

Sistemi multiagente per la gestione delle risorse idriche

Francesco Amigoni, Andrea Castelletti, Matteo Giuliani

Politecnico di Milano

{francesco.amigoni, andrea.castelletti, matteo.giuliani}@polimi.it

Abstract

La adeguata modellazione dei *sistemi idrici* è alla base di una loro efficiente organizzazione e regolazione, per esempio per pianificare la produzione di energia idro-elettrica. In alternativa ai modelli centralizzati, recentemente sono stati proposti approcci distribuiti per meglio rappresentare i diversi decisori coinvolti nella gestione di sistemi idrici complessi. Questo documento riassume alcuni dei contributi che gli autori hanno fornito impiegando modelli e tecniche di intelligenza artificiale, in particolare dei *sistemi multiagente*, per la gestione delle risorse idriche.

1 Introduzione

La disponibilità di modelli di *sistemi idrici*, composti da fiumi, laghi e bacini artificiali, è di fondamentale importanza per informare le decisioni sulla loro gestione, per esempio al fine di organizzare e pianificare la produzione di energia idro-elettrica o la distribuzione di acqua all'agricoltura irrigua.

I sistemi idrici sono stati spesso modellati seguendo un approccio *centralizzato*, nel quale si assume la presenza di un singolo gestore che ottimizza un singolo obiettivo globale (o sociale). Pur essendo solidamente ancorato nella teoria classica dei problemi di ottimizzazione [Castelletti *et al.*, 2008] e fornendo risultati utili in molti scenari, tale approccio risulta però non sempre adeguato nel rappresentare situazioni in cui molteplici decisori sono coinvolti nella gestione e nell'utilizzo allo stesso sistema idrico, per esempio nel caso di sistemi idrici transnazionali. In queste situazioni, le soluzioni ottime (cioè che massimizzano l'obiettivo globale) individuate dall'approccio centralizzato potrebbero non essere realizzabili in pratica, a causa delle difficoltà nell'imporre ai diversi decisori coinvolti il rispetto di quanto prescritto da tali soluzioni.

Di conseguenza, sono stati recentemente proposti approcci di tipo *distribuito* alla modellazione e alla gestione di sistemi idrici [Giuliani *et al.*, 2015]. Questi approcci possono prevedere che i decisori calcolino indipendentemente soluzioni localmente ottime e non coordinate (che, quindi, possono produrre effetti indesiderati a livello globale) o che i decisori impieghino qualche meccanismo di coordinamento fra le soluzioni calcolate localmente (tali meccanismi modellano, per

esempio, alcune delle attività svolte dalle istituzioni e delle autorità per la gestione delle risorse idriche). In questo secondo caso, le soluzioni trovate sono spesso sub-ottime, ma risultano essere accettabili per i decisori coinvolti [Giuliani e Castelletti, 2013], e si stanno quindi affermando come preferibili alle soluzioni ottime calcolate con un approccio centralizzato che, come detto, sono spesso non accettabili per i decisori.

Questo documento riassume alcuni dei contributi che gli autori hanno fornito nell'ambito applicativo appena delineato, impiegando modelli e tecniche di intelligenza artificiale, e in particolare dei *sistemi multiagente*, per la gestione delle risorse idriche. L'idea di fondo è rappresentare i decisori coinvolti nella gestione di una risorsa idrica come *agenti autonomi* e modellare l'interazione fra i diversi decisori usando tecniche di ottimizzazione distribuita e di negoziazione cooperativa fra questi agenti. Le sezioni seguenti descrivono con qualche dettaglio due di questi contributi. Attualmente gli autori, in collaborazione con alcune aziende, stanno applicando l'approccio qui illustrato alla gestione di sistemi idrici complessi per ottimizzare la produzione di energia idro-elettrica.

2 Ottimizzazione multi-obiettivo distribuita per la gestione di sistemi idrici

Consideriamo un sistema idrico composto da insieme di fiumi ramificati e da bacini per la generazione di energia idro-elettrica. In questo contesto, gli *stakeholder* sono individuabili come i gestori degli impianti idro-elettrici, le municipalità che si affacciano sui fiumi e che prelevano acqua a scopo idropotabile e gli agricoltori che impiegano l'acqua per irrigare. Inoltre, un quarto stakeholder può essere rappresentato dagli interessi ecologici, per esempio la preservazione dell'ecosistema dei pesci dei fiumi. Il sistema idrico descritto incorpora caratteristiche, come la asimmetria valle-monte, la presenza di decisori multipli e di obiettivi primari (produzione di energia idro-elettrica e irrigazione) e secondari (interessi ecologici), riscontrabili nei casi del fiume Nilo, del fiume Giallo e dello Zambesi. La gestione di un sistema idrico di questo tipo deve bilanciare i diversi obiettivi degli stakeholder.

Nell'approccio adottato dagli autori per modellare tali sistemi, ogni stakeholder (città, impianti di produzione di energia idro-elettrica, agricoltori, ecosistema) è rappresentato da un agente i che controlla una o più variabili decisionali x_i

(per esempio, la quantità di acqua prelevata o rilasciata da un fiume o da un bacino). Ogni agente agisce in modo da ottimizzare una funzione obiettivo f_i (anche non lineare) e da soddisfare alcuni vincoli. I vincoli possono essere di due tipi: hard e soft. Nel primo caso, i vincoli sono fisici e non possono essere violati; per esempio non è possibile prelevare da un fiume più acqua di quanta ne sia effettivamente presente. Nel secondo caso, i vincoli sono normativi e possono essere violati pagando un costo, come per esempio quelli relativi al deflusso minimo vitale da garantire *ex lege* nei corsi d'acqua. Gli autori hanno proposto un sistema basato sulla ottimizzazione multi-obiettivo [Amigoni *et al.*, 2015] per il problema della gestione di tali sistemi idrici. Lo scopo è ottimizzare gli obiettivi degli agenti e, contemporaneamente, minimizzare i costi relativi alla violazione dei vincoli. Dati n agenti, quindi, il sistema ottimizza $n + 1$ obiettivi tramite un *algoritmo di ottimizzazione multi-obiettivo distribuito*, appartenente alla famiglia degli algoritmi per risolvere Distributed Constraint Satisfaction Problems (DCOPs), che è in grado di calcolare un'approssimazione della frontiera di Pareto per il problema. I risultati sperimentali, ottenuti con dati sintetici ma realistici, mostrano che l'approssimazione è di buona qualità in molti casi di rilevanza pratica.

