Università degli Studi di Siena

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Informatica

Modellistica e Gestione dei Sistemi Ambientali

Negoziazione dei Permessi d'Inquinamento nella Laguna di Orbetello

---

Docente:
Dott.ssa Chiara Mocenni

Studenti:
Guido Bartoli (zero.g80@gmail.com)
Giovanni Canessa (giocanessa@gmail.com)
Emiliano Sparacino (emiliano.s@gmail.com)

Anno accademico 2004–2005

Indice

1 I Permessi Negoziabili **1**

2 L'area lagunare di Orbetello **1**

2.1 Le Aziende 1

2.2 Setup Iniziale 3

2.3 Il problema della Negoziazione 3

2.3.1 Modellizzazione Parametrica del sistema 4

2.3.2 Rete Neurale 11

Elenco delle figure

1 La Laguna di Orbetello 2
2 Modello ibrido 6
3 Investimenti ed inquinamento 9
4 Compravendita dei permessi 9
5 Investimenti ed inquinamento 10
6 Schema della Rete Neurale 12
7 Script `set_aziende.m` 13
8 Script `make_train.m` 14
9 Rappresentazione interna della NN 15
10 MSE durante la fase di Training 15
11 Script `laguna.m` 16

Elenco delle tabelle

1 Le 4 Aziende della Laguna 1
2 Permessi Iniziali 3
3 Matrice di Stato del Sistema 11

1 I Permessi Negoziabili

Il progetto da noi proposto affronta e cerca di risolvere alcune problematiche tipiche dell'Economia Ambientale, ambito in cui si cerca di studiare i processi che regolano l'incremento e la riduzione dell'inquinamento industriale.

In particolare, un Permesso Negoziabile d'Inquinamento è uno speciale permesso ricevuto dall'amministratore che dà la possibilità di produrre una determinata quota di inquinamento; il numero iniziale di questi permessi distribuiti alle aziende generalmente è fissato sulla base dei vincoli economico-ambientali.

I diritti d'inquinamento danno origine ad un vero e proprio mercato di negoziazione, in cui le aziende che hanno permessi in esubero possono venderli ad altre che ne hanno bisogno, e viceversa. L'obiettivo prefissato dall'amministrazione è quello di ridurre l'inquinamento globale di una certa percentuale entro un arco di tempo prestabilito (di solito 3 anni); alla scadenza di quest'ultimo, l'amministrazione ritira i permessi in quantità propozionale ad essa.

Gli agenti, data l'assenza di vincoli locali, dovranno quindi accordarsi per raggiungere tale soglia; ci sarà chi sarà più propenso ad investire in tecnologie atte a ridurre l'inquinamento e chi preferirà invece acquistare permessi per far fronte ad un inquinamento maggiore in mancanza di fondi.

2 L'area lagunare di Orbetello

2.1 Le Aziende

Nella zona di Orbetello prendiamo in considerazione 4 aziende che immettono nella laguna sostanze inquinanti, come l'azoto ed il fosforo; la Fig. 1 mostra la mappa della zona lagunare e la Tab. 1 ne riporta i nomi ed i dati reali d'inquinamento.

	Fatturato 2002	**N (t/y)**	**P (t/y)**	**N/P**
Ittima	€ 1.355.470	29,65	1,33	22,29
Il Vigneto	€ 2.418.504	33,57	1,75	19,18
La Rosa	€ 1.000.000	12,05	0,50	24,10
O.P.L.	€ 1.566.976	7,66	0,40	19,15
Totale	€ 6.340.950	82,93	3,98	**84,72**

Tabella 1: I dati reali delle 4 aziende coinvolte nel progetto (matrice `AZ`).

