



A network approach to decentralized coordination
of energy production-consumption grids

Giuseppe Orlando
Matricola 878776

05/09/2018

Introduzione

In questo lavoro si considera un approccio a livello di rete per la produzione di energia in maniera decentralizzata.

Al giorno d'oggi le infrastrutture delle reti elettriche stanno diventando obsolete ed insicure; pertanto non sono in grado di sostenere la sempre maggior richiesta di energia e non sono rari gravi guasti come i blackouts.

Inoltre lo sviluppo e l'importanza a livello ambientale delle risorse rinnovabili è incompatibile sia con l'inflessibilità strutturale dell'odierna rete che impedisce una agevole implementazione delle fonti di energia rinnovabili sia con l'idea di produzione a larga scala delle aziende presenti nel mercato, vista la disponibilità di unità produttive su piccola scala che idealmente permettono ad ognuno non solo di generare energia, ma anche di rivendere quella in eccesso con un notevole risparmio economico per l'utente finale.

Introduzione

Definizione

Una **microgrid** è una fonte distribuita localmente per la produzione ed il consumo di energia capace di essere disconnessa dalla rete elettrica e di funzionare autonomamente.

Le microgrids stanno diventando perciò un importante complemento o addirittura un'alternativa alla produzione centralizzata.

Qui si propone un semplice modello per studiare la coordinazione raggiunta dagli elementi nella rete quando si considera un'interazione locale invece della ben più costosa coordinazione globale.

Modello

Consideriamo una popolazione di N utenti organizzati in una rete sconnessa dalla rete elettrica principale ed assumiamo che ogni utente sia descritto da una variabile binaria $\lambda_i (i = 1 \dots N)$ che vale 1 se i è ON e 0 se i è OFF.

L'obiettivo di controllo è caratterizzato in termini del parametro $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ che rappresenta la frazione di utenti che dovrebbero trovarsi allo stato ON.

Ad ogni passo dell'algoritmo un utente i è selezionato casualmente dalla popolazione e, siccome il nodo i possiede solo una conoscenza parziale della rete, si valuta la **configurazione locale** del sistema centrata sull'utente i , definita come

$$\chi(i) = \frac{\lambda_i + \sum_{n \in N(i)} \lambda_n}{1 + k_i}$$

dove $N(i)$ rappresenta l'insieme dei vicini del nodo i e k_i è il grado (ovvero il numero di vicini) dell'utente i .

Modello

Successivamente si calcola la configurazione locale centrata sul nodo i se quest'ultimo cambiasse stato, ovvero:

$$\hat{\chi}(i) = \frac{1 - \lambda_i + \sum_{n \in N(i)} \lambda_n}{1 + k_i}$$

L'idea è di confrontare le due possibili configurazioni locali con la configurazione di riferimento α : se $|\alpha - \hat{\chi}(i)| < |\alpha - \chi(i)|$ l'utente i cambia stato, altrimenti conserva quello attuale.

Infine definiamo il **livello di coordinazione** C

$$C = 1 - \left| \alpha - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i \right|$$

e il **livello di alterazione** A

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\lambda_i(t_\infty) - \lambda_i(t_0)|$$

Coordinazione ottimale per reti Erdos-Renyi

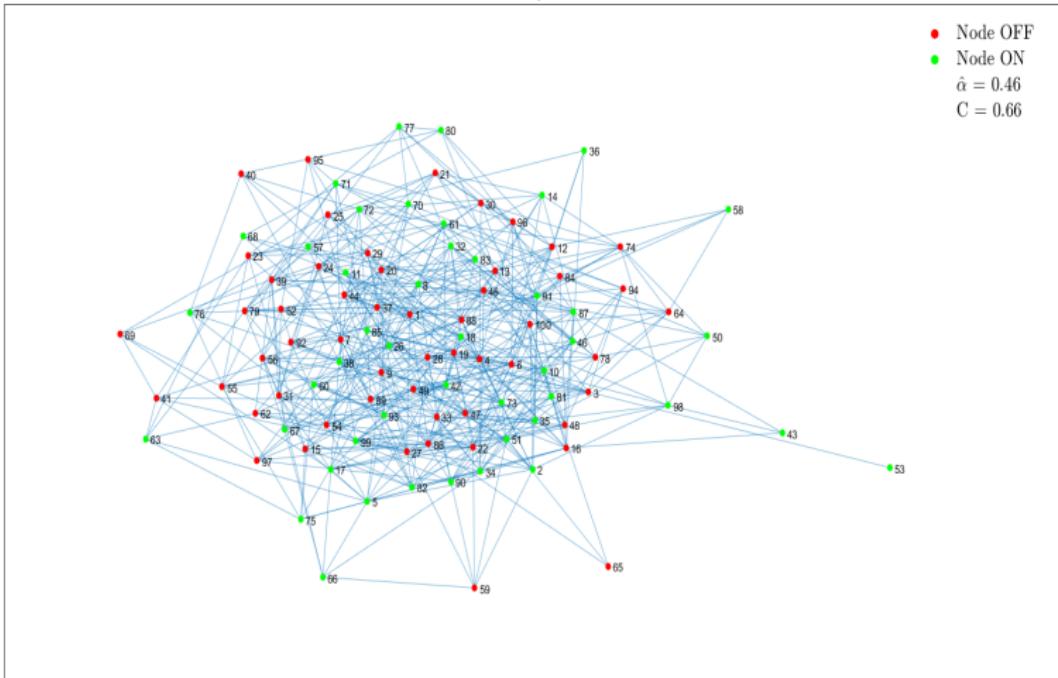
Il test del modello è compiuto su una rete Erdos-Renyi(ER) composta da N nodi con differenti probabilità di collegamento p così che il grado medio $\langle k \rangle = p(N - 1)$.

