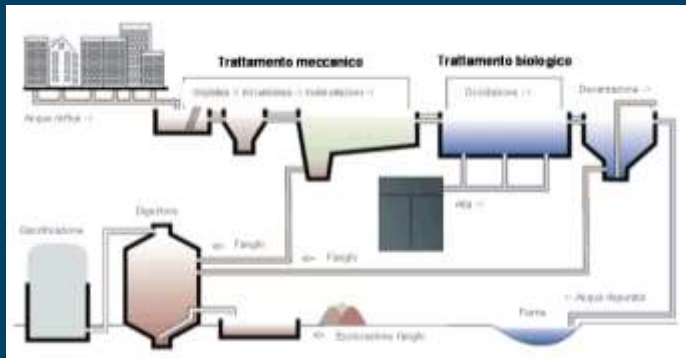
WEST

- Per la modellazione e la simulazione dei diversi processi di trattamento delle acque reflue
- Per valutare le risposte dell'impianto pilota a diversi ingressi e parametri di controllo
- Basato sui modelli ASMx



Materiali e Metodi

- I Processi di Business sono definiti come una sequenza controllata di attività che portano alla creazione di un bene o servizio
- Business Process Management (BPM) è un approccio sistematico e strutturato per analizzare, migliorare, controllare e gestire i processi di business con lo scopo di migliorare la qualità dei prodotti e dei servizi



Business Process → Impianto

BPM → Strategie di controllo

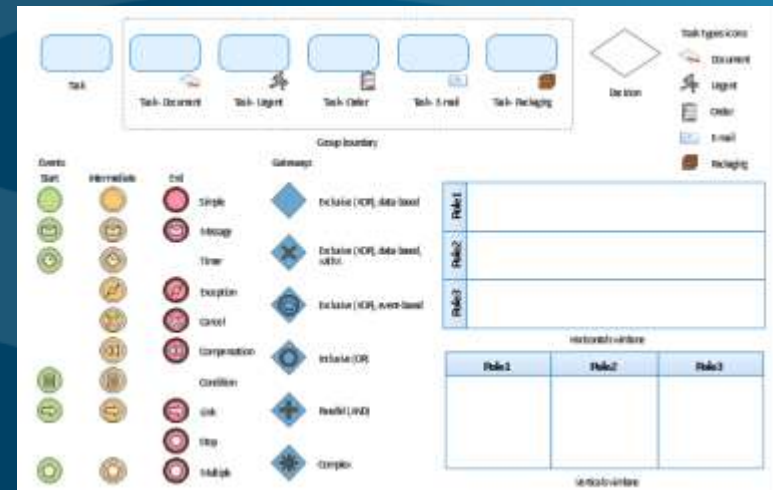
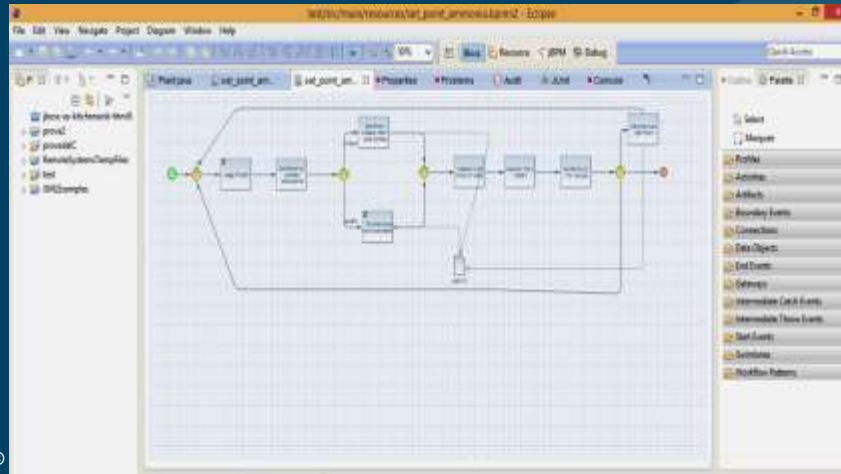


Materiali e Metodi

JBPM

- Programma che sviluppa e gestisce Processi di Business
- Open Source
- Basato su tecnologia JAVA
- Utilizza BPMN (BPM Notation)

	Start			Intermediate			End
	Event	sub-pr. Inter.	Non-Inter.	Catch	Boundary	Thru wing	
None	○			○			●
Message	✉	✉	✉	✉	✉	✉	✉
Timer	🕒	🕒	🕒	🕒	🕒	🕒	
Error	⚠			⚠			⚠
Escalation	⚠	⚠		⚠	⚠	⚠	⚠
Cancel				✖			✖
Compensation	⏪			⏪		⏪	⏪
Conditional	📄	📄	📄	📄	📄	📄	
Link				➡		➡	
Signal	📡	📡	📡	📡	📡	📡	📡



Ipotesi di lavoro

Adattano le valutazioni e gli interventi alle diverse situazioni ed ingressi a cui l'impianto è soggetto

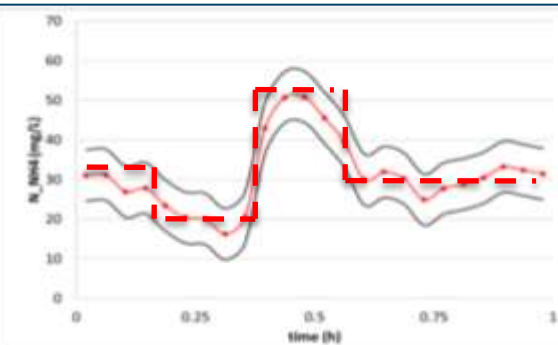
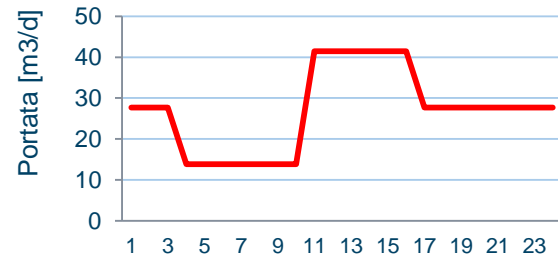
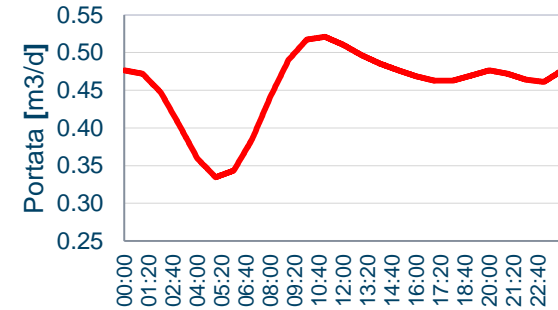
A) Stazione di sollevamento composta da 3 pompe



3 portate in ingresso

B) Discretizzazione arco giornaliero in 3 fasce orarie in funzione della concentrazione dell'azoto ammoniacale

C) Associazione delle fasce con concentrazione N_{NH_4} con le diverse portate



Ipotesi di lavoro

Divisione in fasce ipotesi plausibile dall'analisi dei dati;

		Durata	[N_NH ₄]
Fascia 1	Q ₁	03:00/10:00	20 mg/l
Fascia 2	Q ₂	10:00/16:00	50 mg/l
Fascia 3	Q ₃	16:00/03:00	30 mg/l