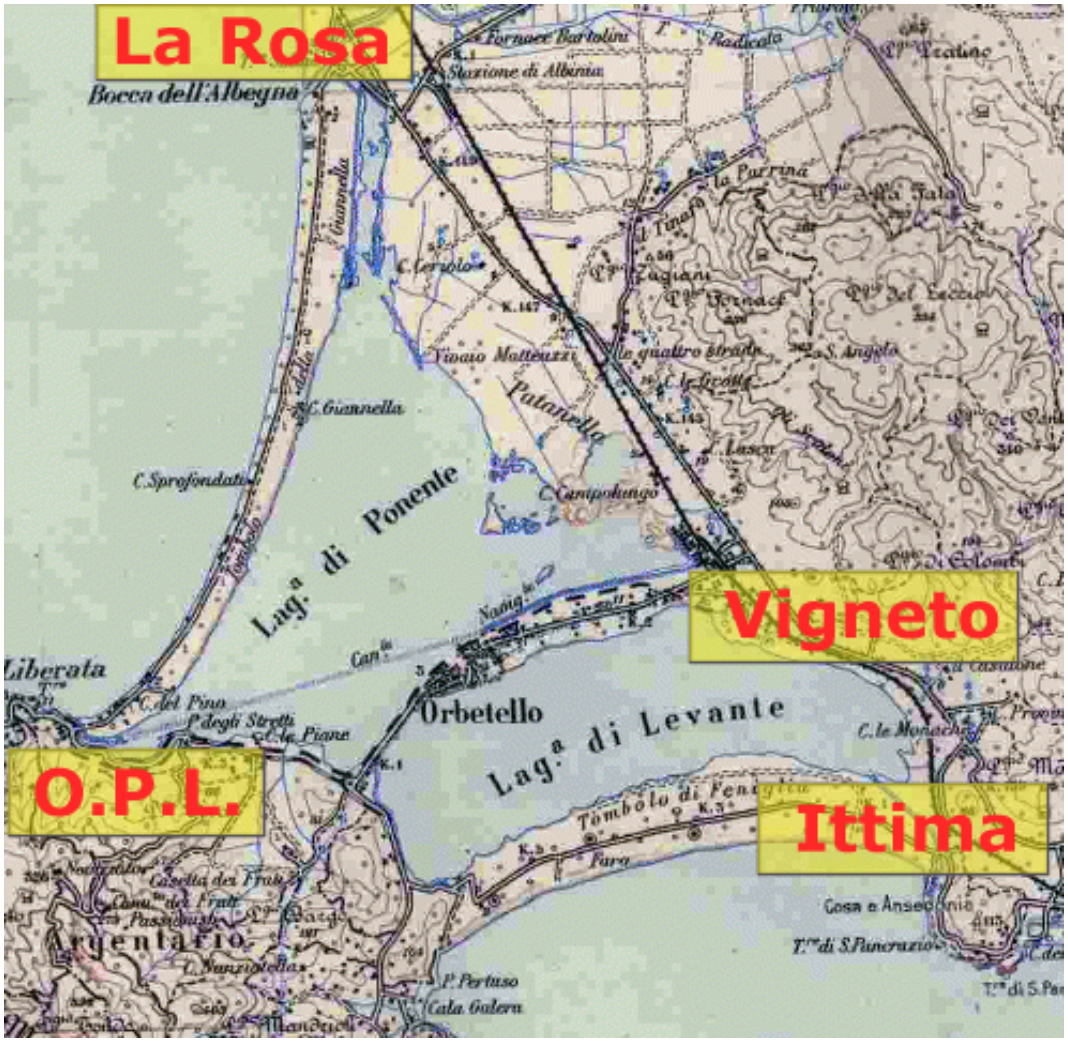

Figura 1: Mappa della Laguna di Orbetello con la posizione delle 4 Aziende.

2.2 Setup Iniziale

L'attribuzione dei permessi iniziali avviene pesando in ugual modo sia il fatturato che il quantitativo di nutrienti immessi nella laguna; questa fase risulta tuttoggi molto critica a causa dell'elevato numero di fattori da prendere in considerazione.

Nel caso da noi esaminato, alle aziende sono stati distribuiti un totale di 160 permessi ad un costo di € 12000 ciascuno secondo la seguente tabella:

Azienda	Permessi
Ittima	38
Il Vigneto	48
La Rosa	36
O.P.L.	38
Totale	**160**

Tabella 2: Il numero iniziale di permessi assegnati a ciascuna azienda.

La nostra analisi si basa anche sul seguente scenario economico: dopo 3 anni l'ente gestore decide che il quantitativo di inquinamento da parte delle aziende deve essere ridotto del 15%; gli agenti, quindi, dovranno accordarsi per raggiungere tale soglia.

Abbiamo inoltre calcolato che € 6000 investiti in tecnologie riducono l'inquinamento di circa l'1% e che un permesso corrisponde in media a circa 2,5% di immissioni consentite.

2.3 Il problema della Negoziazione

Poiché l'attribuzione dei permessi negoziabili avviene ad intervalli regolari nel tempo, che rappresentano comunque un periodo medio-lungo, in quanto presuppongono che le aziende effettuino gli opportuni cambiamenti strutturali ed organizzativi, mentre il mercato in genere viaggia più velocemente; proprio per questo motivo, nasce la necessità di studiare adeguati modelli matematici in grado di simulare gli scambi tra le varie aziende.

Nel campo dell'Economia è molto diffuso l'approccio tramite "scenari", in cui le ipotesi si verificano su situazioni artificiali che abbraccino il maggior numero possibile di casistiche reali; le nostre soluzioni al problema utilizzano approcci più algoritmici, in grado di far fronte anche a condizioni inattese.

Le prossime sezioni tratteranno delle due strade che abbiamo seguito per cercare di risolvere il Problema dei Permessi Negoziabili: come Modellizzazione Ibrida o come apprendimento tramite Rete Neurale.

2.3.1 Modellizzazione Parametrica del sistema

Risoluzione mediante un problema di Programmazione Lineare

Il primo approccio utilizzato per affrontare il problema della negoziazione è stato quello di analizzare il comportamento globale delle aziende. L'obiettivo individuato, quindi, consiste nel minimizzare i costi totali delle 4 aziende, ovvero, le spese derivanti dagli investimenti in tecnologie e dalla negoziazione dei permessi, mediante la seguente funzione obiettivo:

$$\min \qquad \sum_{j=1}^{4} x_{cj}P_p - x_{vj}P_p + x_{ij}P_i$$

dove x_{cj}, x_{vj} sono rispettivamente i permessi comprati e venduti dalla j-esima azienda, x_{ij} l'investimento, P_p e P_i il costo di un singolo permesso e di una quota di investimento. Tale problema è sottoposto a vincoli per evitare di eccedere nel numero di permessi e nelle quote di investimento, più in particolare:

Bilanciamento permessi

$$-\sum_{j=1}^{4} x_{cj} - x_{vj} = 0$$

$$-\sum_{k\neq j} x_{vk} + x_{cj} \leq 0 \quad \forall j$$

Vincoli di inquinamento

$$-\sum_{j=1}^{4} x_{ij} \leq -15$$

$$2x_{cj} - 2x_{vj} + x_{ij} = 0 \quad \forall j$$

Vincoli di investimento

$$x_{cj}P_p - x_{vj}P_p + x_{ij}P_i \leq MaxInv \quad \forall j$$

$$x_{ij} \leq MaxTec \quad \forall j$$

I risultati ottenti non sono stati però soddisfacenti, in quanto la soluzione ottima consiste nel far investire ad ogni azienda il necessario per ridurre l'inquinamento senza innescare la negoziazione dei permessi. Questo approccio, infatti, si pone dalla parte dell'amministratore il quale ha come obiettivo proprio questa soluzione; ciò è dovuto al fatto che non si tiene conto dei vincoli locali di ogni azienda, come la propensione all'investimento ed alla compravendita dei permessi e dal fatto che il sistema evolve nel tempo.

Risoluzione mediante un sistema tempo discreto

Proprio per i motivi citati nel paragrafo precedente, ci siamo indirizzati verso l'utilizzo di un sistema tempo invariante e tempo discreto, in cui lo stato è rappresentato dai parametri delle singole aziende e da quelli del sistema, che in generale può essere rappresentato come di seguito:

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)) \\ y(k) = h(x(k)) \end{cases}$$

dove:

Variabili di stato:

- Riduzione dell'inquinamento in percentuale;
- Propensione all'acquisto di permessi da parte di un'azienda;
- Permessi venduti da un'azienda;
- Permessi comprati da un'azienda;
- Prezzo del singolo permesso;

Ingressi:

- Fatturato per azienda;
- Permessi iniziali di un'azienda;
- Permessi totali in circolazione;

Uscite:

- Permessi per azienda;
- Investimento per azienda;

Il sistema ricavato, però, oltre ad avere una dinamica non lineare, non riesce a soddisfare i vincoli sia sui permessi venduti ed acquistati da ogni singola azienda, sia sulla distribuzione degli investimenti tra le varie aziende.

Modellizzazione *ibrida*

I sistemi precedentemente descritti, se presi singolarmente, hanno dei limiti nella modellizzazione del sistema; formulando il problema in termini di programmazione lineare non viene descritta la dinamica del sistema, mentre con un sistema tempo discreto non possono essere posti i vincoli sulle singole aziende. Per

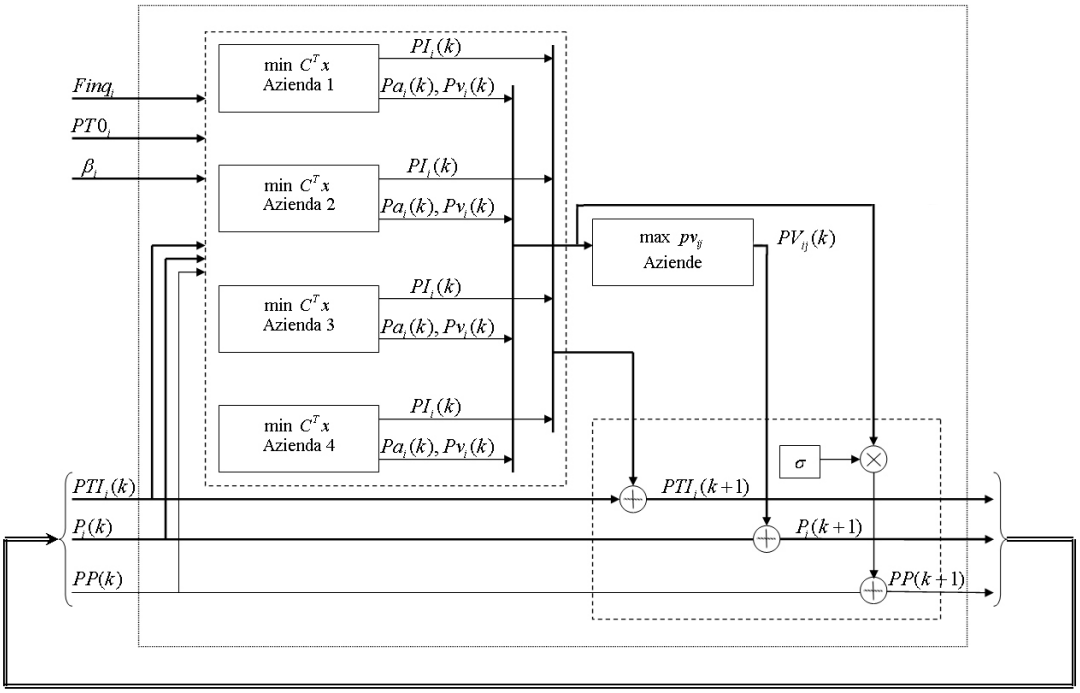

Figura 2: Schema del modello ibrido

questo motivo abbiamo pensato di fondere i due metodi per compensare i limiti sopra esposti e trarne maggiore vantaggio. Il risultato ottenuto è un sistema *ibrido* che può essere descritto tramite lo schema di Fig 2.