La topologia di rete rappresenta la rete “sociale” e non corrisponde necessariamente alla rete fisica di distribuzione dell’energia; sebbene le reti ER non riproducano le principali caratteristiche delle reti sociali è comunque interessante cercare quale sia il minimo numero di vicini necessario per raggiungere la coordinazione richiesta.

Nella configurazione iniziale gli stati sono distribuiti uniformemente così che approssimativamente metà utenti sono ON e metà utenti sono OFF e si esegue la dinamica precedentemente descritta fino a quando non si raggiunge lo stato stazionario.

Esempio simulazione modello su rete Erdos-Renyi

Topologia rete Erdos-Renyi ($N = 100$, $p = 0.1$)
 $\alpha = 0.8$, $t = 0$



Andamento livello di coordinazione del modello

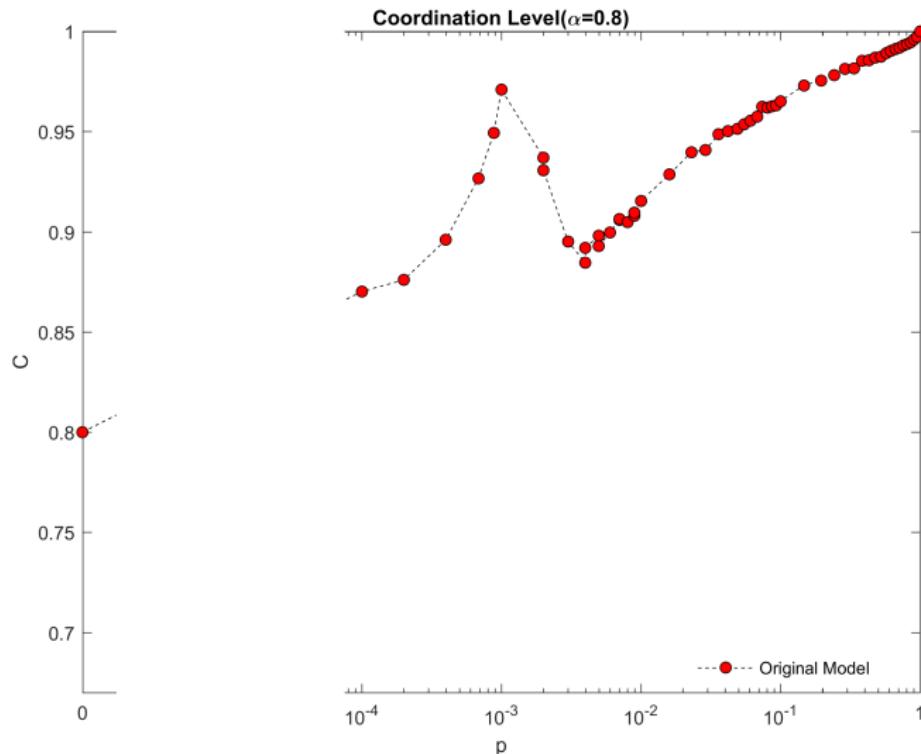


Figura 1: Livello di coordinazione C vs probabilità di collegamento p ($N = 1000$)