Semplicità di gestione delle singole fasce rispetto tutto l'arco giornaliero

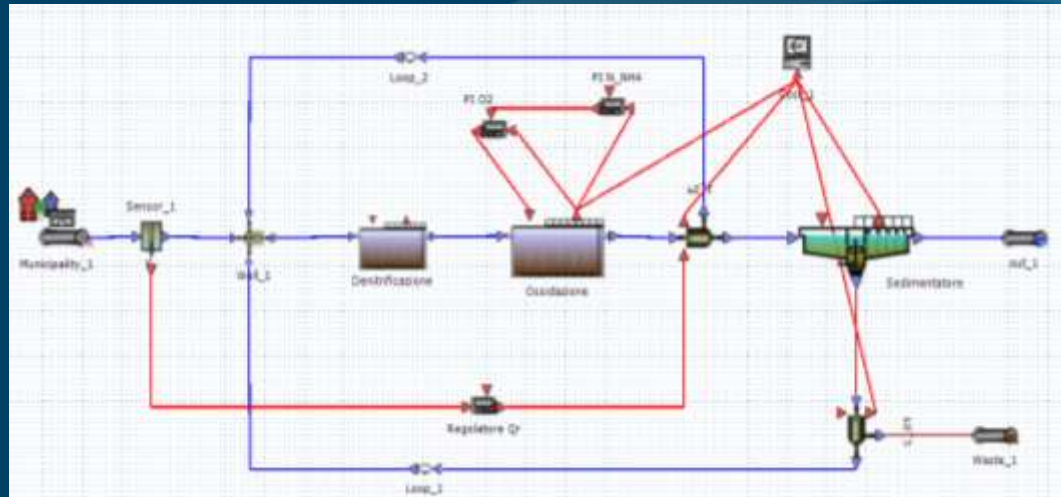
Con WEST definizione delle condizioni iniziali di gestione per ogni singola fascia



Modello dell'impianto

Tramite il software WEST è stato implementato il modello dell'impianto pilota ed i sistemi di controllo utilizzati

- Regolatori PI in cascata in vasca di ossidazione ➔ necessità di calibrazione
- Regolatore che rende la Q ricircolo proporzionale a Q ingresso



Regolatori PI

Agiscono in funzione della differenza fra il valore della grandezza che vogliamo regolare e un valore di set-point

L'errore è corre

- *Proporzionale*
- *Integrale: co*

Parametri	PI Ossigeno		PI NH ₄	
Fattore di proporzionalità	K_P	250	K_P	-1
Tempo di reset	T_I	50	T_I	50
Valore di non azione	u ₀	140	u ₀	2
Azione di controllo massima	u_Max	250	u_Max	2,5
Azione di controllo minima	u_Min	80	u_Min	0
Valore del set point	y_S	x	y_S	y

$$e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Regolatori PI in cascata

Con due PI in cascata la concentrazione dell'ossigeno è funzione della concentrazione di azoto ammoniacale

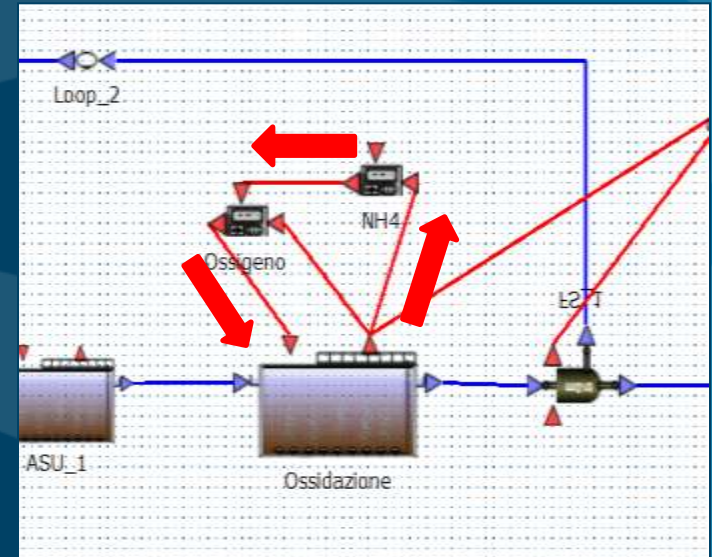
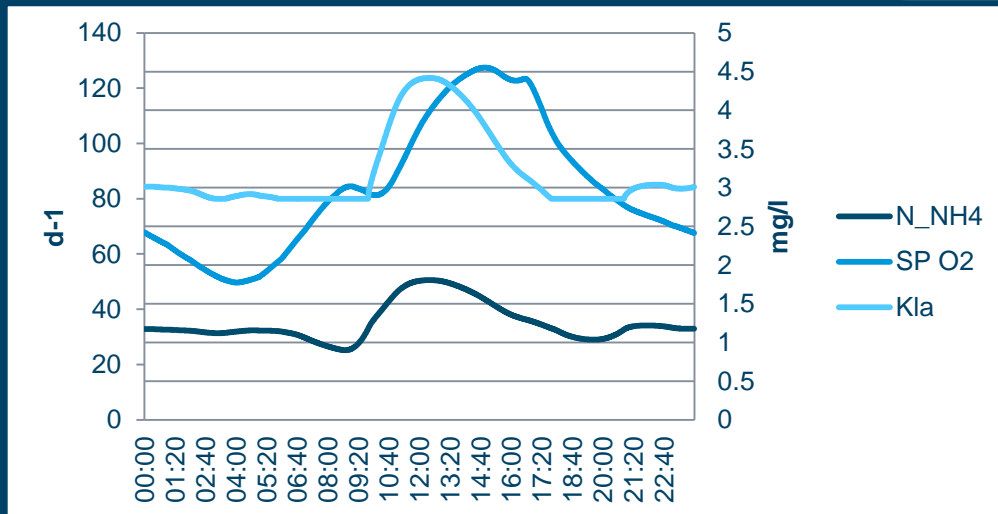
N_{NH4}



Set Point O2



Portata Aria (Kla)



Calibrazione Regolatori PI

- Occorre settare i parametri dei controllori PI in modo che il sistema di controllo possa funzionare correttamente
- Esistono diverse tecniche di calibrazione, nel nostro caso è stato utilizzato un metodo empirico
- I parametri iniziali e i range utilizzati derivano da lavori già svolti in precedenti lavori e da articoli scientifici che hanno analizzato il problema

E' stato utilizzato lo strumento di ANALISI DI SCENARIO presente in WEST per valutare i parametri che in maniera più rappresentativa restituivano dei risultati paragonabili con i comportamenti reali che avvengono in un impianto di depurazione

Calibrazione Regolatori PI

Sono state eseguite diverse simulazioni (circa 70) per ogni set di dati in ingresso, nelle quali è stato evidenziato il comportamento delle variabili in uscita di interesse

Run	Control_1_P	Control_1_I	Control_2_P	Control_2_I	ProcessOut	ProcessIn	ProcessOut	Time	Control_1_u	Control_2_u	Time
1	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
2	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
3	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
4	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
5	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
6	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
7	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
8	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
9	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
10	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
11	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
12	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
13	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
14	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
15	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
16	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
17	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
18	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
19	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
20	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
21	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
22	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
23	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
24	200	200	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
25	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0
26	200	0	0	0	40.00000	40.00000	40.00000	0	40.00000	0	0

Importante in questa fase di studio è il processore e la RAM del calcolatore utilizzato



Calibrazione Regolatori PI

Le ASPETTATIVE, in base alle quali sono state escluse determinate combinazioni di parametri, si riferiscono a caratteristiche riscontrate in impianti reali:

Azoto ammoniacale NH_4

- Azoto ammoniacale NH_4 in uscita non deve superare i 2 mg/l (limiti di legge)
- Il limite inferiore NH_4 viene considerato 1 mg/l , la scelta è stata fatta in funzione delle buone norme di gestione dell'impianto (per aree non sensibili non è richiesto un trattamento più spinto)

Calibrazione Regolatori PI

Kla /Ossigeno

- Diversi studi hanno sottolineato l'importanza di un Kla che deve mantenersi ad un massimo di 140 d^{-1}
- Con qualunque tipologia di ingresso, la concentrazione di ossigeno in vasca di ossidazione deve mantenersi ad un massimo di $2,5 \text{ mg/l}$