Come è possibile vedere, possono essere individuate tre sezioni: una parte in cui vengono minimizzati i costi delle singole aziende; un problema di massimizzazione in cui viene regolata la compravendita dei permessi ed infine l'aggiornamento temporale delle variabili si stato. Analizziamo nel dettaglio queste tre parti.

Variabili:

PA_i: Necessità di permessi;
PV_i: Permessi vendibili;
PI_i: Quota di investimento corrispondente a €6000;
P_i: Permessi posseduti;
$PT0_i$: Permessi iniziali;
PTI_i: Totale investimenti;
β_i: Percentuale fatturato investito;
$Finq_i$: Rapporto inquinamento/permesso;
PV_{ij}: Permessi venduti dall'azienda i all'azienda j;
PP: Prezzo permesso.

Minimizzazione dei costi delle singole aziende

Questo modulo si occupa di minimizzare i costi di ogni singola azienda mediante la risoluzione di un problema di PL. I costi di cui teniamo conto sono quelli relativi alla compravendita dei permessi e quelli sostenuti per l'investimento in tecnologia. Inoltre vengono posti dei vincoli sulle variabili; in particolare abbiamo stabilito una soglia sull'investimento, un limite ai permessi da vendere ed infine un vincolo per rispettare la percentuale di riduzione di inquinamento richiesta.

$$
\begin{aligned}
min \qquad & PA_i(k) \cdot PP(k) - PV_i(k) \cdot PP(k) + PI_i(k) \cdot 6000 \qquad (1)\\
& PV_i(k) \leq P_i(k) - (PT0_i + PT0_i \cdot 15\%) + \frac{PTI_i(k)}{Finq_i}\\
& PI_i(k) \leq \beta_i\\
& (P_i(k) + PA_i(k) - PV_i(k)) \cdot Finq_i + PTI_i(k) + PI_i(k) \geq 15\\
& PA_i(k), PV_i(k), PI_i(k) \geq 0
\end{aligned}
$$

Risolvendo questo problema ad ogni passo viene trovata la soluzione ottima per rispettare la riduzione di inquinamento minimizzando i costi. Tuttavia non viene garantita l'effettiva compravendita dei permessi in quanto l'azienda può non avere riscontro alla sua domanda o offerta di permessi.

Compravendita dei permessi

La soluzione al problema sopra esposto viene fornita da questo modulo. La domanda e l'offerta di ogni singola azienda viene data in ingresso ad un problema di programmazione lineare in cui si cerca di massimizzare la vendita dei permessi delle singole aziende. I vincoli posti sono quelli che ci permettono di evitare che un'azienda venda o acquisti più permessi di quanto è stato calcolato al passo precedente.

$$
\begin{aligned}
max \qquad & \sum_i \left(\frac{PA_i(k)}{\sum_k PA_k(k)} \sum_j \left(\frac{PA_i(k)}{\sum_{k!=j} PA_k(k)} \cdot PV_{ji}(k) \right) \right) \qquad (2)\\
& \sum_i PV_{ji}(k) \leq PV_j(k) \quad \forall j\\
& \sum_j PV_{ji}(k) \leq PA_i(k) \quad \forall i\\
& PV_{ji}(k) \quad \forall i,j \geq 0
\end{aligned}
$$

Una volta ottenuta la soluzione al problema è possibile procedere con l'aggiornamento temporale delle variabili di stato.

Aggiornamento temporale delle variabili

Le variabili da aggiornare ad ogni passo sono il numero di permessi per azienda, il totale degli investimenti ed il nuovo prezzo di un permesso. Quest'ultimo viene calcolato in base alla domanda ed all'offerta di permessi.

$$PTI_i(k+1) = PTI_i(k) + PI_i(k)$$

$$P_i(k+1) = P_i(k) + \sum_j PV_{ji}(k) - \sum_k PV_{ik}(k)$$

$$PP(k+1) = PP(k) + \sigma \cdot \left(\sum_i PA_i(k) - \sum_i PV_i(k) \right)$$

I risultati ottenuti vengono poi reimmessi nel sistema.

Analizzando i risultati ottenuti con il metodo ibrido abbiamo notato che i punti deboli messi in evidenza dagli altri metodi vengono eliminati. Fissando delle soglie di investimento per ogni azienda il mercato dei permessi si attiva ed ogni azienda cerca di ottimizzare le proprie decisione per raggiungere l'obiettivo prefissato. Per spiegare meglio la dinamica del sistema riportiamo alcuni risultati.

Tutte le aziende investono il necessario per ridurre l'inquinamento: In questo caso le aziende rimangono in possesso dei permessi iniziali, in quanto, pur avendo possibilità di vendere non ne esiste nessuna disposta a comprare (fig. 3);

Alcune aziende investono più delle altre: In questo caso le aziende che investono di più riescono a vendere alcuni permessi che saranno acquistati dalle aziende che con il proprio investimento non riescono a raggiungere la riduzione dell'inquinamento desiderata (fig. 4);

Nessuna azienda investe il necessario: A causa della scarsa disponibilità economica delle aziende, l'inquinamento non viene ridotto della percentuale richiesta; quindi il mercato dei permessi non si attiva (fig. 5).

