

Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



**Studio ed analisi dello scheduling di linee di produzione
Mixed-Model tramite l'algoritmo Max Min Ant System**

Relatore: Prof. A. SIANESI

Tesi di laurea di:

Alberto DANESINO matr. 710166

Anno Accademico 2009/2010

INDICE

INDICE.....	2
INTRODUZIONE.....	4
Capitolo 1.....	6
1.1 L'influenza dell'industria sulla vita dell'individuo e l'influenza della domanda del consumatore sui modi di produrre.	6
1.1.1 La nascita dell'industria nel XX secolo: il Fordismo.....	6
1.1.2 La nascita della tecnica Just In Time.....	8
1.1.3 La tecnica di produzione Mixed model	17
Capitolo 2.....	20
2.1 Analisi della Letteratura sulla produzione Mixed-Model.....	20
2.1.1 Bilanciamento considerando buffer con capacità finita	23
2.1.2 Programmazione influenzata dai tempi di setup	25
2.1.3 Minimizzazione della variazione del tasso di consumo delle parti	26
2.1.4 Bilanciamento ottenuto ponendo attenzione al carico di lavoro.	29
2.1.5 Bilanciamento con l'utilizzo delle formiche	31
2.2 Classificazione dei problemi	35
2.2.1 Classificazione di Graham.....	40
Capitolo 3.....	51
3.1 La tecnica multi-agente e l'analogia con i paradigmi naturali della Insect Society	51
3.2 La decentralizzazione dell'organo decisionale: i sistemi multi-agente.....	51

3.3 Caratteristiche degli agenti autonomi.....	54
3.4 Il paradigma dell'Ant Colony	55
3.5 Gli algoritmi e le loro versioni	61
3.5.1 L'Ant Colony	61
3.5.2 L'Ant Colony System.....	64
3.5.3 Max Min Ant System	66
3.5.4 Ant System rank	69
CAPITOLO 4.....	71
4.1 La Sperimentazione	71
4.1.1 Il Dominio delle prove.....	72
4.1.2 La composizione del prodotto finito	72
4.1.3 Le diverse tipologie di domanda	74
4.2 La funzione obiettivo.....	78
CAPITOLO 5.....	84
5.1 L'analisi dei risultati.....	84
5.1.1 L'analisi Statistica	84
5.2 Analisi della variabile Beta.....	88
5.3 Analisi della variabile Rho.....	91
5.4 Confronto tra MMAS e ACO	115
5.5 Conclusioni	133
Bibliografia.....	136
ALLEGATI.....	138

INTRODUZIONE

L'industria moderna deve far fronte a problemi di carattere tecnologico, logistico, ma anche prestare attenzione a soddisfare le richieste del cliente e dare allo stesso la possibilità di scegliere tra un mix di prodotti. Queste caratteristiche richiedono al sistema produttivo un'elevata flessibilità, alti volumi produttivi ripartiti su un'ampia gamma di prodotti finiti. Con l'avvento della logica *Just in Time*, che punta al miglioramento del processo produttivo, cercando di minimizzare il più possibile le scorte di materie prime e di semi-lavorati, l'utilizzo di una modalità *Mixed-model* risulta essere una scelta vincente. Questo lavoro ha lo scopo di presentare una tecnica che si ispira al mondo biologico con particolare riferimento alle colonie di formiche, permettendo di risolvere problemi relativi alla produzione industriale riproducendo alcuni comportamenti tipici di questi insetti. L'algoritmo risulta essere adatto per gestire il sequenziamento di prodotti finiti poichè molto flessibile e velocemente riconfigurabile.

Il lavoro è organizzato nei seguenti 5 capitoli. Il primo capitolo descrive la nascita della produzione *Just In Time*, sottolineandone gli aspetti principali. Viene presentato il metodo di produzione attraverso il Kanban di cui vengono descritte le caratteristiche e le regole che lo contraddistinguono.

Il secondo capitolo è dedicato alla presentazione dei casi più interessanti trovati in letteratura, in particolare viene illustrato il metodo di produzione *Mixed-model* con le proprie caratteristiche, e il metodo di catalogazione dei problemi utilizzando la dicitura che Graham introdusse nel 1979.

Il terzo capitolo presenta la teoria degli agenti autonomi e descrive e analizza l'Ant System nelle sue tipologie più utilizzate ed apprezzate. Particolare interesse verrà rivolto al Max Min Ant System.

Il quarto capitolo descrive la costruzione della campagna sperimentale e di tutte le variabili considerate. Vengono descritte i diversi gradi di comunanza, polarità e complessità utilizzati.

Il quinto capitolo racchiude l'analisi sperimentale, tutti i grafici relativi ai risultati ottenuti. Sono evidenziati i parametri scelti ed a utilizzare per sperimentazioni future, oltre che il confronto con l'algoritmo ACO, il vero scopo di questo lavoro.

Capitolo 1

1.1 L'influenza dell'industria sulla vita dell'individuo e l'influenza della domanda del consumatore sui modi di produrre.

1.1.1 La nascita dell'industria nel XX secolo: il Fordismo

La prima grande modifica nella produzione industriale avvenne all'inizio del XX secolo quando l'ingegnere statunitense Friedrich Winslow Taylor elaborò una teoria scientifica del lavoro atta alla riduzione di ogni forma di spreco nell'atto produttivo. Taylor aveva intuito, in seguito alla sua esperienza come responsabile della produzione in aziende che trattavano principalmente materiale meccanico, che era molto importante attuare un sistema di produzione mirante al massimo, ma con il minimo impiego di fatica e di tempo. Taylor intendeva infatti annullare tutti gli sprechi di tempo – i cosiddetti tempi morti – e di energia, limitando i movimenti degli operai al minimo indispensabile.

Taylor stesso scrisse: *“L'attività di studio e di pianificazione della produzione spetta esclusivamente ad un apposito ufficio; il compito degli operai deve essere limitato all'esecuzione di mansioni predeterminate, scomposte con criteri scientifici in operazioni semplici e banali eseguite con utensili standardizzati ed in tempi cronometricamente stabiliti”*.

Questa teoria vide come suo primo utilizzatore Henry Ford, fondatore della Ford Motor Company, che ne esaltò le caratteristiche realizzando la catena di montaggio, un sistema produttivo diviso in tante piccole unità semplici e ripetibili che non consentivano alcuno spreco di energia né di tempo. Mediante l'applicazione di questo metodo vennero prodotti milioni di

esemplari di Ford T, un'auto progettata in funzione della produzione. Gli operai della catena di montaggio erano chiamati a svolgere solo determinati movimenti sempre uguali per tutta la durata della giornata lavorativa. Chi aveva la capacità di essere veloce nella realizzazione del proprio lavoro era anche incentivato economicamente con un premio di produzione. Uno degli effetti benefici sulla produzione fu ad esempio la riduzione del tempo di ciclo per la produzione della Ford T, si passò dalle originarie 12 ore a 1,5.