Andamento livello di alterazione del modello

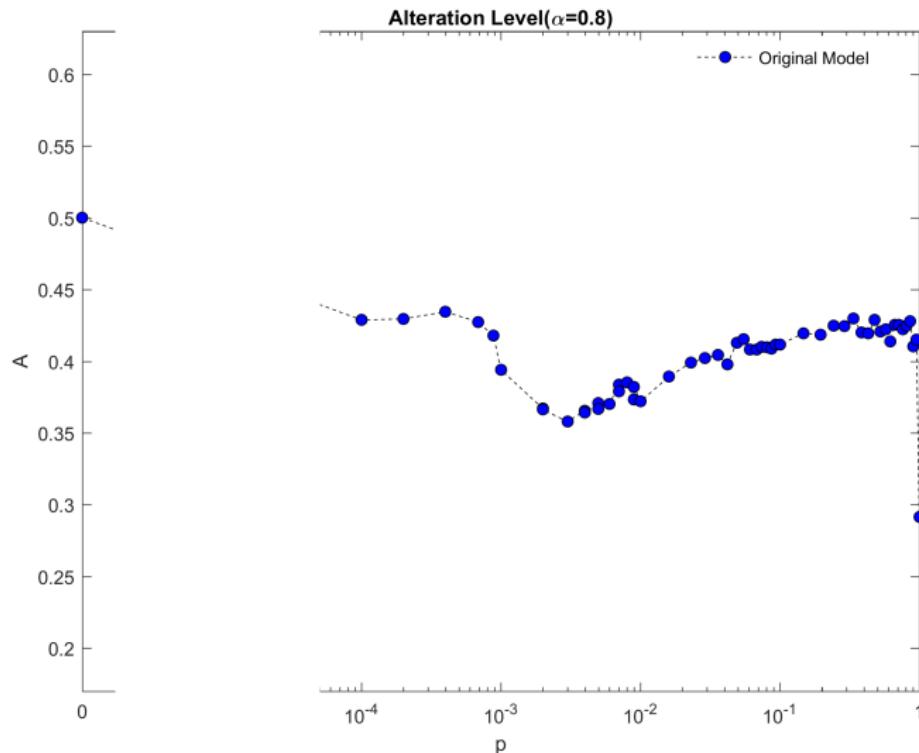


Figura 2: Livello di alterazione A vs probabilità di collegamento p ($N = 1000$)

Modello di campo medio

Sia $\mathbf{U(t)}$ il numero di nodi **ON** al tempo t . L'equazione evolutiva è

$$U(t+1) = U(t) + p_{01}(p, U(t)) \frac{N - U(t)}{N} - p_{10}(p, U(t)) \frac{U(t)}{N} \quad (1)$$

dove $p_{01}(p, \mathbf{U(t)})$ è la probabilità che un nodo passi **da OFF ad ON** e $p_{10}(p, \mathbf{U(t)})$ è la probabilità che un nodo passi **da ON ad OFF**. Secondo il modello presentato le due probabilità di switch seguono una distribuzione binomiale:

$$p_{01}(p, U(t)) = \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1}{k} p^k (1-p)^{N-1-k} f(U(t), k)$$

$$p_{10}(p, U(t)) = \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1}{k} p^k (1-p)^{N-1-k} \bar{f}(U(t), k)$$

dove la distribuzione di utenti ON, $f(U(t), k)$, e la distribuzione di utenti OFF, $\bar{f}(U(t), k)$, seguono la legge ipergeometrica.

Modello di campo medio

Allo stato stazionario (1) diventa

$$p_{01}(p, U^\infty)(N - U^\infty) - p_{10}(p, U^\infty)U^\infty = 0 \quad (2)$$

dove U^∞ è il numero di utenti ON allo stato stazionario con cui calcolare il livello di coordinazione stazionario $C^\infty = 1 - |\alpha - \frac{U^\infty}{N}|$.

Il valore \bar{p} che corrisponde al punto di massimo del livello di coordinazione si può calcolare risolvendo (2) rispetto a p fissato $U^\infty = \alpha N$, mentre il valore \hat{p} che corrisponde al punto di minimo del livello di coordinazione si può calcolare risolvendo il sistema

$$\begin{cases} U^\infty = g(p, U^\infty) \\ \frac{\partial g(p, U^\infty)}{\partial p} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

dove

$$g(p, U^\infty) = N \frac{p_{01}(p, U^\infty)}{p_{01}(p, U^\infty) + p_{10}(p, U^\infty)}$$

Simulazioni annealed network

L'accuratezza delle soluzioni del modello analitico di campo medio è controllata mediante simulazioni su “annealed network”: assegnato un grado k_i ad ogni utente i secondo la distribuzione di grado generata da una rete ER, l'utente i selezionato ad ogni passo della dinamica si rapporta con un sottoinsieme **casuale** di k_i vicini.