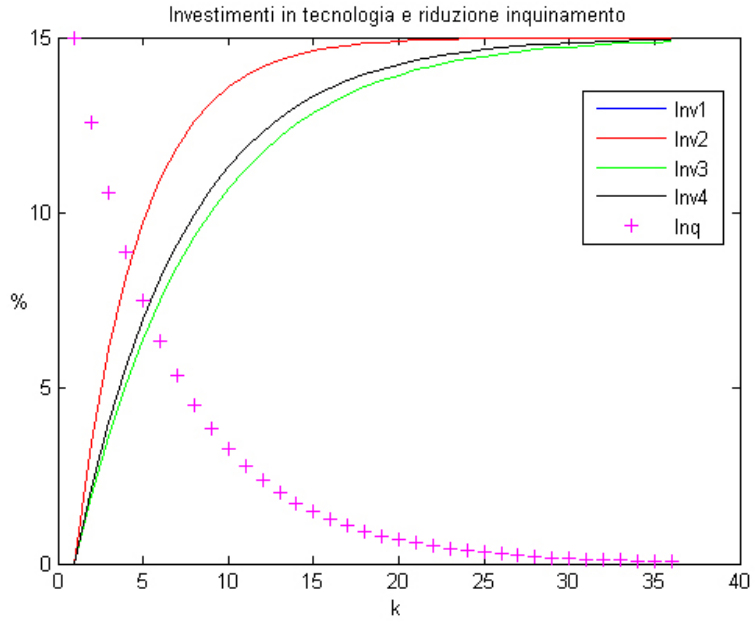

Figura 3: Andamento degli investimenti e dell'inquinamento in percentuale

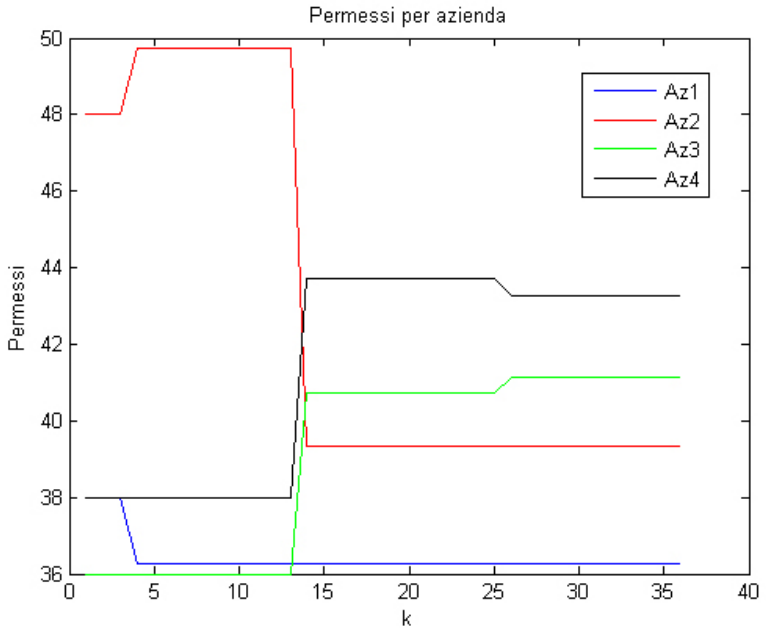

Figura 4: Compravendita dei permessi

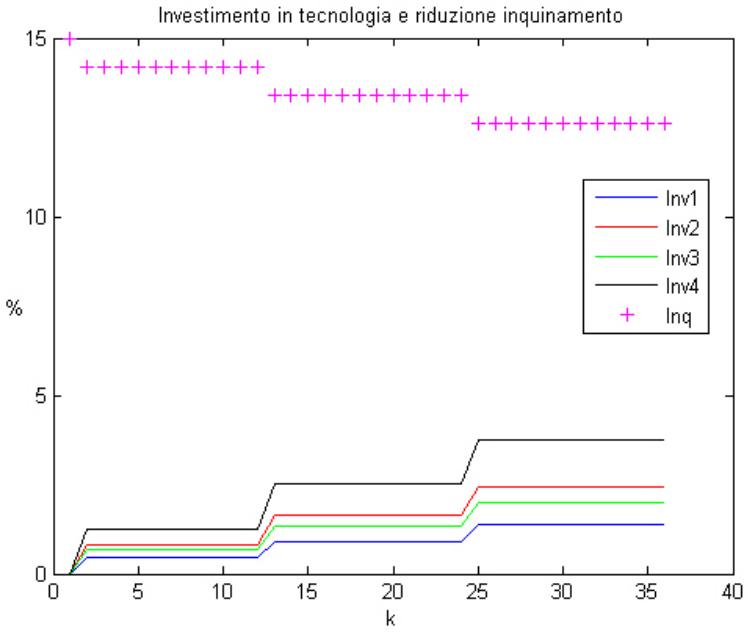

Figura 5: Andamento degli investimenti e dell'inquinamento in percentuale

2.3.2 Rete Neurale

Dopo aver valutato i risultati ottenuti tramite il metodo ibrido, abbiamo deciso di fare anche qualche sperimentazione con le reti neurali, in modo da avere un'idea migliore degli approcci applicabili a questo tipo di problema.