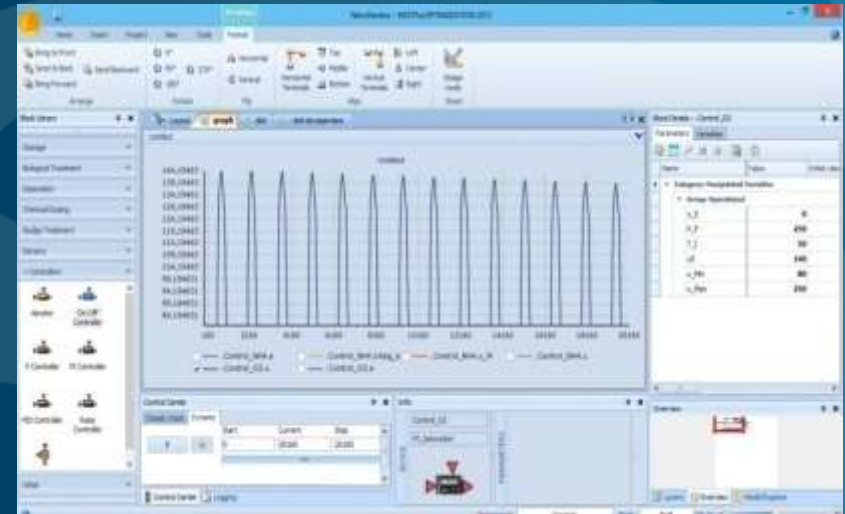
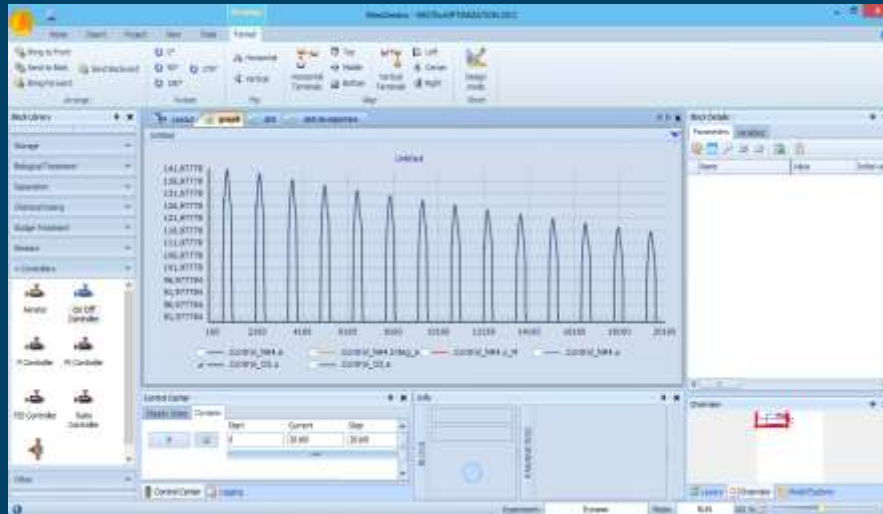
Possono creare reazioni secondarie/sovraabbondanza di ossigeno disponibile

Calibrazione Regolatori PI

Variabilità e ciclicità giornaliera

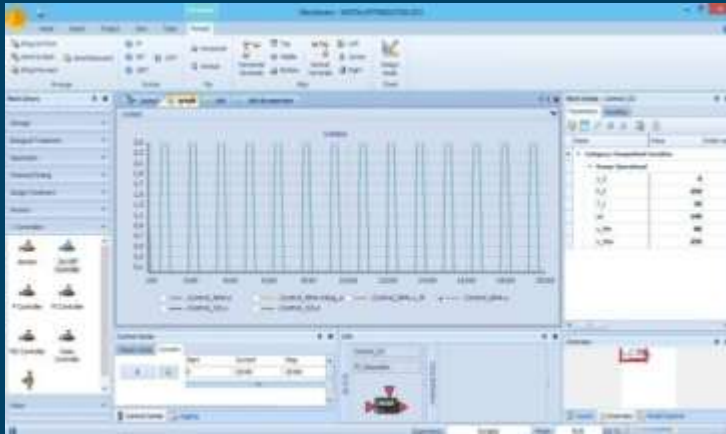
Kla con comportamento non stabile, che converge verso un numero

Kla tende ad essere stabile e con ripetitività giornaliera



Calibrazione Regolatori PI

Variabilità e ciclicità giornaliera



Set Point dell'ossigeno mantiene valori di massimo e minimo per archi temporali rilevanti. Comportamento simile ad un controller ON/OFF



Variabilità che si mantiene nei limiti fisici aspettati, che quindi meglio rappresenta il processo cinetico di interesse

Analisi delle risposte dell'impianto

Strumenti di controllo utilizzati

Regolatori PI in cascata in vasca di ossidazione

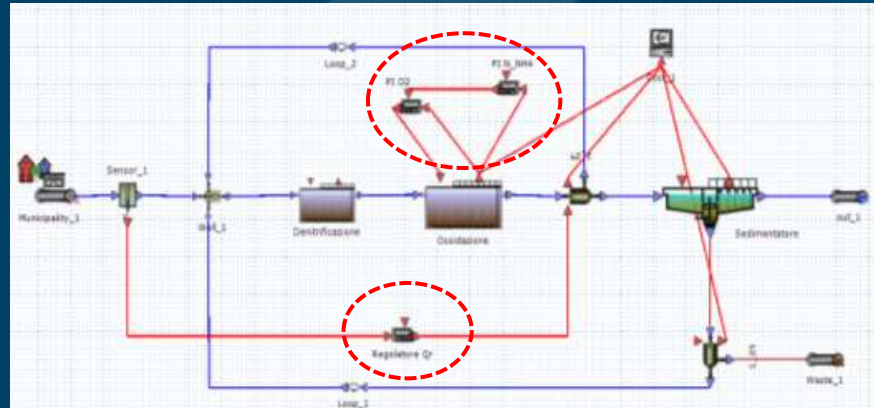


Nitrificazione

Regolatore che rende la Q ricircolo
proporzionale a Q ingresso



Denitrificazione



Analisi delle risposte dell'impianto

Sono state eseguite simulazioni tramite WEST per valutare le risposte dell'impianto

- *Utilizzando diversi ingressi disponibili*
- *Variando i seguenti parametri di controllo:*