Andamento livello di coordinazione annealed network

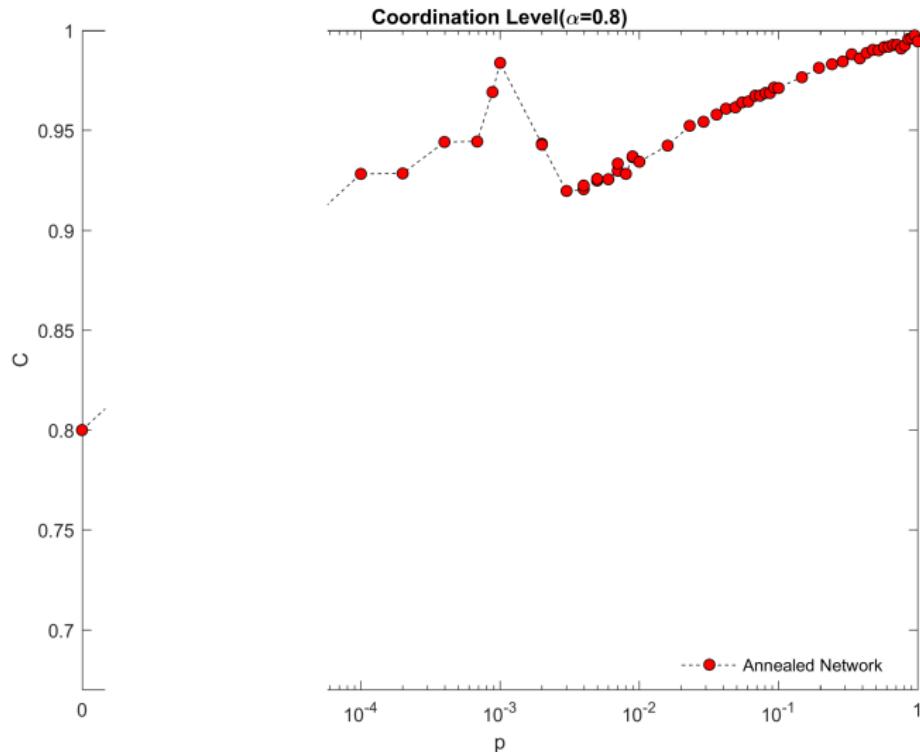


Figura 3: Livello di coordinazione C vs probabilità di collegamento p ($N = 1000$)

Andamento livello di alterazione annealed network

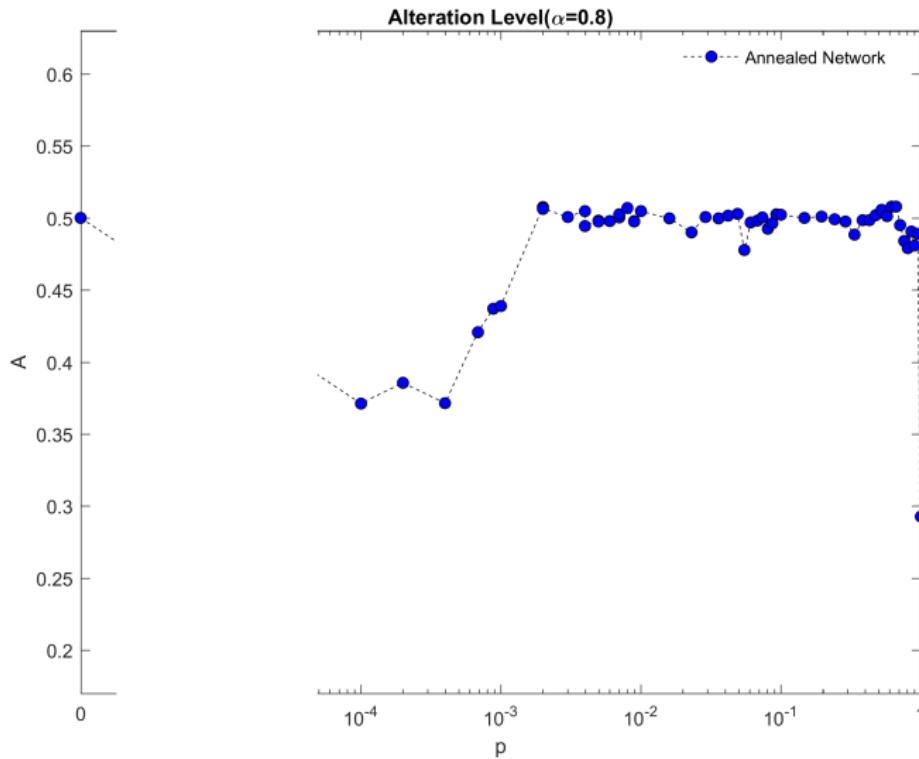


Figura 4: Livello di alterazione A vs probabilità di collegamento p ($N = 1000$)