Parametri d'ambiente Per modellare lo stato di una delle 4 aziende abbiamo utilizzato le seguenti variabili (tra parentesi quadre è riportata la sigla utilizzata all'interno del programma)

1. Capitale attuale (in €) [CAP]
2. Propensione all'Acquisto (n° permessi) [PACQ]
   (indica la necessità di ottenere nuovi permessi)
3. Tasso d'inquinamento (N/P) [INQ]
   (riporta la quantità attuale di emissioni)
4. N° Permessi posseduti [PER]

Fatte queste premesse, in ogni istante, la situazione globale del sistema è rappresentata attraverso dalla seguente matrice:

Azienda 1	**Azienda 2**	**Azienda 3**	**Azienda 4**
$CAP1$	$CAP2$	$CAP3$	$CAP4$
$PACQ1$	$PACQ2$	$PACQ3$	$PACQ4$
$INQ1$	$INQ2$	$INQ3$	$INQ4$
$PER1$	$PER2$	$PER3$	$PER4$

Tabella 3: Matrice rappresentativa dello stato globale delle 4 aziende.

Prendendo in esame una singola azienda ed indicando con (1), (2) e (3) le altre 3, ognuna di esse necessita dei seguenti parametri per poter prendere una decisione sull'investimento o sulla vendita di permessi:

1. Capitale attuale (in €) [CAP]
2. Propensione all'Acquisto della (1) [PACQ1]
3. Propensione all'Acquisto della (2) [PACQ2]
4. Propensione all'Acquisto della (3) [PACQ3]
5. Tasso d'inquinamento attuale [INQ]
6. N° Permessi posseduti [PER]

Una "decisione" consiste principalmente nell'insieme dei seguenti 4 valori, che indicano la quantità degli investimenti e dei permessi venduti alle altre aziende:

1. Fondi investiti in tecnologia [INV]
2. Permessi venduti all'Azienda 1 [PV1]
3. Permessi venduti all'Azienda 2 [PV2]
4. Permessi venduti all'Azienda 3 [PV3]

Architettura neurale Per quanto riguarda la struttura della rete, abbiamo optato per un MULTILAYER PERCEPTRON con un hidden layer a funzioni di attivazione sigmoidali; anche il layer di output utilizza sigmoidi, più precisamente `logsig`, che garantiscono che l'output rientri nel range [0,1]. La rappresentazione grafica della rete è schematizzata nella Fig. 6.

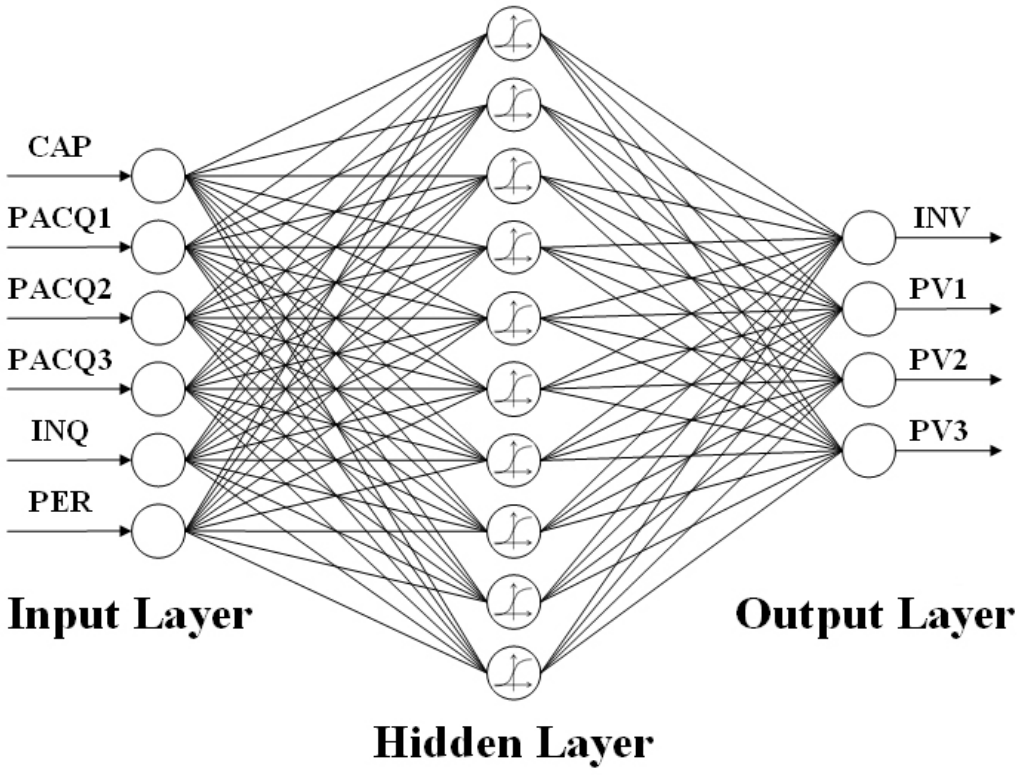

Figura 6: Schema della rete neurale utilizzata nel secondo approccio.