Set Point Azoto ammoniacale

Set Point $N_{NH_4^+} = 1$ mg/l

Set Point $N_{NH_4^+} = 1,5$ mg/l

Set Point $N_{NH_4^+} = 2$ mg/l



Nitrificazione

Portata di ricircolo

Q ricircolo = $1,5 * Q$ ingresso

Q ricircolo = $2 * Q$ ingresso

Q ricircolo = $2,5 * Q$ ingresso

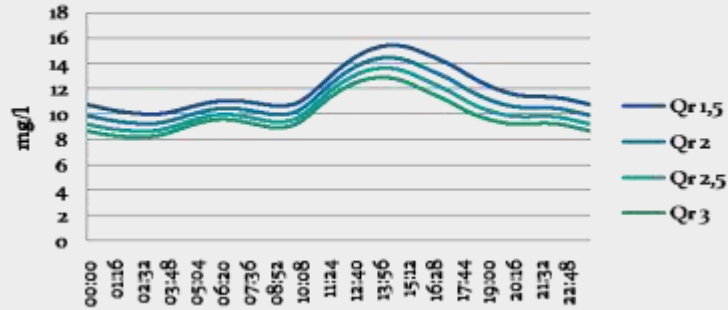
Q ricircolo = $3 * Q$ ingresso



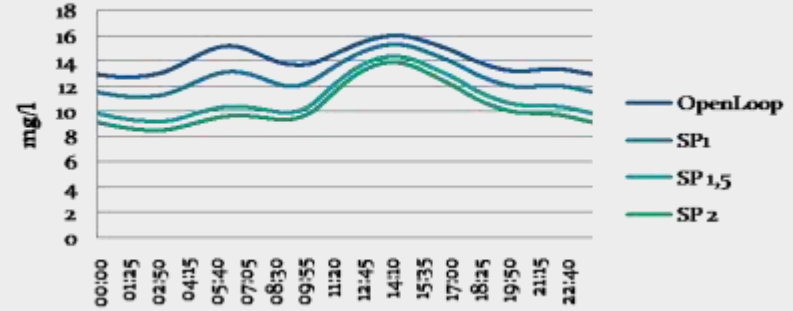
Denitrificazione

Andamenti concentrazioni

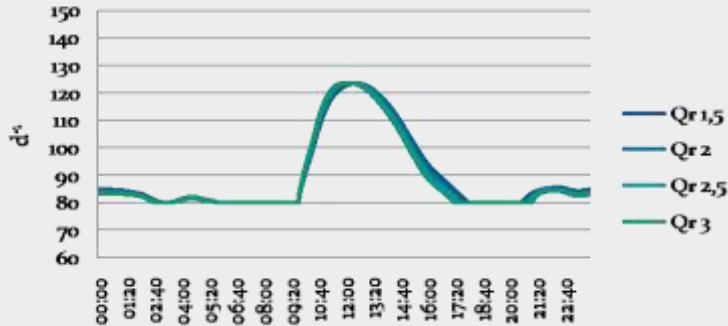
TN out SP 1,5



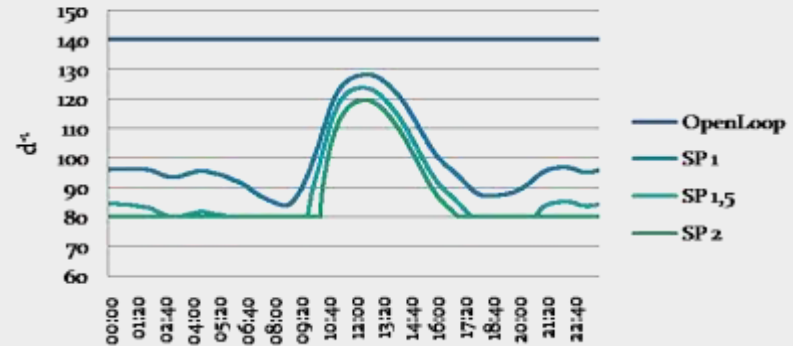
TN out Qr 2



KLa vasca ox



KLa vasca ox



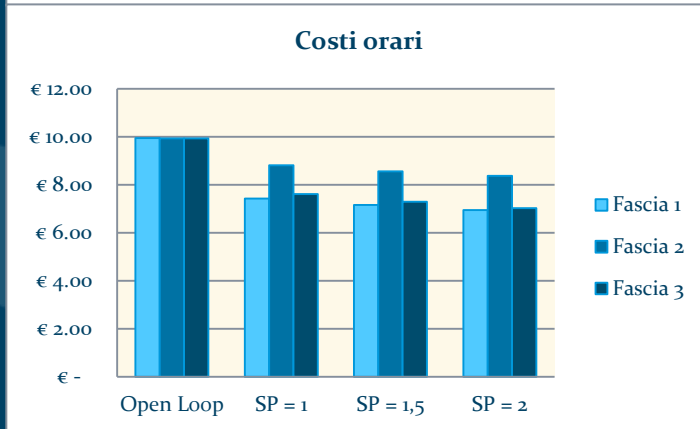
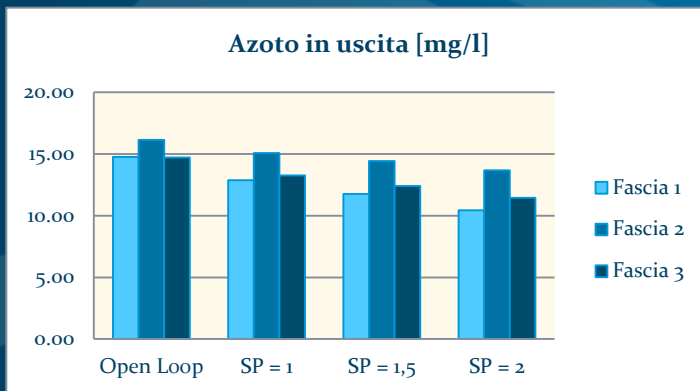
Simulazioni con diversi set point N_{NH_4}

E' stata applicata l'ipotesi della divisione in fasce Azoto maggiore nella fascia ipotizzata con massimo carico

mg/l		Open Loop	SP = 1	SP = 1,5	SP = 2
Fascia 1	dalle 3 alle 10	14,76	12,88	11,76	10,43
Fascia 2	dalle 10 alle 16	16,13	15,09	14,44	13,67
Fascia 3	dalle 16 alle 3	14,71	13,26	12,42	11,45

I costi rispettano gli andamenti previsti in funzione del carico inquinante e del set point utilizzato

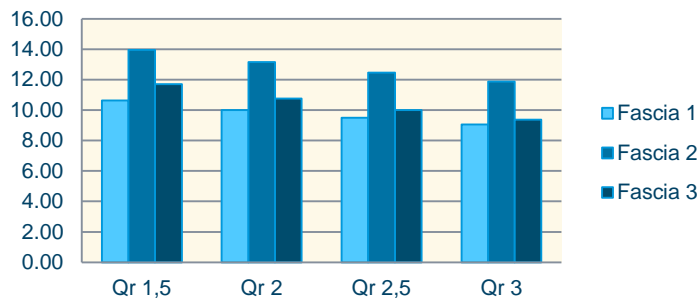
2-3 Settembre		Open Loop	SP = 1	SP = 1,5	SP = 2
Fascia 1	dalle 3 alle 10	€ 9,95	€ 7,43	€ 7,16	€ 6,95
Fascia 2	dalle 10 alle 16	€ 9,94	€ 8,82	€ 8,57	€ 8,38
Fascia 3	dalle 16 alle 3	€ 9,94	€ 7,62	€ 7,30	€ 7,03



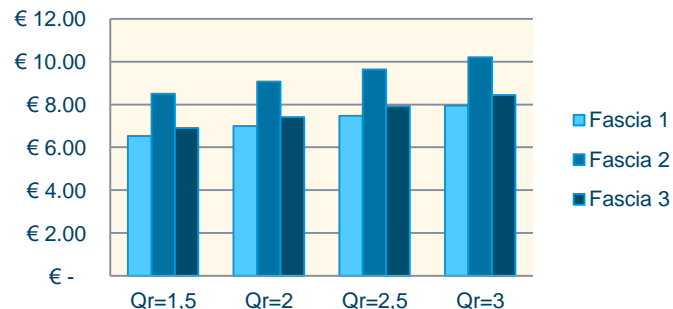
Simulazioni per ciascun set point N_{NH_4} alle diverse portate di ricircolo mix liquor

2-3 Settembre		Qr=1,5			Qr=2			Qr=2,5			Qr=3		
		[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]
Fascia 1	dalle 3 alle 10	10,64	0,02	105,56	10,01	0,02	92,49	9,49	0,03	82,66	9,06	0,03	74,98
Fascia 2	dalle 10 alle 16	13,95	0,03	101,92	13,16	0,04	85,05	12,47	0,05	72,27	11,87	0,05	62,29
Fascia 3	dalle 16 alle 3	11,70	0,03	104,97	10,76	0,03	90,21	10,00	0,03	79,44	9,37	0,03	71,30

Azoto in uscita [mg/l]



Costi orari



2-3 Settembre		Qr=1,5	Qr=2	Qr=2,5	Qr=3
Fascia 1	dalle 3 alle 10	€ 6,53	€ 7,00	€ 7,47	€ 7,94
Fascia 2	dalle 10 alle 16	€ 8,51	€ 9,07	€ 9,64	€ 10,20
Fascia 3	dalle 16 alle 3	€ 6,91	€ 7,41	€ 7,92	€ 8,44

Modellazione strategia di controllo

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni dei processi biologici ci si basa per lo sviluppo di modelli

Valutare i comportamenti dei processi alla variazione delle variabili controllabili



Definire le condizioni iniziali da cui partire per la modellazione con BPM

21-22 settembre		Qr=1,5			Qr=2			Qr=2,5			Qr=3		
		[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]
Fascia 1	dalle 3 alle 10	13,80	0,91	8,11	12,82	1,42	4,75	12,14	1,92	3,01	11,72	2,46	2,35
Fascia 2	dalle 10 alle 16	18,29	0,50	10,20	17,43	1,25	5,23	16,99	2,19	3,93	16,80	3,14	3,70
Fascia 3	dalle 16 alle 3	16,77	1,38	13,15	15,92	2,27	8,83	15,44	3,09	5,84	15,21	3,90	4,12