3 Negoziazione cooperativa per la gestione di sistemi idrici

Nel modello illustrato sopra l'interazione fra i diversi agenti è limitata allo scambio di informazioni (che nella pratica può essere implicito, rilevando i livelli dell'acqua, o esplicito, dichiarando le proprie azioni) sulla quantità di acqua da prelevare o rilasciare, nel rispetto dei vincoli comuni. Per il resto, ogni agente agisce indipendentemente ottimizzando la propria funzione obiettivo. Una forma più complessa di interazione fra gli agenti è offerta dalla *negoziiazione cooperativa*, che gli autori hanno impiegato nella modellazione di sistemi idrici e, in particolare del lago di Como. I due principali stakeholder coinvolti sono le municipalità delle città che si affacciano sul lago e gli agricoltori che, a valle, usufruiscono dell'acqua del fiume Adda che defluisce dal lago regolata da una diga. La diga è controllata da un gestore (umano) che bilancia fra le esigenze opposte di questi due stakeholder: le città vorrebbero far defluire più acqua possibile per evitare rischi di inondazioni mentre gli agricoltori vorrebbero conservare nel lago più acqua possibile per poi impiegarla nei periodi di siccità.

Il modello creato per questo scenario [Amigoni *et al.*, 2016] ricalca quello delineato in precedenza in cui due agenti, rappresentati i due stakeholder, controllano alcune variabili decisionali, che in questo caso rappresentano le politiche di rilascio (cioè quanta acqua rilasciare in base a quanta acqua è presente nel lago), e ottimizzano ciascuno una propria funzione obiettivo. I due agenti periodicamente effettuano una negoziazione cooperativa al fine di trovare un accordo sulla politica di rilascio. La negoziazione cooperativa è un processo iterativo per il quale gli agenti coinvolti raggiungono un accordo attraverso uno scambio di proposte incrementalmente più favorevoli all'avversario (concessione monotona). In pratica, ad ogni turno di negoziazione t , ogni agente i invia a

un mediatore l'insieme \mathcal{P}_i^t delle politiche di rilascio che l'agente considera accettabili (al tempo $t = 0$, l'agente propone la miglior politica sulla base della propria funzione obiettivo). Il mediatore interseca gli insiemi di politiche di rilascio ricevute dagli agenti e determina se un accordo è stato trovato (cioè se c'è almeno una politica proposta da tutti gli agenti) o meno. Nel primo caso, la negoziazione termina con l'accordo mentre, nel secondo caso, la negoziazione prosegue al turno $t + 1$ e gli agenti formulano nuove proposte tali che $\mathcal{P}_i^{t+1} \supseteq \mathcal{P}_i^t$. Tale protocollo garantisce di raggiungere un accordo che è Pareto ottimo rispetto alla funzioni obiettivo degli agenti.

L'approccio appena descritto è poi arricchito dalla possibilità di modellare la "rigidità" di un agente nel concedere (cioè nel passare da \mathcal{P}_i^t a \mathcal{P}_i^{t+1}) sulla base dell'esperienza passata del corrispondente stakeholder. Per esempio, se l'agente rappresentante le municipalità ha subito delle inondazioni nel recente passato, allora sarà rigido nell'allontanarsi dalla politica di rilascio che massimizza la sua funzione obiettivo e proporrà un insieme \mathcal{P}_i^{t+1} molto simile a \mathcal{P}_i^t . Il modello è così in grado di catturare e spiegare l'andamento dei dati storici di rilascio del lago di Como [Mason *et al.*, 2018].

Riferimenti bibliografici

- [Amigoni *et al.*, 2015] F. Amigoni, A. Castelletti, e M. Giuliani. Modeling the management of water resources systems using multi-objective DCOPs. In *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 821–829, 2015.
- [Amigoni *et al.*, 2016] F. Amigoni, A. Castelletti, P. Gazzotti, M. Giuliani, e E. Mason. Using multiagent negotiation to model water resources systems operations. In N. Osman e C. Sierra, editors, *Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS2016 Workshops, Best Papers, Singapore, Singapore, May 9-10, 2016, Revised Selected Papers*, volume LNCS 10002, pages 51–72. Springer, 2016.
- [Castelletti *et al.*, 2008] A. Castelletti, F. Pianosi, e R. Soncini-Sessa. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints. *Automatica*, 44(6):1595–1607, 2008.
- [Giuliani *et al.*, 2015] M. Giuliani, A. Castelletti, F. Amigoni, e X. Cai. Multiagent systems and distributed constraint reasoning for regulatory mechanism design in water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(4):1–12, 2015. Best Research-Oriented Paper.
- [Giuliani e Castelletti, 2013] M. Giuliani e A. Castelletti. Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources systems by agent-based optimization. *Water Resources Research*, 49:3912–3926, 2013.
- [Mason *et al.*, 2018] E. Mason, M. Giuliani, A. Castelletti, e F. Amigoni. Identifying and modeling dynamic preference evolution in multipurpose water resources systems. *Water Resources Research*, 54(4):3162–3175, 2018.