Secondo la nostra schematizzazione, la rete prende in ingresso proprio i 6 valori relativi allo stato attuale dell'azienda e restituisce come output la decisione in termini di investimento e vendita di permessi; per addestrare e testare la rete neurale ci siamo avvalsi del Neural Network Toolbox di MATLAB.

Script di gestione Il flusso del programma è gestito dallo script `laguna.m` che contiene i valori delle variabili globali e in base all'input dell'utente lancia i seguenti script specifici:

1. `set_aziende.m` — permette di impostare manualmente i dati iniziali delle aziende (la matrice `AZ`) oppure di caricarli da file (Fig. 7);
2. `make_train.m` — genera casi d'esempio per la creazione del training set (input + output) oppure lo carica direttamente da file (Fig. 8);
3. `train_net.m` — addestra la rete sulla base del training set fornito utilizzando la Resilient BackPropagation come algoritmo di learning ed un massimo di 15 epoche per evitare problemi di *overfitting* (Fig. 10).

Le seguenti figure mostrano alcuni esempi dell'output di questi script in ambiente MATLAB.

```
-=[ L A G U N A   D I   O R B E T E L L O ]=-

** DATI INIZIALI **
>> Inserimento manuale (1) o Caricamento da file (2)? 1

** AZIENDA 1 **
>> [CAP] Capitale totale (in €): 1500000
>> [PACQ] Propensione all'Acquisto (permessi): 0
>> [INQ] Tasso d'Inquinamento (N/P): 25.3
>> [PER] Numero di Permessi: 38
 > dati memorizzati...

** AZIENDA 2 **
>> [CAP] Capitale totale (in €): 2000000
>> [PACQ] Propensione all'Acquisto (in %): 0
>> [INQ] Tasso d'Inquinamento (N/P): 28.1
>> [PER] Numero di Permessi: 26
 > dati memorizzati...

** AZIENDA 3 **
>> [CAP] Capitale totale (in €):
.. ..... ......................
```

Figura 7: Output testuale dello script `set_aziende.m`

```
** TRAINING SET **
>> Inserimento manuale (1) o Caricamento da file (2)? 1

 > Dati in ingresso:
   - CAP   = € 1548755 (capitale)
   - PACQ1 = 11 permessi (prop. acquisto azienda 1)
   - PACQ2 = 11 permessi (prop. acquisto azienda 2)
   - PACQ3 = 1 permessi (prop. acquisto azienda 3)
   - INQ   = 22.9102 N/P (azoto-potassio all'anno)
   - PER   = 29 permessi (posseduti)

>> Fondi investiti in tecnologia (15 % = € 90000): 150000
   - Riduzione inquinamento  = 25 %
   - Capitale residuo        = € 1398755
   - Bilancio permessi (+/-) = 5
>> Permessi venduti all'Azienda 1: 3
   - Riduzione inquinamento (1) = 7.8 %
   - Ricavo dalla vendita   (1) = € 36000
>> Permessi venduti all'Azienda 2: 2
   - Riduzione inquinamento (2) = 5.2 %
   - Ricavo dalla vendita   (2) = € 24000
>> Permessi venduti all'Azienda 3: 0
   - Riduzione inquinamento (3) = 0 %
   - Ricavo dalla vendita   (3) = € 0
 > esempio aggiunto

>> Altro esempio? (1 = SI, 0 = NO) 1

 > Dati in ingresso:
   - CAP   = € 214204 (capitale)
   - PACQ1 = 1 permessi (prop. acquisto azienda 1)
   - PACQ2 = 20 permessi (prop. acquisto azienda 2)
   - PACQ3 = 8 permessi (prop. acquisto azienda 3)
   - INQ   = 35.9117 N/P (azoto-potassio all'anno)
   - PER   = 50 permessi (posseduti)

>> Fondi investiti in tecnologia (15 % = € 90000):
.. ........................................
```

Figura 8: Output testuale dello script `make_train.m`

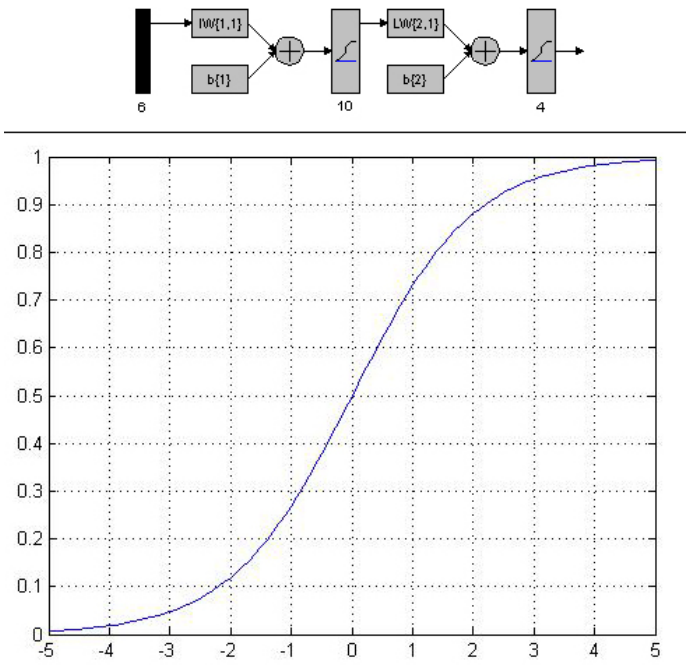

Figura 9: Rappresentazione della rete all'interno del toolbox e grafico della funzione `logsig` di attivazione.