Henry Ford era riuscito nella sua azienda a mettere in atto anche l'intercambiabilità della manodopera, portando agli estremi l'idea della divisione del lavoro. Un operaio infatti, addetto alla linea di montaggio di una fabbrica fordista aveva, come egli stesso sottolinea "al massimo un unico compito: infilare due dadi su due bulloni o magari fissare una ruota su ogni vettura" [Womack 1990]. L'operaio non doveva ordinare i pezzi, procurarsi attrezzi, ripararli, controllare la qualità del suo lavoro o anche solo capire ciò che il suo vicino stava facendo, ma solo eseguire il suo compito. Con la parcellizzazione dei compiti alla manodopera bastavano pochi minuti di addestramento, poichè l'operaio veniva chiamato ad utilizzare macchinari molto semplici e di facile manutenzione. I ritmi di produzione raggiunti eccessivamente frenetici e la ripetitività delle operazioni, portano negli anni '60 l'insorgenza di una generale insofferenza da parte della classe operaia, manifestatasi con rivendicazioni sindacali, assenteismo e ricerca di lavoro indipendente. Fondamentali furono gli shock petroliferi dell'inizio degli anni '70 quando tra il 1970-1974 il prezzo del greggio quintuplicò. Oltre ovviamente a crescere il costo del petrolio aumentarono i prezzi delle materie prime e principalmente di materiali quali alluminio, materie plastiche, rame ed acciaio. In tale contesto emerse il maggiore limite del modello fordista: in una fabbrica a produzione di massa, quanto più cresce l'aleatorietà e la variabilità del mercato, tanto più si trasforma in una costellazione di risorse sottoutilizzate. Si asservano un aumento dei tempi di inutilizzo degli impianti e di ozio dei lavoratori, si formano scorte di materie prime e di prodotti finiti e si ha un aumento del Work In Progress. La stabilità su cui si fondava il modello, che aveva consentito allo stesso di funzionare senza intoppi, venne a mancare e la crisi della domanda a livello internazionale insieme al costo delle materie prime in continuo aumento, resero necessario l'abbandono degli sprechi della fabbrica fordista.

Iniziò quindi l'era della **produzione snella**, il nuovo paradigma organizzativo nipponico che ha portato le industrie occidentali a rivedere radicalmente i propri sistemi produttivi e gestionali.

1.1.2 La nascita della tecnica Just In Time

E' interessante osservare come il Giappone sia una nazione piccola, densamente popolata e povera di risorse naturali, il connubio tra grandi risorse umane e povertà di risorse naturali può aiutare a capire l'ingegnosità giapponese. Dall'iniziale produzione con scarse risorse evitando gli sprechi nacque il sistema giapponese di gestione della fabbrica, l'approccio *Just in Time*, con una gestione giornaliera dei materiali ed un controllo globale della qualità. Accanto all'approccio Just in Time (JIT) vediamo quindi anche la nascita del Total Quality Control (Tqc), un insieme di procedure e tecniche per il controllo della qualità. All'operaio giapponese l'obiettivo Jit/Tqc sembrò un buon sistema per controllare dispendiose fonti di spreco ed un metodo di lavoro accettabile. Questa tecnica evita scorte inutili che costituiscono uno spreco di risorse già scarse, l'immagazzinamento di risorse inutili e quindi un utilizzo inefficiente di spazio e soprattutto limita la realizzazione di parti o sottoassiemi difettosi che costituiscono un consumo inutile di energia e materiale.

Dopo anni di sperimentazione si può osservare come il controllo globale della qualità enfatizzi:

1. Miglioramento continuo della qualità, progetto dopo progetto, scompare l'idea occidentale di avere una qualità accettabile.
2. Responsabilità crescente dell'operaio, il quale si sente artefice di un prodotto e non più solo di una operazione, e diventa il primo consigliere per ricercare la Total Quality.
3. Controllo di qualità di ogni processo, non vengono ispezionati solo lotti selezionati (prevenzione dei difetti e non scoperta casuale).
4. Misure di qualità evidenti, visive, semplici e comprensibili anche ad un osservatore casuale.

5. Dispositivi automatici di misura della qualità (sviluppati in reparto).

Un'indicazione evidente della marcata differenza tra la produzione occidentale e quella giapponese è data dal fatto che, già alla fine degli anni '80, i rapporti di qualità dei giapponesi parlavano di parti difettose per milione, mentre gli standard occidentali erano generalmente per cento[Schonberger].

L'idea del JIT è molto semplice e costituisce il nucleo fondamentale della gestione industriale e dell'aumento della produttività in Giappone. Esso si sviluppa nel seguente modo: produrre e consegnare merci finite al momento opportuno per la vendita, sottogruppi al momento opportuno per essere montati nei prodotti finiti, parti al momento opportuno per essere inseriti nei sottogruppi, ed acquistare i materiali per trasformarli in parti nel momento opportuno. Questo modo di produrre "al momento giusto" si contrappose al metodo *just in case* ossia "perchè serviranno" tipico delle industrie occidentali.

La ragione del successo del sistema JIT va ricercata nella sua maggiore efficienza e nel suo punto di forza, la riduzione dei costi siano essi di tipo produttivo, amministrativo o finanziario. L'eliminazione di tutto ciò che veniva ritenuto superfluo come le scorte di materiali, manodopera e risorse inutilizzate risultò fondamentale. Per ottenere questi obiettivi la tecnica JIT si impose di produrre sempre e solo i prodotti necessari, al momento giusto e nella quantità necessaria per soddisfare la domanda. Un'ulteriore caratteristica del sistema giapponese di produzione nel campo industriale è la semplicità delle specifiche di prodotto che i fornitori devono promettere e mantenere. Interessante è anche la poca attenzione che i giapponesi danno alle specifiche dei disegni, poichè essi tendono molto più a fidarsi delle specifiche ottenute durante la produzione che sono orientate al risultato. L'idea che essi sostengono è quella di permettere l'innovazione anche al fornitore e di consentire al compratore una certa discrezione nella valutazione delle proposte del primo. Avendo deciso di comprare e non di produrre quel determinato pezzo nella propria azienda, è bene fidarsi del fornitore a cui ci siamo rivolti.

Il JIT è stato ampiamente sviluppato da Toyota la cui struttura degli obiettivi e dei principi base ed i metodi per il loro raggiungimento, sono sintetizzati nella figura sottostante (fig.1).