21-22 settembre		[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]
Fascia 1	dalle 3 alle 10	12,61	0,14	19,77	11,66	0,36	13,74	10,94	0,60	10,05	10,38	0,84	7,55
Fascia 2	dalle 10 alle 16	17,47	0,18	20,72	16,49	0,56	12,67	15,76	1,04	8,20	15,26	1,55	5,75
Fascia 3	dalle 16 alle 3	15,56	0,56	21,06	14,55	1,20	16,19	13,86	1,75	12,81	13,36	2,23	10,39

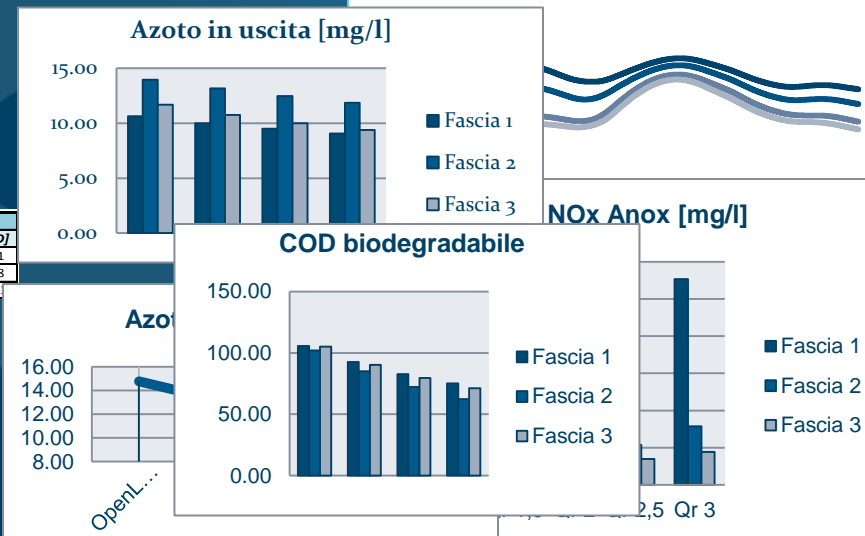
21-22 settembre		[TN]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	
Fascia 1	dalle 3 alle 10	12,40	0,10	24,06	11,44	0,25	17,21	10,70	0,45	13,26	10,12	0,65	10,51
Fascia 2	dalle 10 alle 16	16,80	0,07	35,57	15,89	0,09	25,22	15,19	0,14	17,69	14,65	0,28	12,51
Fascia 3	dalle 16 alle 3	14,73	0,07	38,16	13,49	0,10	26,61	12,54	0,23	19,40	11,90	0,52	15,56

21-22 settembre		[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]	[TN]	[NOx]	[COD]
Fascia 1	dalle 3 alle 10	12,50	0,12	21,65	11,53	0,30	15,54	10,81	0,52	11,58	10,25	0,74	8,91
Fascia 2	dalle 10 alle 16	17,10	0,10	27,22	16,14	0,23	17,30	15,43	0,55	11,50	14,91	0,93	8,08
Fascia 3	dalle 16 alle 3	15,00	0,15	25,77	13,86	0,57	18,85	13,13	1,06	15,07	12,60	1,49	12,44

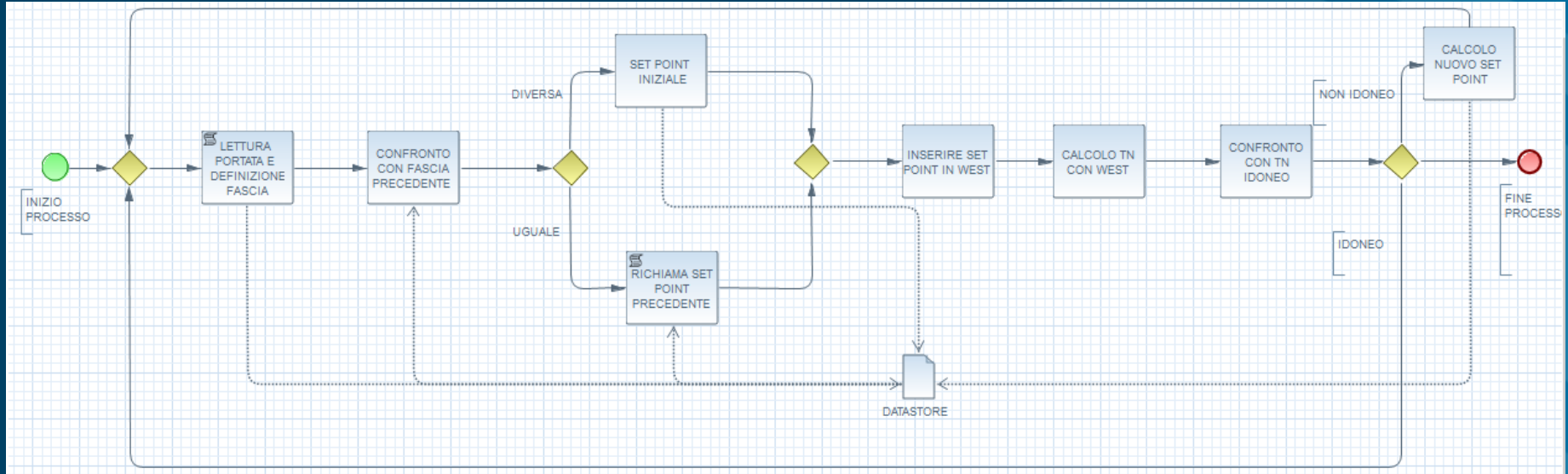
21-22 settembre		Qr=1,5	Qr=2	Qr=2,5	Qr=3
Fascia 1	dalle 3 alle 10	€ 6,51	€ 6,97	€ 7,44	€ 7,91
Fascia 2	dalle 10 alle 16	€ 6,51	€ 6,97	€ 7,44	€ 7,91
Fascia 3	dalle 16 alle 3	€ 6,51	€ 6,97	€ 7,44	€ 7,91

21-22 settembre		Qr=1,5	Qr=2	Qr=2,5	Qr=3
Fascia 1	dalle 3 alle 10	€ 6,51	€ 6,99	€ 7,44	€ 7,91
Fascia 2	dalle 10 alle 16	€ 8,90	€ 9,51	€ 10,10	€ 10,70
Fascia 3	dalle 16 alle 3	€ 9,58	€ 10,05	€ 10,51	€ 10,98

21-22 settembre		Qr=1,5	Qr=2	Qr=2,5	Qr=3
Fascia 1	dalle 3 alle 10	€ 9,58	€ 10,05	€ 10,51	€ 10,98
Fascia 2	dalle 10 alle 16	€ 9,91	€ 10,49	€ 11,07	€ 11,64
Fascia 3	dalle 16 alle 3	€ 9,79	€ 10,33	€ 10,87	€ 11,41



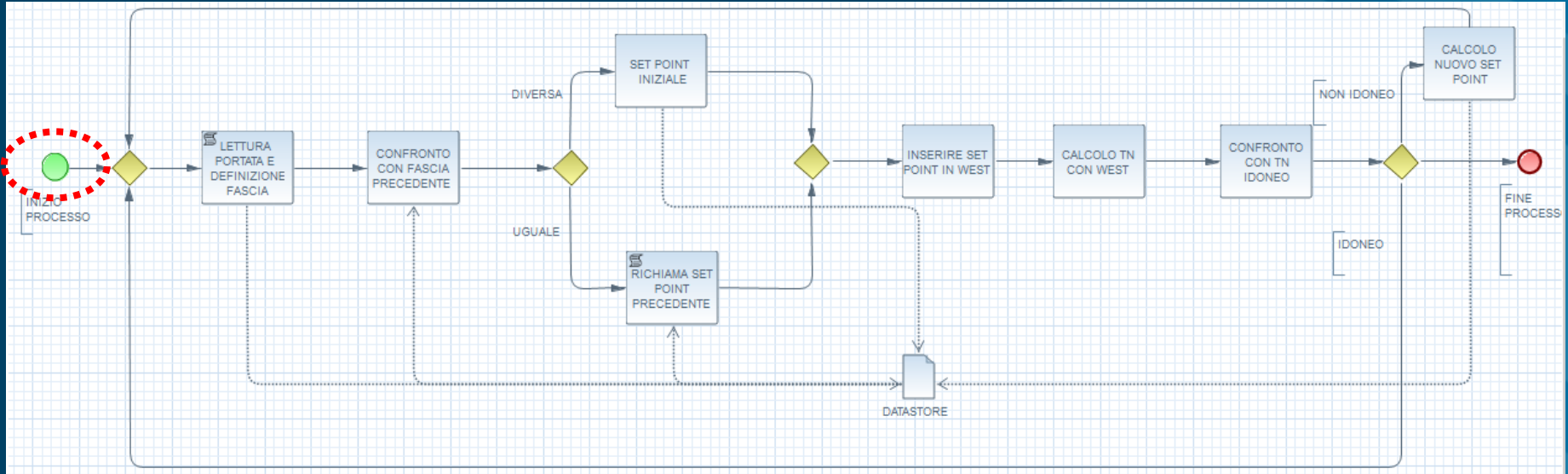
Esempio controllo Set-Point N_{NH}₄



Esempio di workflow sviluppato per il controllo del set point dell'azoto ammoniacale