Confronto livelli coordinazione ed alterazione

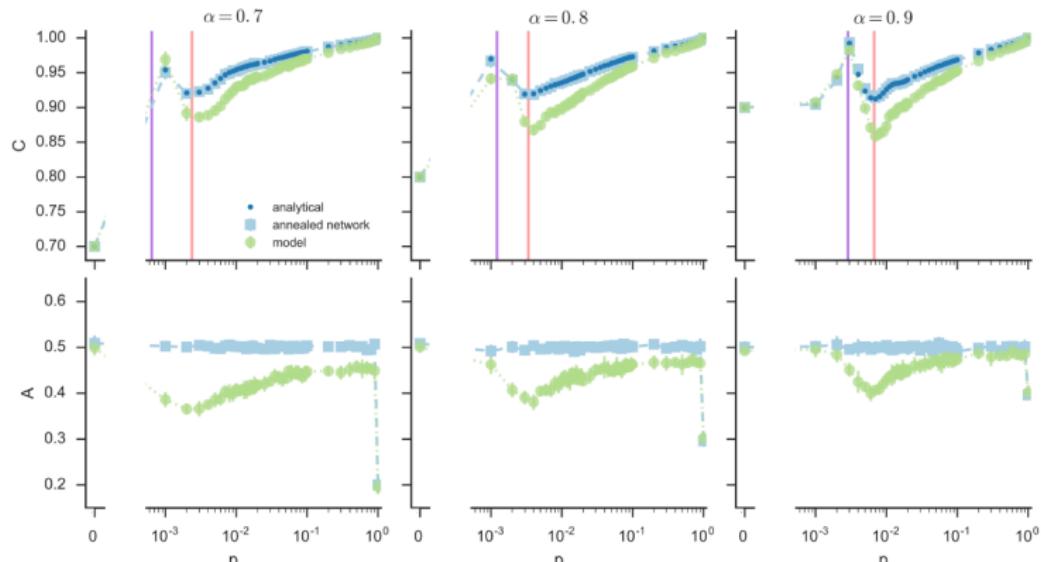


Fig 2. Final coordination and alteration levels in function of the network edge probability p , for different values of the target configuration α . The three top panels show, for three different values of α , the coordination level at the stationary state in function of the graph edge probability p . The corresponding bottom panels show the alteration level. Green circles represent the model results, blue points represent the mean-field analytical values, and light blue squares represent the results of the randomized neighbors model, in which at each time step a randomly selected user i interacts with a different set of k_i random users in the populations. The purple line represents the point in which the coordination level takes its maximum in the $0 < p < 1$ region according to the analytical calculations, and the red line represents the point in which it takes its minimum. For each p , we run the models on 10 different Erdős-Rényi graphs $G(N, p)$, with $N = 1000$, initially assigning to each user the *on* or *off* state with equal probability 0.5. The points shown represent the averaged results, and error bars represent the standard deviation from the mean.

Figura 5: Livelli coordinazione ed alterazione per diversi α

Evoluzione livelli di coordinazione ed alterazione

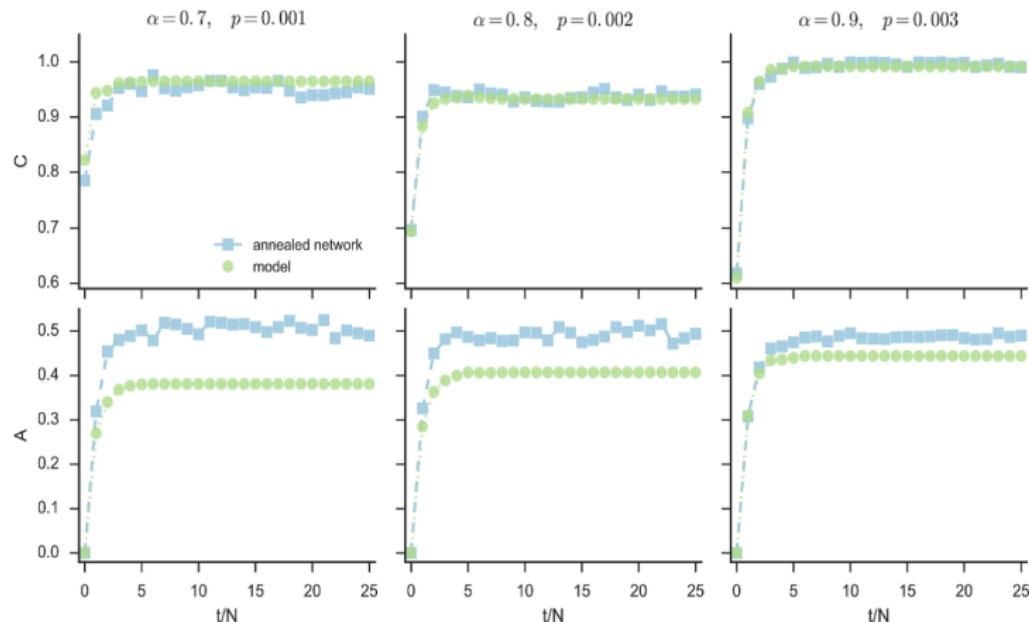


Fig 3. Evolution of coordination and alteration level. The three top panels show, each for a fixed target α and graph edge probability p , the evolution, every N time steps, of the coordination level during the course of one realization of the model dynamics. The three bottom panels show the corresponding evolution of the alteration level. The initial configuration is the one described in Fig 2, and again green circles represent the model results, and light blue squares represent the results of the randomized neighbors model. For each α , we plot the results for the dynamics on the ER network with the smallest p that maximizes coordination and minimizes alteration (see the corresponding points in Fig 2).