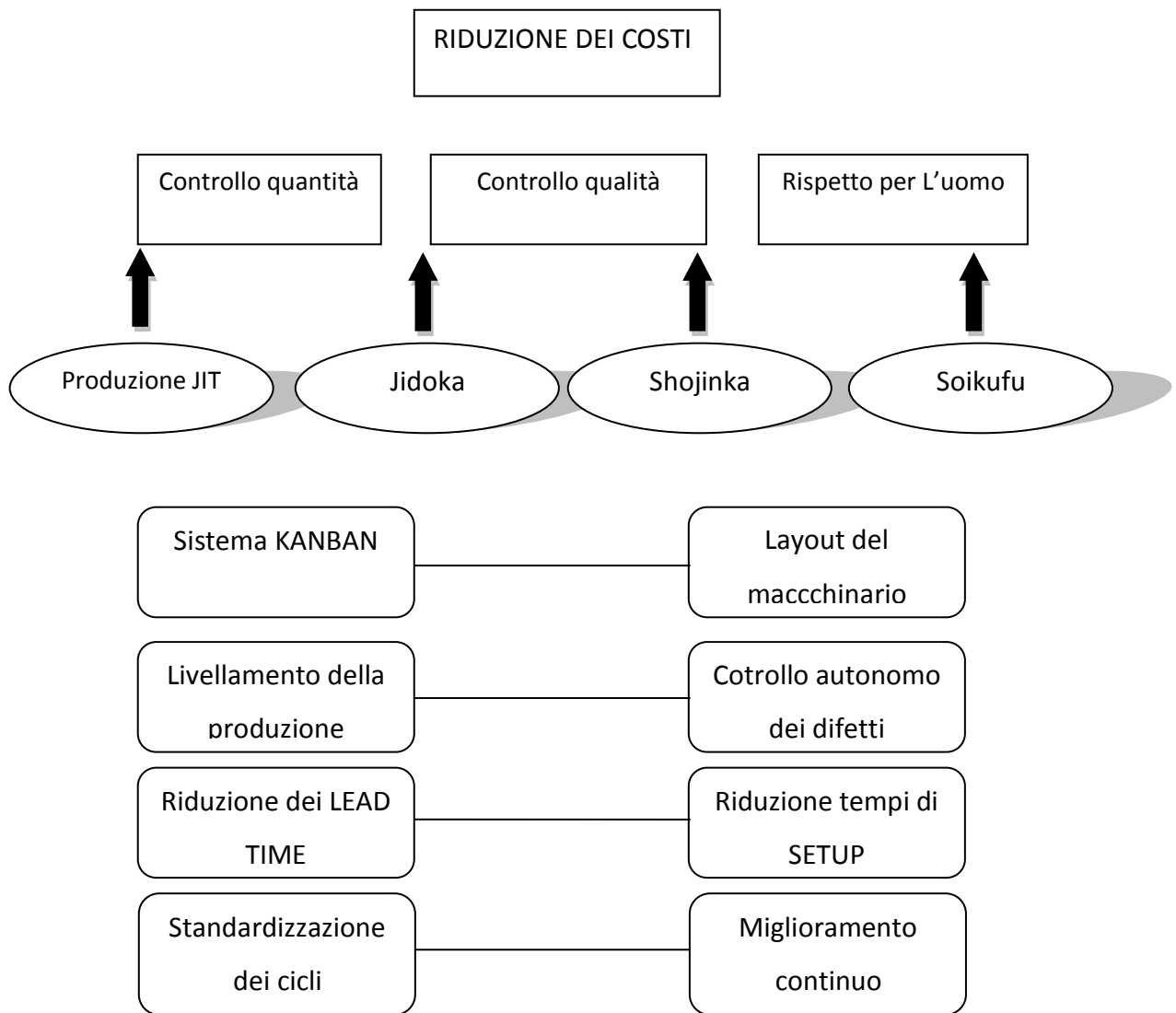


fig. 1

Lo schema mette chiaramente in evidenza come l'obiettivo primario della tecnica Just In Time sia la riduzione dei costi. Gli sprechi sono presenti in ogni momento della produzione e rappresentano tutto ciò che non è necessario al sistema produttivo per soddisfare le richieste del mercato. L'obiettivo primario può essere raggiunto mediante il conseguimento di tre condizioni necessarie, che possono essere considerati come degli obiettivi secondari:

- Il controllo della quantità che permette una pronta risposta della produzione alle fluttuazioni della domanda del mercato per quanto riguarda i volumi e i mix delle variabili di prodotto.
- Il controllo della qualità attraverso la quale ogni fase della produzione cerca di ridurre o eliminare totalmente la produzione difettosa, evitando che venga trasferita alla fase a valle.
- Il rispetto per l'uomo che rappresenta un punto cardine per il buon funzionamento del sistema produttivo e per la creazione di processi di miglioramento continuo.

I principi che vengono seguiti per ottenere i suddetti obiettivi sono quattro e sono:

1. Produzione Just In Time, ovvero produrre i pezzi giusti al momento giusto e nella quantità strettamente necessaria.
2. Il controllo autonomo dei difetti ("jidoka" in giapponese) che impedisce che la produzione difettosa venga trasferita da una fase a quella immediatamente a valle.
3. L'utilizzo di manodopera flessibile ("shojinka") che consente una rapida riorganizzazione degli operatori sulle linee, in funzione delle variazioni di domanda.
4. La creatività e l'inventiva ("soikufu") che deve sempre caratterizzare l'atteggiamento di tutti i dipendenti per generare un processo di miglioramento continuo.

Tra le persone che hanno cercato di spiegare il JIT, prevale l'idea che esso rappresenti un sistema per il controllo delle scorte. Infatti non è insolito trovare il termine JIT associato al termine Kanban, che indica uno specifico sistema giapponese di reintegro delle scorte sviluppato da Toyota. Kanban tradotto letteralmente significa "documento visibile", ma più in generale viene utilizzato con il termine "cartellino". Il sistema kanban della Toyota sfrutta un cartellino per segnalare la necessità di rifornire una stazione di un certa tipologia di pezzi ed un altro cartellino per segnalare la necessità di produrre. Se si considera il sistema kanban come un qualsiasi sistema che utilizzi ordini di lavoro o bolle di consegna, allora la maggior parte delle aziende del mondo sfrutta questo metodo. Una procedura molto utilizzata nelle fabbriche

è quella di accompagnare i materiali in lavorazione con un foglio “viaggiante”. Per ordinare i particolari si usa spesso una gran quantità di fogli e di bolle di lavoro. Queste schede e fogli però non costituiscono un sistema kanban poichè questo ha la caratteristica di essere un sistema *pull* a differenza degli altri che sono *push*. Un sistema push è un sistema che utilizza un programma di produzione: viene preparato un piano di fabbisogno di prodotto finito, un piano principale di produzione e dei computer frazionano i piani in programmi di produzione. Un sistema push spinge i centri di lavoro a produrre le parti richieste e quindi le spinge a valle. Fino all’avvento del sistema kanban la metodologia push sembrava la migliore, ma il sistema pull della Toyota ha invertito le tendenze. Il kanban infatti, rifornisce i componenti quando è necessario, ma senza fare previsioni, ed è quindi esente da scorte dovute a cattive previsioni.

Si possono evidenziare due tipologie principali di Kanban:

-il kanban-prelievo contiene informazioni riguardanti il tipo e la quantità di pezzi che la fase a valle (quella in possesso del kanban-prelievo) deve prelevare presso la fase a monte che produce tali pezzi

-il kanban-ordine di produzione definisce il tipo e la quantità di pezzi che la fase che lo utilizza deve produrre

L’utilizzo di queste tipologie di kanban porta alla creazione di una catena immaginaria che collega le diverse fasi del sistema produttivo nello stabilimento, ma anche lo stabilimento e i fornitori. Attraverso i collegamenti che si vengono a creare, la linea di assemblaggio finale sembra “tirare” la produzione delle fasi a monte che realizzano i componenti o sottoassiemi necessari per il montaggio dei prodotti finiti.(fig.2)

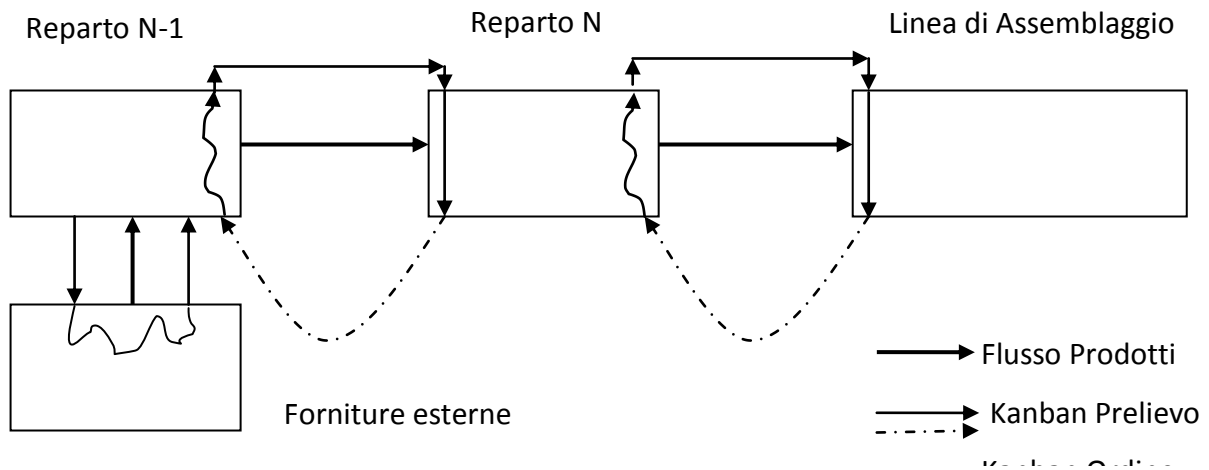


fig. 2

Il kanban è quindi uno strumento per ottenere una produzione JIT, ma per poter ottenere le prestazioni volute devono essere rispettate delle regole.