Funzione obiettivo:
Azoto totale in uscita TN < 14 mg/l
Minimizzando i costi

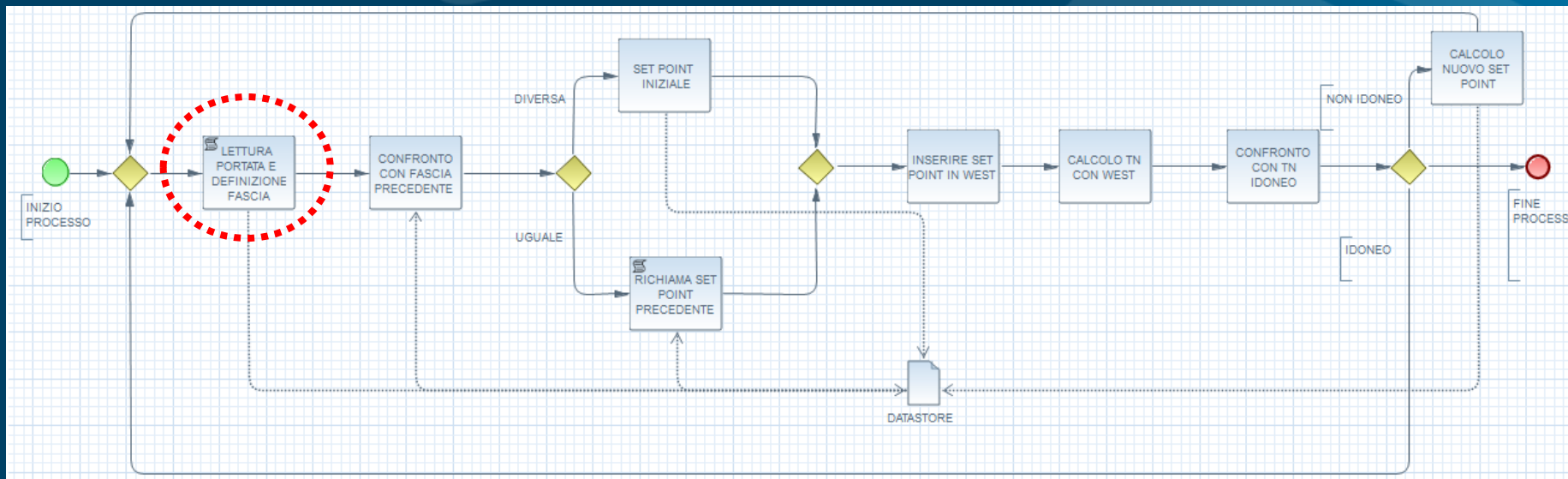
Esempio controllo Set-Point N_{NH}₄



Azoto totale in uscita TN < 14 mg/l

Il processo ha inizio con l'utilizzo della strategia di controllo

Esempio controllo Set-Point N_{NH}4



Azoto totale in uscita TN < 14 mg/l

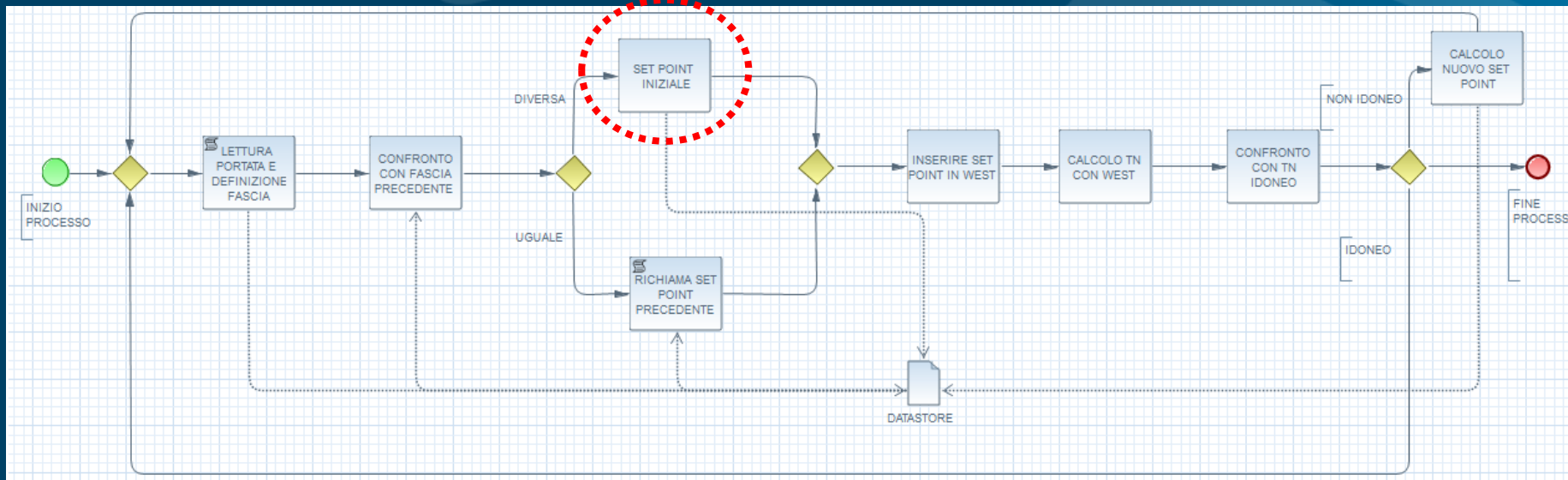
Dalla portata si definisce la fascia di riferimento



TN mg/l	Open Loop	SP = 1	SP = 1,5	SP = 2
Fascia 1	14,76	12,88	11,76	10,43
Fascia 2	16,13	15,09	14,44	13,67
Fascia 3	14,71	13,26	12,42	11,45