Figura 6: Evoluzione livelli coordinazione ed alterazione per diversi α

Estensione del modello

Supponiamo che la microgrid produca una quantità di energia E pari al carico L da utilizzare per i suoi N utenti: il punto chiave per il funzionamento della rete in maniera isolata è il match in ogni istante tra la domanda e l'offerta.

Il modello presentato si adatta al caso in cui una frazione α di consumatori utilizza la propria energia nella prima parte della giornata e la restante $1 - \alpha$ nella seconda parte.

Il modello si può estendere dividendo la giornata in $H = 24$ ore ed ogni utente i è descritto da un vettore θ_i di H variabili binarie in modo che ogni consumatore abbia diversi slot da usare.

La configurazione di riferimento è un vettore ϵ di lunghezza H e si pone

$$\sum_{h=1}^H \epsilon_h = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H \theta_{i,h}$$

Estensione del modello

Un utente i è selezionato casualmente e si valuta

$$\tau(i) = \frac{N}{k_i + 1} \left[\sum_{h=1}^H \left(\theta_{i,h} + \sum_{n \in N(i)} \theta_{n,h} \right) \right]$$

Il consumatore destina il carico dall'ora h' all'ora h'' se la configurazione locale eccede l'energia disponibile e cambiare l'ora di destinazione avvicina alla configurazione di riferimento; nel caso più di coppie (h', h'') soddisfino queste caratteristiche la scelta avviene con probabilità proporzionale al miglioramento.

Infine ridefiniamo i livelli di coordinazione ed alterazione

$$C^{EX} = 1 - \frac{1}{2 \sum_{h=1}^H \epsilon_h} \sum_{h=1}^H \left| \epsilon_h - \sum_{i=1}^N \theta_{i,h} \right|$$

$$A^{EX} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H |\theta_{i,h}(t_\infty) - \theta_{i,h}(t_0)|$$

Andamento livelli coordinazione ed alterazione

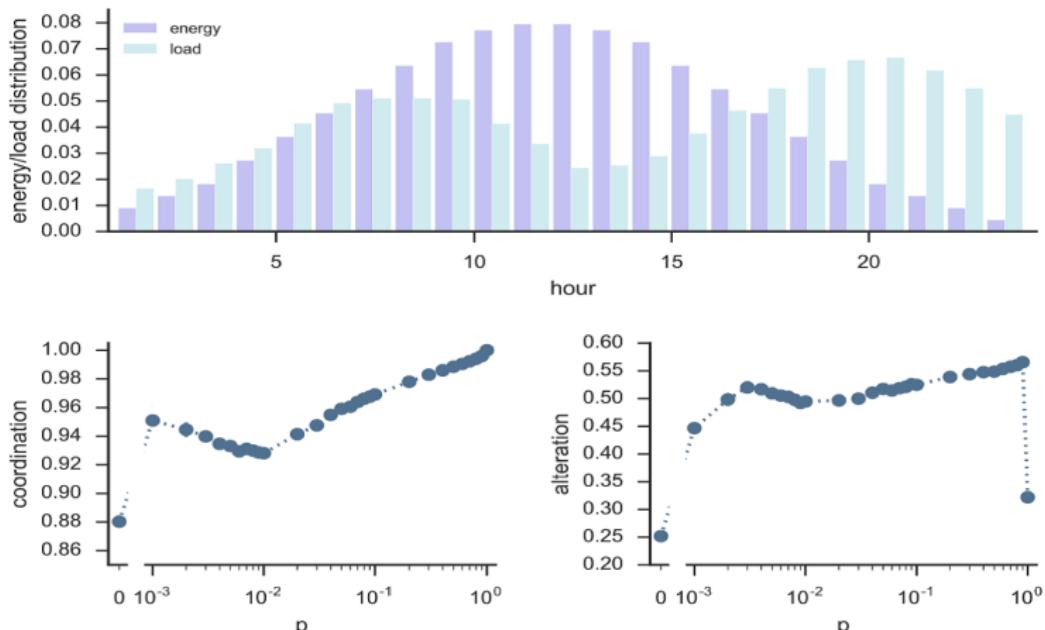


Fig 4. Final coordination and alteration levels in function of the network edge probability p , for the extended model simulating demand side management in microgrids. The left bottom panel shows the coordination level at the stationary state in function of the network edge probability p , as defined in Eq 14. The right bottom panel shows the corresponding alteration level (Eq 15). For each p , we run the models on 10 different Erdős-Rényi graphs $G(N, p)$, with $N = 1000$, initially assigning to each user i a state vector θ_i with 0 and 1 values distributed over the $H = 24$ entries with probabilities drawn from the distribution shown in the top panel (light blue bars). The top panel also shows the target configuration (iliac bars). The points shown in the bottom panels represent the averaged results, and error bars represent the standard deviation from the mean.