Regola n°1

La fase a valle deve prelevare dalla fase a monte solo i pezzi necessari e al momento giusto e nella quantità giusta.

Questa regola viene osservata se: nessun prelievo avviene senza kanban, la quantità prelevata corrisponde a quella indicata sul kanban e ogni prodotto fisico ha sempre un kanban che lo accompagna. Esistono tre requisiti fondamentali affinché il sistema prelievi del kanban funzioni correttamente: il livellamento della produzione, la normalizzazione dei cicli di lavorazione e un particolare layout del macchinario. Il livellamento della produzione risulta essere una caratteristica fondamentale affinché il kanban non perda il suo scopo e si ottengano risultati positivi dal suo utilizzo. Se venisse utilizzato il kanban in una produzione non livellata, per poter soddisfare le richieste delle fasi a valle, sarebbe necessario inserire tra le stazioni dei magazzini, sovradimensionare gli impianti, e il numero degli operatori, dando vita a quegli sprechi che si stanno invece tentando di eliminare. La politica di gestione della produzione in JIT ha la

peculiarità di prediligere in modo netto investimenti riguardanti le capacità produttive piuttosto che in scorte. La capacità produttiva di un impianto in JIT, durante la produzione a regime, non viene mai sfruttata al 100 %; viene attuato un sottoutilizzo pianificato. Questa strategia rivela la sua massima efficacia nel momento in cui si ha una variazione della domanda, quando cioè la capacità produttiva residua viene impiegata, consentendo di riallocare la manodopera senza però eseguire una nuova pianificazione della disponibilità delle risorse produttive. Il sovradimensionamento di capacità necessario affinché il sistema produttivo riesca a seguire le variazioni della domanda, aumenta all'aumentare dell'irregolarità di quest'ultima, ed è proprio questa sovracapacità produttiva che deve essere mantenuta al minimo pianificato con il livellamento della produzione. Se non venisse attuato questo sistema si tenderebbe a muoversi nella direzione opposta rispetto a quella voluta, ovvero l'abbattimento dei costi attraverso l'eliminazione degli sprechi. I vantaggi della normalizzazione dei cicli di produzione sono quindi quelli di garantire la sincronizzazione delle fasi del ciclo produttivo, il completamento di ciascun prodotto nel tempo di ciclo elaborato anticipatamente sulla base del piano di produzione mensile. Molto importante risulta anche la disposizione degli impianti, il che permette un utilizzo flessibile della manodopera e quindi un tempestivo adattamento delle proprie risorse in base alla domanda.

Regola n°2

Ciascuna fase di lavoro a monte deve produrre solo le quantità consumate dalle fasi a valle

Se le regole 1 e 2 vengono rispettate, le fasi del processo produttivo possono essere idealmente collegate tramite un convogliatore invisibile costituito dal kanban. Se dovesse verificarsi un problema in qualcuno dei processi, esso potrebbe fermarsi, ma il bilanciamento tra i processi verrebbe mantenuto.

Regola n°3

La produzione difettosa non deve mai essere trasferita alle fasi a valle

Il sistema kanban sarebbe inutile se questa regola non venisse seguita. La presenza di pezzi difettosi all'interno di un sistema produttivo che utilizza il kanban ne pregiudica gravemente il funzionamento. Il flusso produttivo sarebbe infatti viziato da un flusso a monte della produzione difettosa per effettuare rilavorazioni necessarie, da cui deriverebbero sprechi di energia e manodopera. La disponibilità dei pezzi buoni a valle non sarebbe più garantita dal sistema dei prelievi vanificando lo scopo dell'impiego del kanban.

Regola n°4

Il numero di kanban in circolazione deve essere minimizzato

Il numero di kanban definisce la quantità di pezzi di un certo tipo che possono circolare nel sistema produttivo. Considerando gli obiettivi del JIT tra cui la riduzione delle scorte, ne consegue che il numero di "cartellini" circolanti nel sistema deve essere ridotto al minimo. Il responsabile di tale numero generalmente è il caporeparto, la cui capacità di migliorare i cicli produttivi e l'abilità gestionale risulta anche dalla capacità di ridurre il numero di kanban in circolazione.

Il numero di kanban deve essere mantenuto il più possibile costante, ne consegue che se la domanda giornaliera dovesse aumentare, il tempo di ciclo deve essere ridotto attraverso il cambio di postazione dei lavoratori sulla linea. Poiché il numero di kanban risulta essere costante, le stazioni che non sono in grado di aumentare la produzione andranno incontro a fermi o a sovraccarichi di lavoro. In un sistema tipo quello della Toyota, risulta per i lavoratori quasi impossibile nascondere le inefficienze che vengono invece evidenziate dal kanban perché possano essere prontamente risolte. Se il reparto non fosse in grado di effettuare questi miglioramenti può comunque affidarsi all'aumento delle scorte di sicurezza, il che però denota una scarsa capacità gestionale del reparto.

Regola n°5

Il kanban deve essere utilizzato per adeguare la produzione alle piccole variazioni della domanda (fine-tuning of production by kanban).

Alla Toyota si riescono a gestire agevolmente fluttuazioni della domanda fino ad uno scostamento del 10% della produzione pianificata mensilmente, con la quale vengono preparate le risorse, tra cui manodopera e materiali, necessarie per realizzarla e i tempi di ciclo. Essendo il JIT un sistema di tipo pull, le variazioni giornaliere di domanda non richiedono alcuna modifica ai programmi di produzione. Le modifiche necessarie alla produzione nascono infatti dalla linea di assemblaggio finale e risalgono a monte tramite il sistema dei prelievi del kanban. Ogni fase del sistema produttivo, senza alcun preavviso, modificherà la propria produzione in base alle quantità prelevate dalla fase a valle, il che non comporterà alcun problema se la produzione è stata correttamente livellata.

La tabella 1 offre un'analisi delle principali differenze presenti tra la produzione delle linee occidentali e quelle giapponesi.

Tabella 1

	Linee occidentali	Linee giapponesi
1	Priorità assoluta: bilanciamento della linea.	Priorità assoluta : flessibilità.
2	Strategia: stabilità, lunghi cicli di produzione, così che si verifichi raramente la necessità di ribilanciare.	Strategia: si punta sulla flessibilità per adeguare la produzione al variare della domanda.
3	Richiedono incarichi fissi alla manodopera.	Manodopera flessibile: da spostare ai problemi o nei punti dove si verifica il carico di lavoro.
4	Scorte intermedie per ammortizzare gli effetti di guasti degli impianti.	Massima manutenzione preventiva per impedire agli impianti di fermarsi.
5	Necessitano di analisi complicate (con utilizzo di computer) per valutare e scegliere	Necessitano dell'ingegnosità umana per assicurare la flessibilità e per trovare la soluzione ai colli di

	le numerose opzioni.	bottiglia.
6	Sono pianificate da specialisti di staff.	Il quadro intermedio può assumersi il compito dello studio della linea e regolare il piano come necessario.
7	Sono pianificate per funzionare a ritmo prefissato; i problemi di qualità sono risolti fuori linea.	Rallentano quando sorgono problemi sulla qualità; accelerano quando la qualità va bene.
8	Sono lineari e a forma di L.	Sono a forma di U o parallele.
9	E'preferita la movimentazione dei materiali con trasportatori.	Mettono i posti di lavoro molto vicini tra loro ed evitano i convogliatori.
10	Il principio è comprare grandi macchine e saturarle.	Il principio è fabbricare o comprare piccole macchine; aggiungere altre unità a seconda delle necessità.
11	Sono applicate nel montaggio finale ad alta intensità di lavoro.	Sono applicate anche nei sottoassiemi ad alta intensità di capitale e nel lavoro di fabbricazione.
12	Producono modelli misti dove il contenuto è simile da modello a modello.	Tendono ad attuare una produzione a mixed-model anche nei sottoassiemi e nella fabbricazione.