Esempio controllo Set-Point N_{NH}_4



Azoto totale in uscita $TN < 14 \text{ mg/l}$

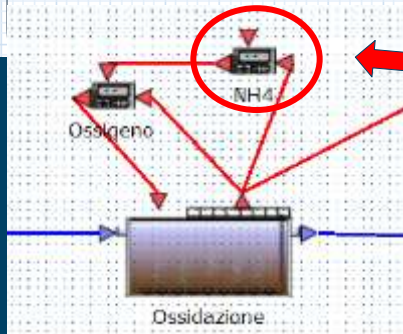
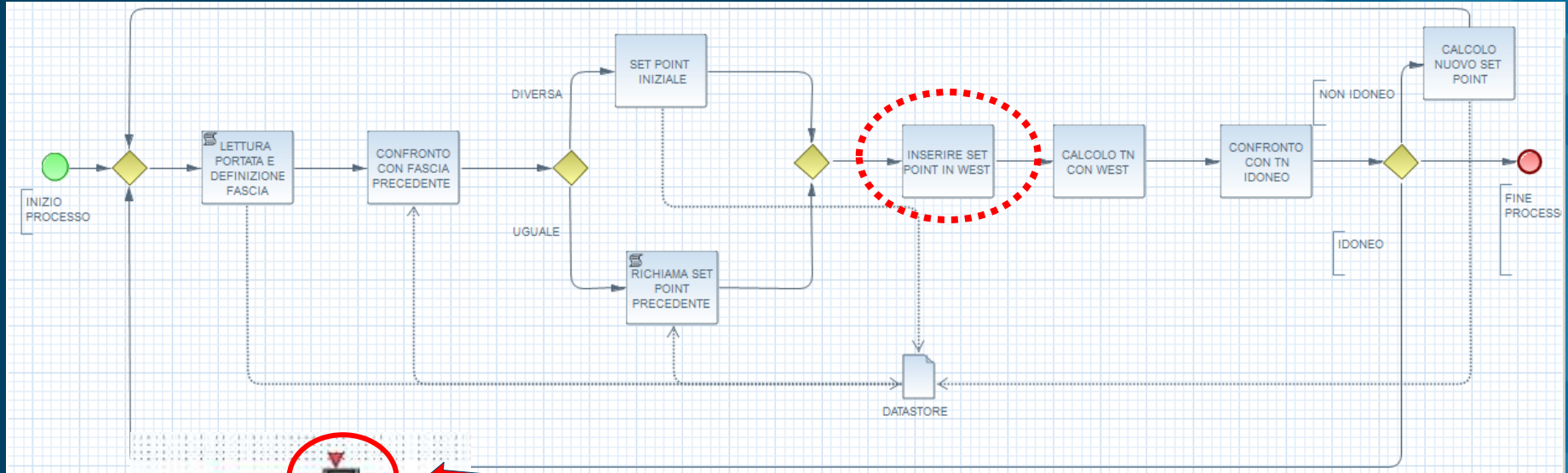
Dalla portata si definisce la fascia di riferimento



TN mg/l	Open Loop	SP = 1	SP = 1,5	SP = 2
Fascia 1	14,76	12,88	11,76	10,43
Fascia 2	16,13	15,09	14,44	13,67
Fascia 3	17,50	13,26	12,42	11,45

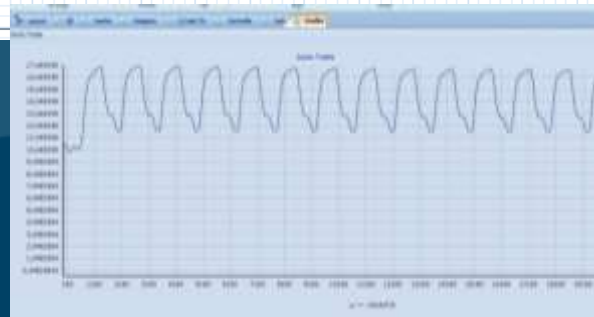
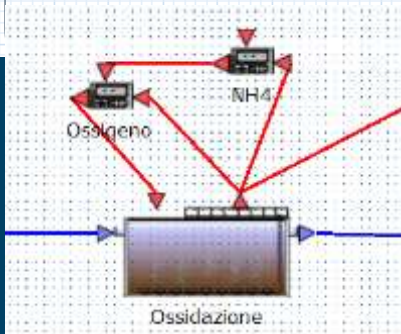
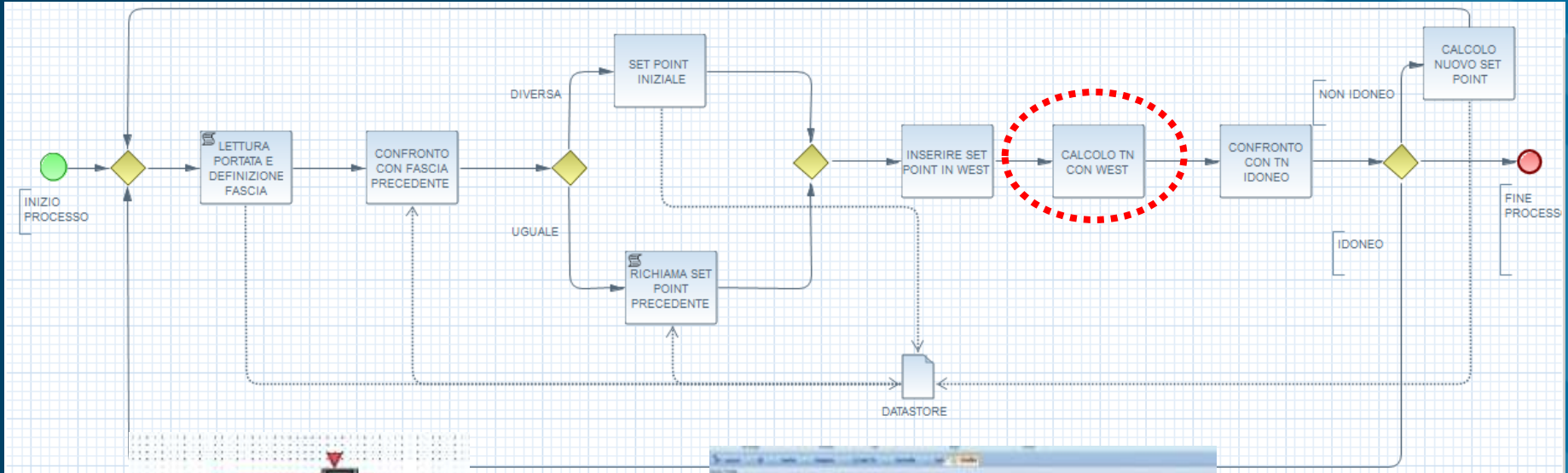


Esempio controllo Set-Point N_{NH_4}

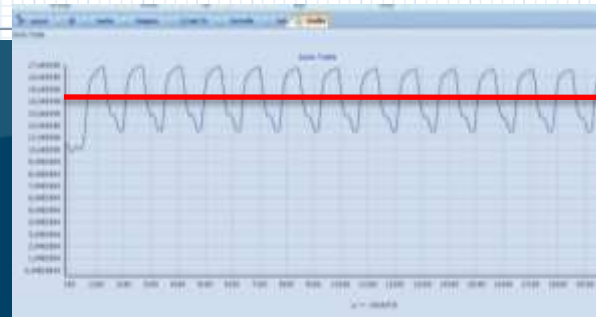
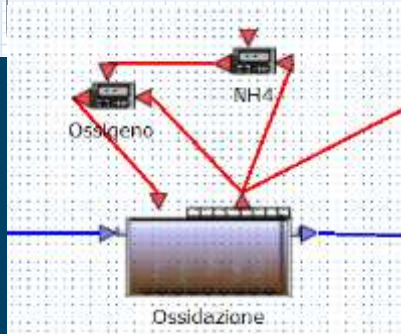
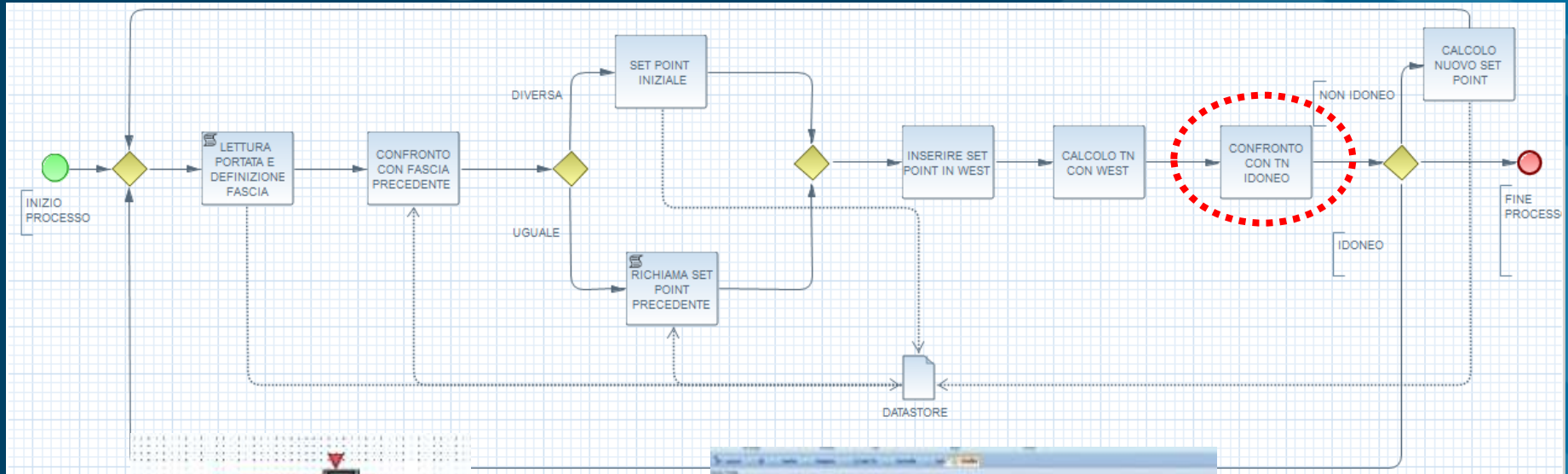