Figura 7: Livelli coordinazione ed alterazione modello esteso

Conclusioni

Abbiamo presentato un modello capace di garantire il raggiungimento di una configurazione target mediante la coordinazione di un numero ridotto di utenti nella rete.

Tuttavia sono presenti alcuni limiti evidenti:

- L'uso di variabili binarie al posto di valori numerici che rappresentino i kWh
- L'assunzione che la microgrid produca da sola energia sufficiente per il consumo giornaliero di tutti gli utenti
- Il ruolo dei prosumers non viene esplicitato includendo l'energia da loro prodotta nell'energia totale disponibile E
- La comunicazione tra le microgrids e la rete distribuita nel caso di reti reali

che dovranno essere risolti in eventuali lavori futuri.

- [1] E. Omodei, A. Arenas: A network approach to decentralized coordination of energy production-consumption grids, PLoS ONE 2018, 13, e0191495.
- [2] Current Grid vs. Smart Grid,
<https://smartgridtech.wordpress.com/smart-grid/>
- [3] L. Cuadra, M. Pino, J. Nieto-Borge, S. Salcedo-Sanz: Optimizing the Structure of Distribution Smart Grids with Renewable Generation against Abnormal Conditions: A Complex Networks Approach with Evolutionary Algorithms. Energies. 2017; 10(8):1097.
<https://doi.org/10.3390/en10081097>

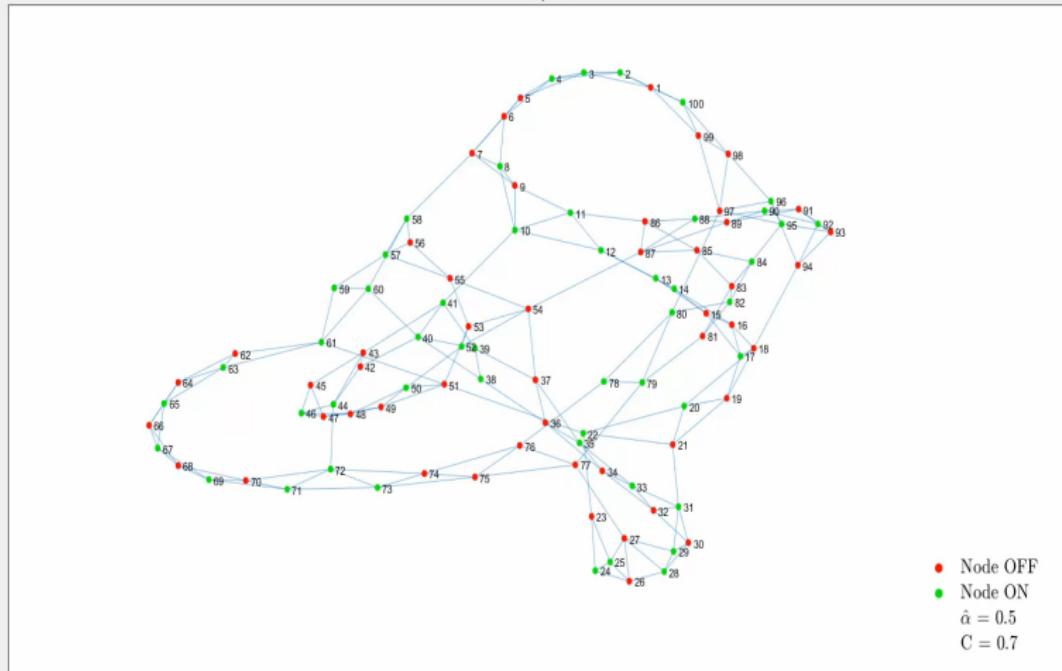
Appendice: Modello su rete Watts-Strogatz

In generale la comunità degli ingegneri elettrici non crede che un approccio completamento basato sulla topologia come quello tipo delle analisi di reti complesse possa riflettere a pieno le operazioni dietro una rete elettrica descritte dalle leggi di Kirchoff; tuttavia i lavori condotti in questo senso, come riportato in [3], mostrano che l'analisi topologica è utile per individuare elementi critici e per valutare la robustezza della rete.

Nel caso delle microgrids un modello che fornisce risultati interessanti è quello small-world: da un lato stimola la produzione e lo scambio di energia a livello locale con vantaggi economici, dall'altro sembra essere quello capace di garantire la migliore robustezza tenendo conto delle infrastrutture già presenti nel mondo reale.