1.1.3 La tecnica di produzione Mixed model

Come precedentemente accennato, dai tempi di Henry Ford e della sua famosa Ford T, la domanda dei prodotti e le richieste imposte al sistema produttivo sono cambiate notevolmente. Inizialmente le linee di assemblaggio erano sviluppate per una produzione di massa di un singolo e standardizzato prodotto, ora invece vi sono una moltitudine di opzioni che il cliente può chiedere sul prodotto che sta ordinando, cosicché le industrie si trovano a dover gestire una varietà di prodotti il cui numero può risultare molto elevato. Esempi di questa possibile varietà, nel mondo della produzione di automobili, possono essere la presenza

del tetto apribile, il fatto che questo sia manuale o elettronico, la presenza dell'aria condizionata etc.). Per assicurare un altamente diversificato portfolio di prodotti, senza perdere i benefici di un efficiente flusso produttivo, viene utilizzata una linea di assemblaggio denominata Mixed-Model. Questa particolare tipologia di produzione non viene utilizzata solo nel mondo della produzione di automobili, ma in molti segmenti che realizzano beni di consumo, come ad esempio apparecchiature elettroniche o vestiti. In una linea di assemblaggio con la tecnica Mixed-model, l'applicazione di lavoratori e macchinari flessibili, permette di ridurre i tempi di setup e i costi, in quanto differenti prodotti vengono realizzati sulla stessa linea con una sequenza costituita dalle molte varianti. Nel caso questa metodologia venga applicata in un sistema Just-in-Time, le molte varianti del prodotto vengono solitamente assemblate in lotti unitari in intervalli di tempo abbastanza limitati, spesso anche di un solo giorno.

Un sistema produttivo che funziona con la logica JIT, se la sequenza dei prodotti è stata trovata nel modo corretto, garantisce l'ottenimento di una produzione *livellata* il che permette al sistema di reagire prontamente alle variazioni prodotte dal mercato e generare a monte della linea di assemblaggio un flusso produttivo regolare e continuo. La realizzazione di una produzione con queste caratteristiche consente di ottenere una riduzione dei costi e di far calare al minimo le giacenze dei semilavorati e dei prodotti finiti.

Il problema del sequenziamento, seguendo una logica mixed-model, risulta molto più complesso e delicato rispetto a quanto accade per le linee single o multi-model. Le linee single model vengono utilizzate per la realizzazione di un solo tipo di prodotto con volumi di produzione molto elevate, il che deve ovviamente essere sorretto da un mercato che richieda questa tipologia di produzione, risulta altrettanto evidente come in questo tipo di produzione non vi siano problemi inerenti a setup o di sequenziamento essendovi un solo prodotto. Le linee multi-model viceversa producono alcune tipologie di prodotti simili tra loro, le cui differenze però comportano grandi riconfigurazioni della linea, con conseguenti ampi tempi di setup. La scelta risulta quindi quella di produrre lotti ampi la cui dimensione ottimizza il trade-off tra i costi finanziari da sostenere, le scorte e i tempi di setup. Una linea che sfrutta un sistema a modelli misti deve essere caratterizzata da tempi di setup tra una tipologia di prodotto ed il

successivo forzatamente limitati per consentire cambi di produzione anche dopo lotti di una sola unità. L'impostazione *mixed-model* e la configurazione con una linea singola riducono drasticamente il numero di stazioni necessarie, la quantità di attrezzatura e lo spazio richiesto rispetto ad un sistema organizzato con linee multiple dedicate. Le scorte risultano ridotte perchè c'è un unico polmone alla fine di una linea *mixed-model* piuttosto che molti polmoni alla fine di ogni linea dedicata, quindi risulta più facile per i processi a valle interagire fisicamente con una sola linea, un vantaggio che rende più semplice l'introduzione dei *kanban* e la fusione fisica dei processi. Una sola linea semplifica anche l'interazione con i centri di lavoro precedenti e riesce a ridurre il numero dei pezzi, provenienti dalle stazioni precedenti, nei polmoni. Viene limitato inoltre il bisogno di supervisione e controllo nell'officina, in quanto gli operai sono unicamente su una sola linea, al contrario che sulle linee multiple dedicate dove gli operai sono chiamati a spostarsi in continuazione da una linea all'altra per produrre modelli diversi.

Capitolo 2

2.1 Analisi della Letteratura sulla produzione Mixed-Model.

La condizione di utilizzo ottimale per una linea a modelli misti è quella in cui la linea viene alimentata a monte, da fasi di fabbricazione che realizzano quantità di componenti corrispondenti alla domanda del mix, in modo sincronizzato. Utilizzando questo metodo si riesce ad ottenere una riduzione delle scorte i cui benefici sono già stati descritti precedentemente.

Come viene sottolineato in un esempio tratto da Schonberger (1982), la riduzione delle giacenze sarebbe ottenibile grazie ad una produzione contemporanea di ciascun componente in lotti di grandi dimensioni, il che comporterebbe però una riduzione dell'utilizzo degli impianti e ad un aumento della produttività richiesta. Nelle figure successive (fig.3,fig.4) viene mostrato un esempio. Le linee di assemblaggio rappresentate sono costituite da 3 macchine o linee di fabbricazione, ciascuna delle quali produce un componente critico, il quale, una volta assemblato con gli altri componenti costituirà il prodotto finito (le due condizioni vengono rappresentate rispettivamente con lettere minuscole e maiuscole). La criticità è determinata dalla necessità di regolarizzare i consumi del componente affinché la linea abbia un funzionamento il più regolare possibile. In questo esempio le 3 macchine A,B,C producono componenti critici x,y,z che serviranno per assemblare i prodotti finiti X,Y e Z. In figura vengono rappresentate 2 o 3 ore di produzione della linea. In entrambi i casi sono trascurati i tempi di setup e le dimensioni dei buffer presenti tra la linea di assemblaggio e le macchine a monte.