TN mg/l	Open Loop	SP = 1	SP = 1,5	SP = 2
Fascia 1	14,76	12,88	11,76	10,43
Fascia 2	16,13	15,09	14,44	13,67
Fascia 3	14,71	13,26	12,42	11,45

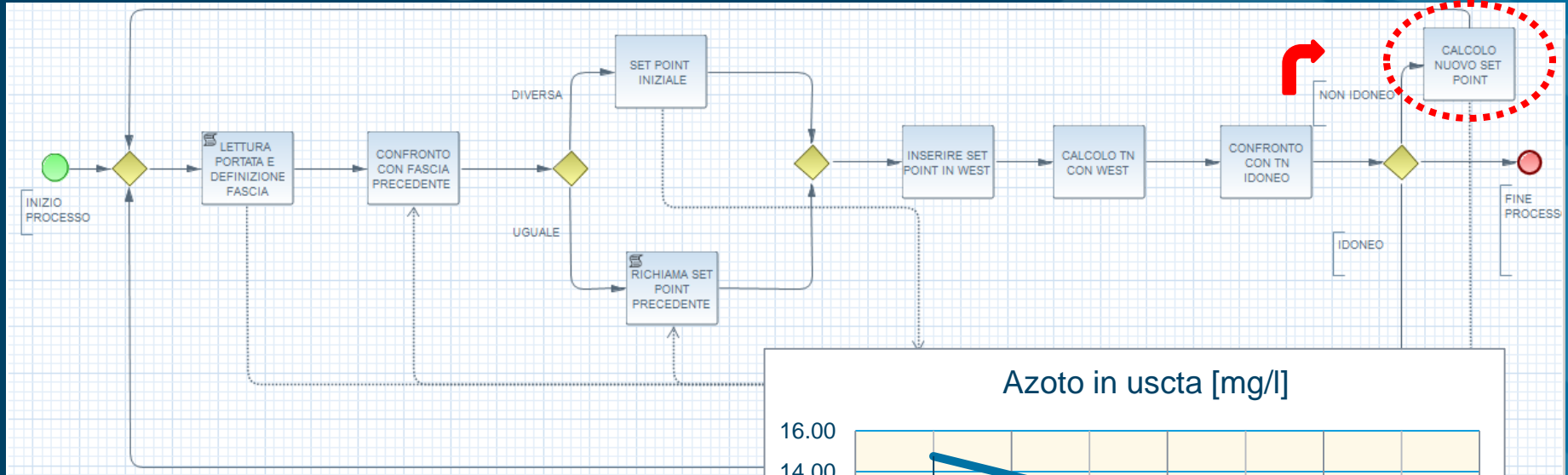
Esempio controllo Set-Point N_{NH_4}



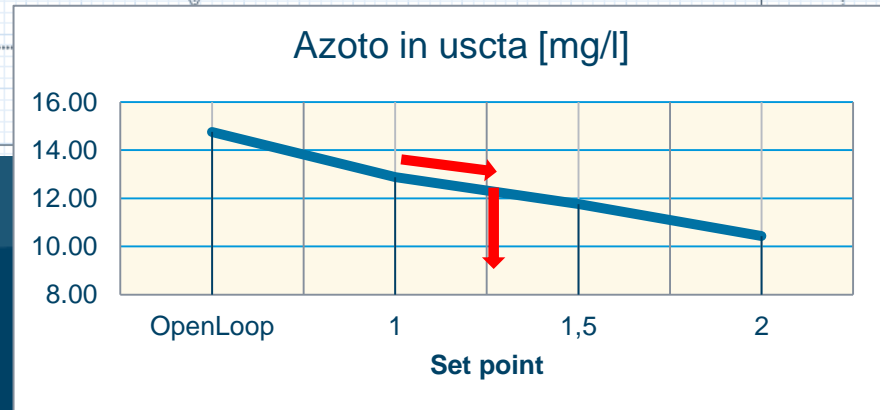
Esempio controllo Set-Point N_{NH_4}



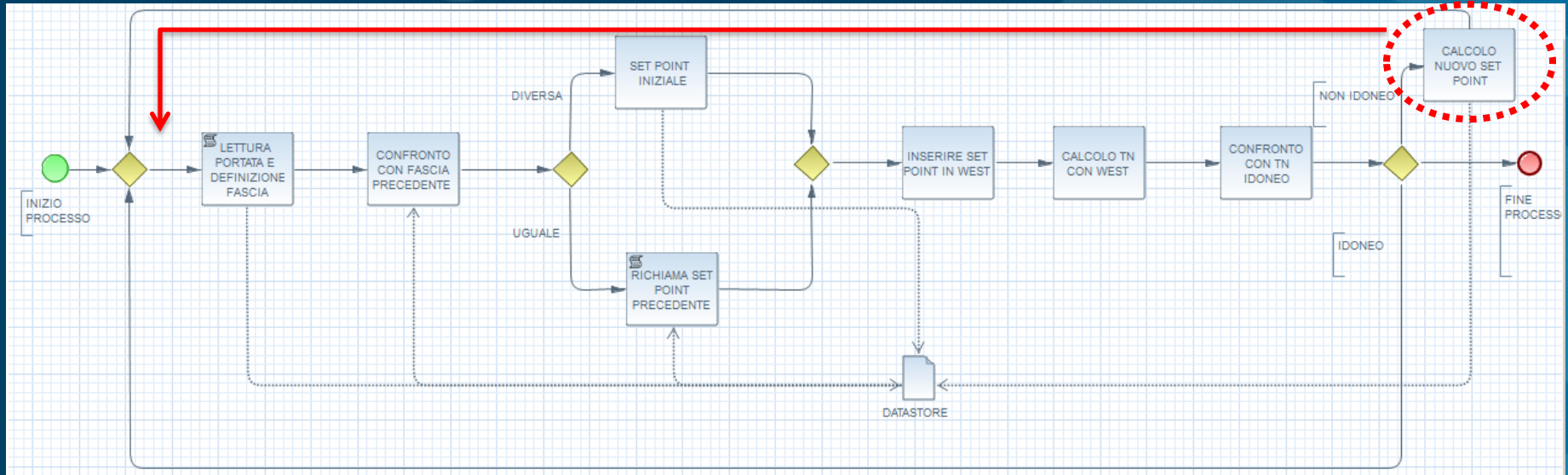
Esempio controllo Set-Point N_{NH}_4



Calcolo nuovo Set Point da inserire nel regolatore in cascata in funzione delle dinamiche evidenziate dalle simulazioni



Esempio controllo Set-Point N_NH₄



Ricomincia il ciclo di intervento per valutare nuovamente il Set Point



Conclusioni

Le ipotesi definite risultano essere rappresentative per il caso di studio (necessità di analisi input in ingresso e risposta dell'impianto tramite modelli matematici)

Simulazioni con diversi SetPoint hanno definito delle condizioni iniziali idonee per la modellazione tramite BPM

L'utilizzo di BPM, associato all'utilizzo di WEST, risulta essere adeguato per la simulazione di strategie di controllo di impianti di depurazione

Sviluppi futuri

- Implementare il modello definendo in maniera specifica le azioni di ogni singolo blocco
- Sviluppo nuove strategie di controllo e nuovi workflow
- Implementare le logiche considerando anche i componenti del fosforo
- Effettuare delle sperimentazioni in impianto reale
- Implementazione interazione software BPM con WEST

Grazie

Roberto Ricci

E-mail ricciroberto@hotmail.com

Cell. 334-3561159

Torino, 14-15 Ottobre 2015