Appendice: Simulazione modello su rete Watts-Strogatz

Topologia rete Watts-Strogatz ($N = 100$, $m = 2$, $\beta = 0.1$)
 $\alpha = 0.8$, $t = 0$



Andamento livello di coordinazione su rete Watts-Strogatz

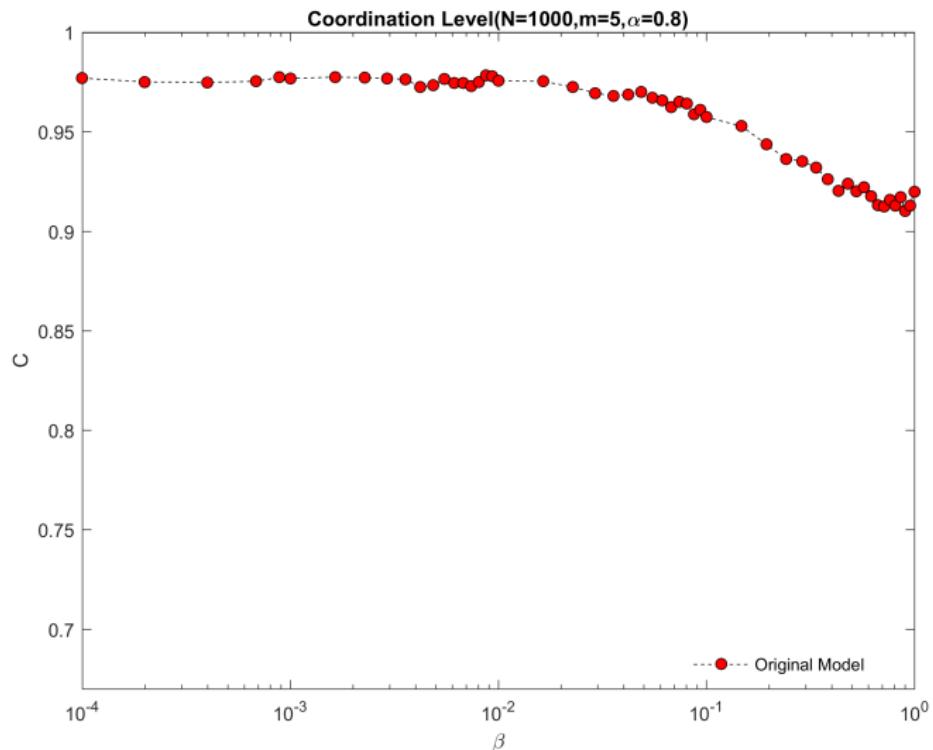


Figura: Livello di coordinazione C vs probabilità di rewiring β

Andamento livello di alterazione su rete Watts-Strogatz

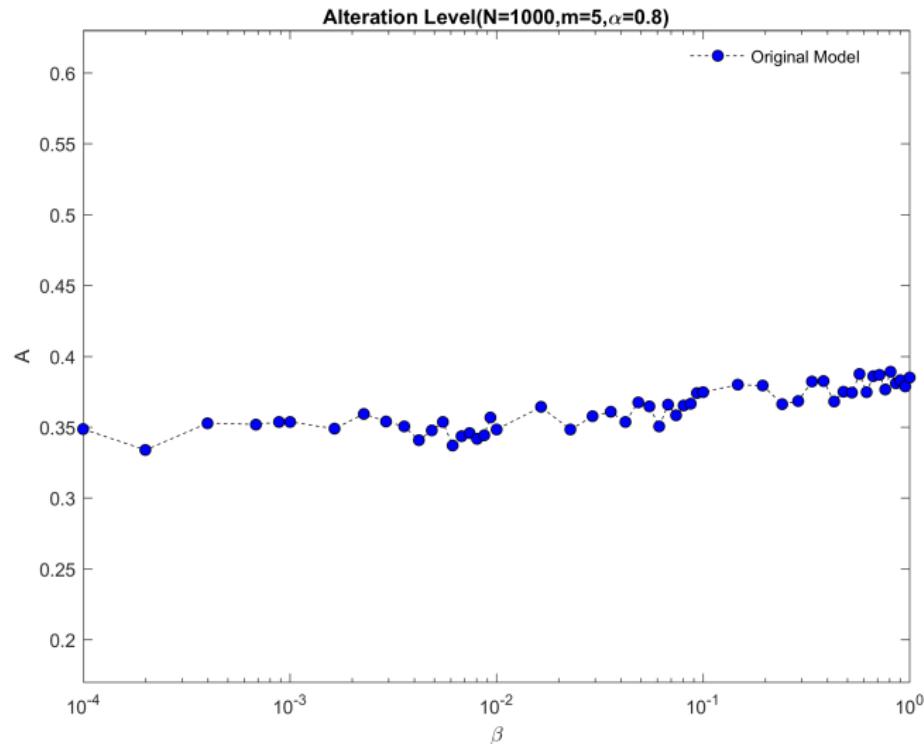


Figura: Livello di alterazione A vs probabilità di rewiring β