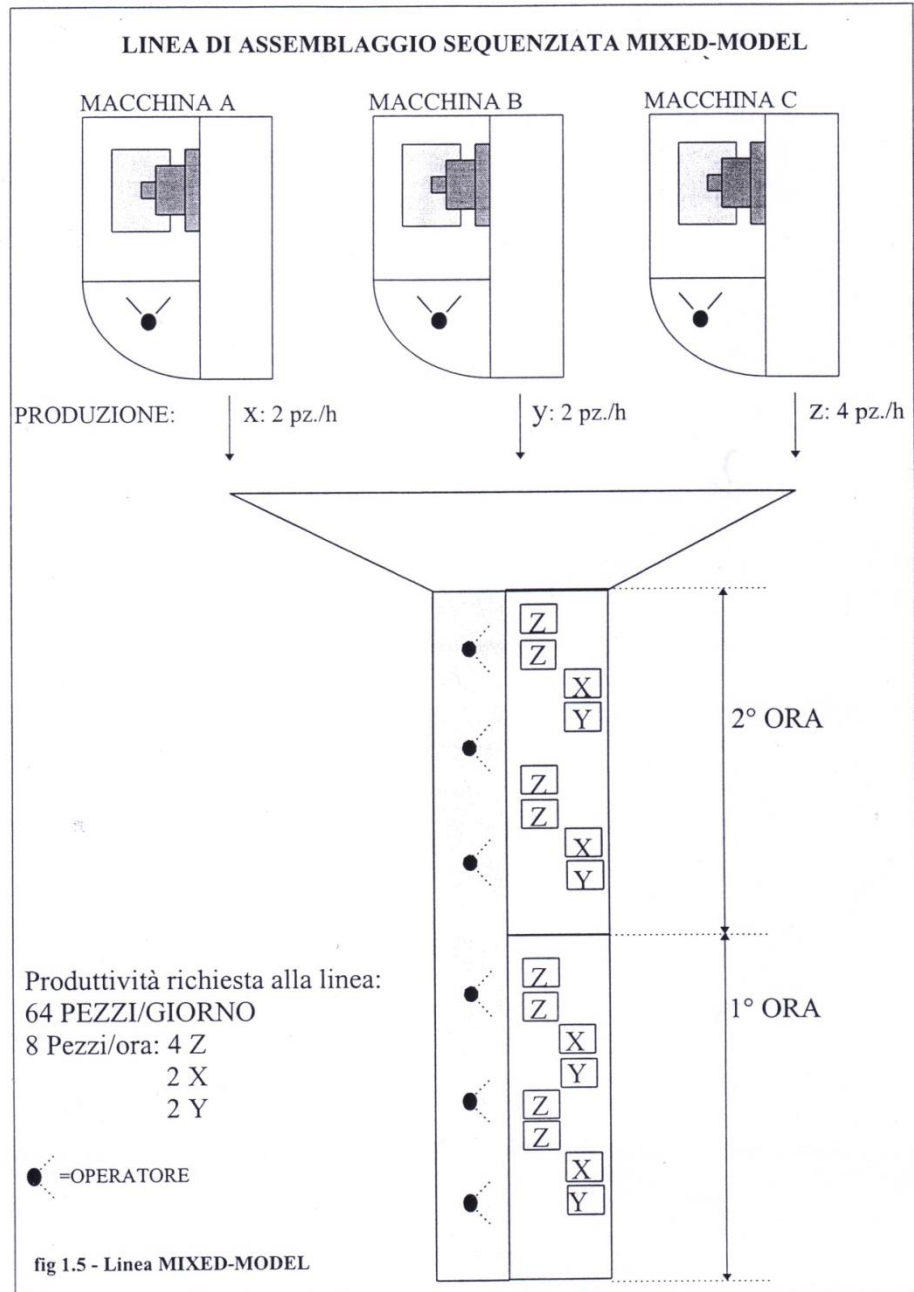


fig. 3

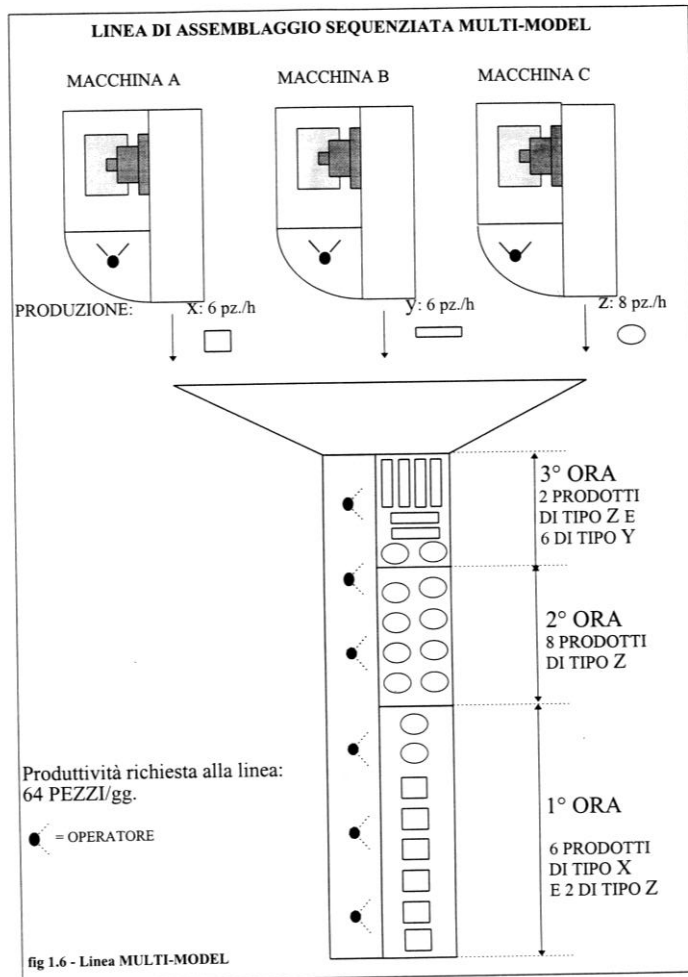


fig. 4

Nell'analisi delle immagini si nota come una produttività di 64 pz./gg. venga garantita da un'alimentazione continua da parte delle macchine A,B,C . Nella prima immagine (fig.3) le macchine funzionano in parallelo fornendo 2 pezzi di tipo x, 2 di tipo y e 4 di tipo z che vengono ogni ora assemblati dalla linea. La linea in questo caso risulta perfettamente bilanciata e le risorse produttive sature. Nella seconda immagine (fig.4) il sistema produttivo segue un organizzazione di tipo *multi-model* con il quale per poter raggiungere la domanda di 64pz./gg. si deve ricorrere ad una produttività di ogni macchina tripla rispetto al caso precedente. Si può osservare come gli impianti risultino insaturi in quanto ad ogni ora funzionano al massimo due macchine su tre.

2.1.1 Bilanciamento considerando buffer con capacità finita

I buffer (magazzini) hanno, come sappiamo, la funzione di bloccare i pezzi quando la successiva stazione sta ancora lavorando sul precedente pezzo e non è quindi in grado di ricevere nuovi pezzi. In una gestione di tipo mixed model i tempi per le attività di assemblaggio possono essere differenti tempi per i diversi modelli, così da rendere normale la presenza di buffer. La presenza di un buffer e la sua dimensione ha grande influenza sul tasso di produzione della linea, sullo spazio di stoccaggio, sullo spostamento dei materiali e sul costo di inventario, cosicché è importante cercare di limitare la loro dimensione e allo stesso tempo aumentare il tasso di produzione. Battini et al.(2009) propongono un algoritmo che si divide in due momenti, quello relativo al bilanciamento della linea e quello relativo al sequenziamento. Il bilanciamento delle soluzioni definisce il numero delle stazioni, il tipo e il numero di compiti per ciascuna stazione, il tipo di utensili da utilizzare in ciascuna stazione etc.

Viene calcolato il tempo relativo all'esecuzione del compito:

dove d_m rappresenta la storica domanda del modello m e t_{jm} il tempo per eseguire l'operazione j per il modello m . Il bilanciamento considera quindi la media dei tempi delle operazioni, calcolate utilizzando i dati storici del mix di produzione e della domanda. La funzione obiettivo ha lo scopo di minimizzare il tempo di inattività tra le stazioni non eccedendo mai il tempo di ciclo. Il modello punta a massimizzare l'appiattimento della linea minimizzando la differenza in valore assoluto tra il tempo di ciclo e il tempo di processamento nella stazione considerata. La funzione da minimizzare risulta:

Soggetta ai seguenti vincoli

che assicura che ogni compito venga assegnato a una stazione

garantisce che il tempo di processamento di una certa stazione riferita ad un determinato modello non superi il tempo di ciclo

$$E_j = k(X_{j,k}) \leq L_j$$

assicura che le precedenze tecnologiche vengano rispettate.

Il secondo step si occupa invece di limitare la capacità dei buffer ottimizzando l'uniformità della linea in funzione della produzione del mix introducendo l'*instant imbalance level*.

Come primo passo viene introdotta una variabile decisionale

L'*instant imbalance level* viene definito come una variabile $S_{i,k}$ all'istante i per la stazione k :

$$S_{0,k} = 0$$

$$S_{1,k} = X_{1,m} \cdot \Delta_{m,k}$$

$$S_{i,k} = S_{i-1,k} + X_{i,m} \cdot \Delta_{m,k}$$

L'instant imbalance level descrive il livello istantaneo alla posizione i della sequenza del sovraccarico di lavoro o del tempo di inattività della stazione k in funzione del mix di produzione. Quando la stazione ha un sovraccarico il valore è positivo, mentre se è inattiva negativo. La funzione da minimizzare è:

Soggetta alle seguenti condizioni:

le quali assicurano che tutti i modelli vengano considerati per un dato mix produttivo, la cui domanda è rappresentata da d'_m . Si può notare come non siano presenti dei vincoli sulla capacità dei buffer, ma la funzione obiettivo assicura un ottimo carico tra le stazioni e un basso impatto sulle dimensioni dei magazzini.