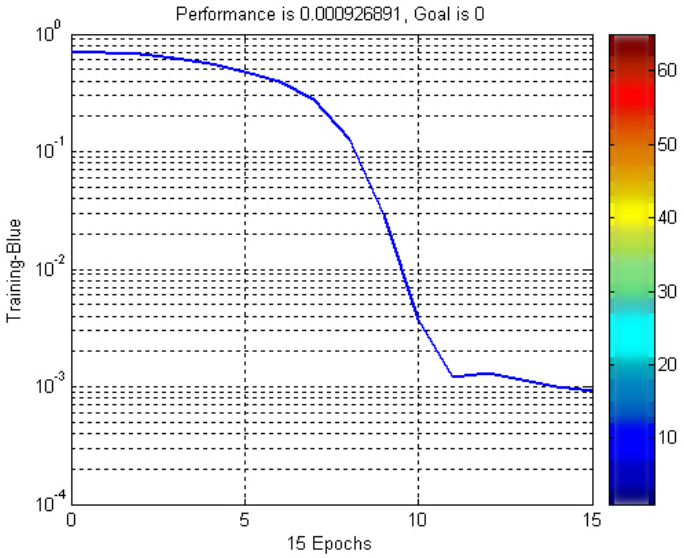

Figura 10: Andamento grafico dell'MSE durante la fase di training mediante Resilient BackPropagation.

Training La fase di addestramento consiste in uno script che genera dati "sintetici" casuali in modo da coprire più casistiche possibili, coerentmente con i vincoli del sistema (numero totale di permessi, capitale disponibile, valori massimi di inquinamento, ecc...); per ogni caso presentato, l'utente inserisce la quantità di fondi investiti ed i permessi venduti in base alla disponibilità di capitale ed alle propensioni d'acquisto delle altre aziende.

L'idea di base è quella di riuscire a catturare mediante la rete il ragionamento condotto dall'uomo in queste situazioni, in modo da modellare in qualche modo questa logica e fornire un supporto per la decisione in fase di simulazione.

Simulazione Terminate queste fasi preliminari, lo script principale passa alla fase successiva, in cui, a partire dalla matrice dei dati iniziali, la situazione di ogni azienda viene proposta all'utente che dovrà decidere in base ai dati in ingresso, ma verrà comunque proposto il suggerimento fornito in uscita dalla rete che agirà sui medesimi valori; in Fig. 11 è mostrata una sessione di simulazione, con indicati tra parentesi quadre i corrispondenti output della rete.

```
** SIMULAZIONE **
 > AZIENDA 1:
   - CAP   = € 1350000 (capitale)
   - PACQ1 = 8 permessi (prop. acquisto azienda 1)
   - PACQ2 = 2 permessi (prop. acquisto azienda 2)
   - PACQ3 = 6 permessi (prop. acquisto azienda 3)
   - INQ   = 22.2932 N/P (azoto-potassio all'anno)
   - PER   = 38 permessi (posseduti)

>> Fondi investiti in tecnologia [182429] : 180000
   - Riduzione inquinamento  = 30 %
   - Capitale residuo        = € 1170000
   - Bilancio permessi (+/-) = 7
>> Permessi venduti all'Azienda 1 [4] : 3
   - Riduzione inquinamento (1) = 7.8 %
   - Ricavo dalla vendita   (1) = € 36000
>> Permessi venduti all'Azienda 2 [1] : 1
   - Riduzione inquinamento (2) = 2.6 %
   - Ricavo dalla vendita   (2) = € 12000
>> Permessi venduti all'Azienda 3 [2] : 2
   - Riduzione inquinamento (3) = 5.2 %
   - Ricavo dalla vendita   (3) = € 24000
```

Figura 11: Output testuale dello script `laguna.m` durante la fase di Simulazione.

La procedura di simulazione segue quindi questi passi:

1. carica i dati dell'azienda in esame dalla matrice `AZ` e li presenta all'utente;
2. usa questi ultimi come input per la rete ed i suoi output vengono forniti come suggerimento;
3. raccoglie i valori immessi dall'utente ed aggiorna la matrice `AZ` ridistribuendo i permessi e ricalcolando il nuovo capitale;
4. passa all'azienda successiva e riapplica la procedura (punto 1).

Il training set che abbiamo costruito contiene circa 40 esempi, che però può essere incrementato con l'inserimento manuale; maggiore è il numero di esempi, maggiore diventa la capacità di generalizzazione della rete. Il numero di neuroni dello strato nascosto è stato fissato inizialmente a 10, ma poi è stato ridotto a 5 perché non si è notato un incremento sensibile della qualità.

Durante la fase di simulazione, abbiamo osservato che la rete fornisce in genere risposte abbastanza coerenti nella maggior parte dei casi, e che quindi risulta essere uno strumento di approssimazione non preciso come l'approccio ibrido sopra descritto, ma che comunque può essere impiegato come generico sistema di supporto alle decisioni per questo problema.