2.1.2 Programmazione influenzata dai tempi di setup

Una buona sequenza di produzione non solo deve avere un buon mix tra i prodotti ma anche un accettabile numero di set-up. In questa situazione il problema diventa multi-obiettivo con la minimizzazione sia del tasso di utilizzo sia del numero dei setup. Spesso nell'analizzare i problemi di sequenziamento in una linea mixed-model il tempo di setup viene considerato influente. Essendo il minimo tempo di setup una chiave per il successo del modello JIT, è più realistico in certi casi considerare un tempo di setup significativo. Mc Mullen e Tarasewich

[Tarasewich,2005] hanno evidenziato le funzioni obiettivo per raggiungere questi scopi che vengono espresse con:

Min

Dove k è un indice della posizione nella sequenza, e se l'oggetto nella posizione k è differente da quello nella posizione $k-1$, un setup è necessario. Quindi se $s_k=1$ il setup è necessario. Da sottolineare il fatto che un setup iniziale è richiesto e questo è evidenziato dal fatto che l'indice della sommatoria inizia da 2. Il tempo richiesto per realizzare un setup è assunto essere indipendente dalla sequenza(sequence-independent), e ciò indica che il tempo necessario per effettuare il setup al fine di realizzare un oggetto su di una macchina non è determinato dall'oggetto precedente. Il numero di setup richiesti rappresenta il tempo di setup, ovvero il tempo totale dei setup è direttamente proporzionale al loro numero. Il secondo obiettivo punta all'ottimizzazione della stabilità del tasso di utilizzo del materiale grezzo e viene espressa con:

—

Per poter ottenere un tradeoff tra il tasso di utilizzo e il numero di setup, viene proposto di costruire una funzione obiettivo composta. Il risultato consiste in un grafico denominato *efficient frontier* (fig.4), sul quale vengono trovate le condizioni ottime in base al numero di setup che si vogliono ottenere o al tasso di utilizzo, e tali soluzioni vengono chiamate *dominanti*. L'obiettivo risulta quindi quello di calcolare il tasso di utilizzo minimo per ogni setup.

2.1.3 Minimizzazione della variazione del tasso di consumo delle parti

Con il successo del sistema produttivo Just-in Time della Toyota l'obiettivo di ottenere una sequenza che minimizzi la variazione del tasso delle risorse usate, ha attratto molti ricercatori. Per ottenere ciò si parte dal calcolo del numero totale di parti per l'intera sequenza della parte j -esima

In cui d_i rappresenta la domanda per l' i -esimo prodotto, $c_{j,i}$ il numero di parti j necessarie per un modello i , N il numero di modelli da produrre sulla linea di assemblaggio. Si calcola quindi il tasso di consumo delle parti:

—

e D rappresenta la domanda totale $D = \sum d_i$. Per cercare di evitare sovraccarichi di lavoro si punta al livellamento del consumo delle parti, il consumo desiderato di parti j nelle prime k posizioni risulta da:

$$k \cdot r_j$$

Il consumo reale della parte j per una specifica sequenza alla posizione k viene indicato attraverso:

La funzione obiettivo può essere vista come la differenza tra il consumo reale e quello desiderato ed essere espressa attraverso la minimizzazione di:

F_j è una funzione unimodale convessa con un minimo $F_j(0)=0$, mentre $x_{i,k}$ è una variabile decisionale rappresentante il numero del modello i -esimo cumulativamente sequenziato nelle prime k posizioni per una specifica sequenza.

Il problema di bilanciamento in una linea mixed model [Jin ,Wu2002] può essere definita da:

Le condizioni sono espresse da:

,

che garantisce che in ogni sequenza il numero totale di modelli sia pari a k

,

le quali specificano che per la successiva posizione il numero del modello sequenziato i può aumentare di una unità o rimanere lo stesso. L'ultimo vincolo vigila sul non superamento della domanda dell' i -esimo modello:

.

Dagli studi fatti sul metodo Toyota, Monden[Monden,1983] propose un semplice metodo euristico per risolvere questo modello e lo chiamò *goal chasing method*, il quale adattato alla presentata f.o. risulta essere:

Step 1. Pongo $k=1, x_{i,0}=0, i$

Step 2. Scelgo il modello l con $x_{l,k-1} < d_l$ che minimizza il costo quadratico

Dove

Step 3.

Step 4.

se e

Altrimenti vai allo Step 2.

Il goal chasing method è un metodo semplice e può risolvere una vasta scala di problemi in tempi contenuti, ed è indifferente al numero di parti, modelli o alla domanda. Il principale svantaggio di questo metodo consiste nella sua miopia e nella sua tendenza ad esaurire le unità convenienti nei primi step. Se vi sono delle unità che soddisfano il tasso di produzione abbastanza bene vengono poste nelle prime posizioni della sequenza e i modelli con delle opzioni particolari saranno tralasciati così che nelle ultime posizioni si troveranno grandi varietà di prodotti da realizzare.

2.1.4 Bilanciamento ottenuto ponendo attenzione al carico di lavoro.

In tutte i processi lavorativi in cui è coinvolto l'operato dell'uomo, si deve considerare durante il bilanciamento delle varie macchine anche il possibile sovraccarico fisico che l'operaio è costretto a subire. L'attenzione a questo particolare consente di limitare fortemente la possibilità di infortuni sul lavoro. Il carico di lavoro può essere incrementato dal numero dei

compiti da svolgere ma anche dall'ambiente in cui l'operaio deve lavorare. Gli elementi da considerare come principali fattori da tenere in considerazione sono tre. Il primo elemento consiste del sovraccarico di lavoro fisico dovuto alla richiesta di lavoro. Particolare rilevanza hanno i lavori in cui vi sono da trasportare degli elementi a mano, evidentemente il loro peso, la lunghezza del tragitto da percorrere e la continuità del lavoro possono creare dei disagi all'operaio. Degli studi [Choi,2009] hanno dimostrato che lavoratori con carichi di lavoro maggiori sono maggiormente esposti a rischio di incidenti rispetto a quelli con lavori più lievi. In particolare vennero studiate situazioni in cui l'operaio doveva continuamente alzare pesi e vennero conteggiati i movimenti al minuto che egli doveva eseguire, l'esito degli studi fu che tutte le operazioni comprendenti importanti movimenti muscoloscheletrici, portano un immediato effetto sulla qualità del lavoro e sulla possibilità di provocarsi delle lesioni. Il secondo elemento analizza l'ambiente di lavoro in cui l'operaio è immerso, temperature inappropriate, rumore, vibrazioni, illuminazione ed esposizione ad agenti chimici sono tutti elementi da tenere in considerazione. Un ambiente di lavoro non idoneo o in generale "scomodo" influenza notevolmente, anche sotto l'aspetto psicologico, l'operaio. Il terzo elemento, non meno importante e influente dei primi, riguarda il sovraccarico dovuto alla posizione in cui l'operaio è costretto a lavorare: la postura da tenere durante tutte le ore lavorative. Un operaio costretto a stare in piedi, ricurvo sulla postazione e costretto a particolari rotazioni, risulta soggetto ad affaticamenti e quindi di possibili infortuni. Effettuando un'analisi in azienda e dando un punteggio alle problematiche appena descritte, si può dare un peso a ciascuna di esse nel momento in cui si descrive il modello per bilanciare la produzione. Poiché l'ammontare del lavoro dipende dal tempo di processamento, e il carico di lavoro come detto dalla domanda di lavoro, dall'ambiente e dalla postazione lavorativa, non è possibile stimare il totale sovraccarico di lavoro con una sola funzione obiettivo. Per risolvere questo problema Choi, [Choi 2009] propose un *Line Balancing problem for processing Time and Physical Workload (LBPT&PW)*, la cui funzione obiettivo è:

X_{irj} rappresenta una variabile il cui valore è 0 o 1, nel caso in cui il compito j del modello r è assegnato alla macchina i oppure no. Il primo termine della funzione obiettivo ha lo scopo di

rendere eguali il sovraccarico dei tempi di processamento su tutte le macchine, e di bilanciare il lavoro per ogni modello. Il secondo termine cerca invece di minimizzare il sovraccarico di lavoro fisico. Matematicamente sono espresse nel seguente modo:

—

Dove, n sono il numero di stazioni di lavoro, N il numero delle operazioni, R il numero dei modelli, I_{rj} è un valore pari a 0 o 1 in base al fatto che il modello r richieda la lavorazione j o no, t_{rj} è il tempo di processamento dell'operazione j sul modello r , μ il tempo medio di processamento necessario su ogni stazione, λ_i rappresenta un peso riferito a ciascuna tipologia di sovraccarico di lavoro, u_j v_j y_j rappresentano il carico di lavoro fisico dipendente rispettivamente dalla domanda di lavoro, dall'ambiente e dai movimenti o dalla postura in cui l'operaio lavora.

2.1.5 Bilanciamento con l'utilizzo delle formiche

Uno dei più interessanti articoli analizzati sul mondo delle formiche è quello rappresentato dall'algoritmo proposto da Vilarinho e Simaria[Vilarinho,2006], i quali affrontano il problema dell' "assembly line balancing problem"(ALBP). Per poter analizzare un problema di assemblaggio in una logica mixed-model è fondamentale analizzare l'ammontare del tempo di ciclo tenendo in considerazione la domanda dei diversi modelli. Le caratteristiche della linea di assemblaggio analizzate sono:

-La linea è usata per assemblare un set di modelli simili

-Le stazioni di lavoro possono essere replicate se la domanda porta ad avere, per alcuni compiti, tempi di processamento superiori a quelli del tempo di ciclo.

-L'assegnazione di un'operazione ad una workstation può essere forzato o proibito attraverso dei vincoli di zona.

Sono stati analizzati ed utilizzati tre tipi di vincoli: precedenza, zona, capacità.

Il vincolo di precedenza determina la precedenza con la quale le operazioni devono essere eseguite, sottolineando il fatto che un compito potrà essere assegnato se tutti i predecessori sono già stati assegnati, o se non vi sono predecessori. In ambito di mixed-model i processi di assemblaggio dovrebbero essere abbastanza simili tra loro per poter facilitare la combinazione tra i vari prodotti. Solitamente si cerca quindi di avere una base comune a molti prodotti.

Il vincolo identificato come di zona, indica un'attitudine a forzare o negare l'assegnazione di un determinato compito su una determinata workstation, e ciò dipende dalla positività o negatività del valore che gli viene assegnato.

Il terzo vincolo è inerente alla capacità, ovvero viene definito un tempo di processamento minimo, superato il quale viene concessa la replica della stazione di lavoro interessata il *Minimum Replication Time*, MRT.

Il carico di lavoro di ogni stazione viene calcolato come la somma del tempo di processamento delle operazioni che sono già state assegnate a quella stazione più il tempo di processamento dell'operazione h in esame; matematicamente espresso dalla:

Il carico di lavoro ottenuto deve essere inferiore ovviamente al tempo di ciclo C , ma nel caso in cui la stazione operativa abbia un tempo di elaborazione superiore all'MRT oppure ciò accada per le operazioni in esame allora W_{km} , dove R_k rappresenta il numero delle repliche

della macchina operatrice in esame. Nella fig.5 si può notare uno schema di come si sviluppi l'ANTBAL. All'inizio si genera una colonia di N formiche ciascuna delle quali cerca una soluzione fattibile. Dopo aver trovato la soluzione vi è il rilascio del feromone, e la procedura viene ripetuta.

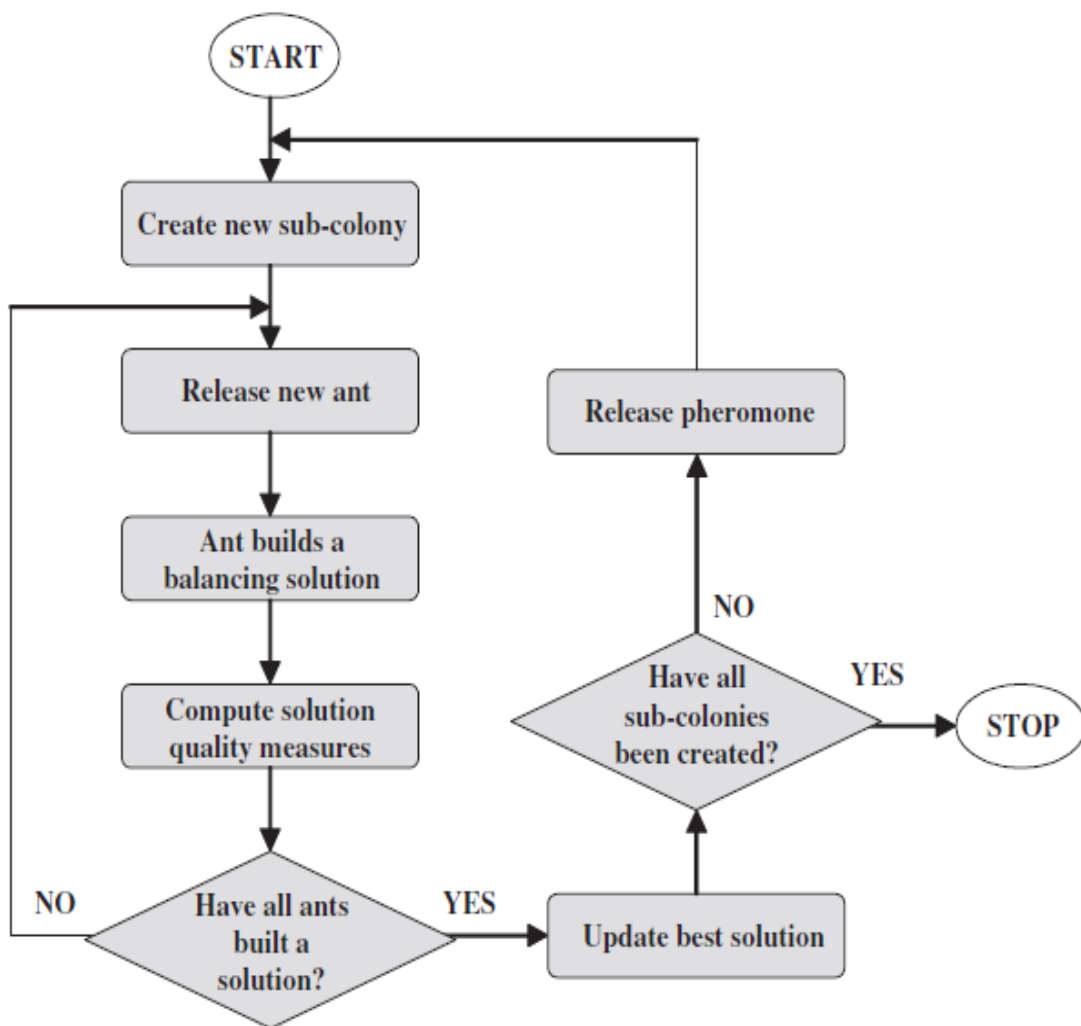


fig. 5

il percorso effettuato da ciascuna formica viene mostrato dalla fig.6

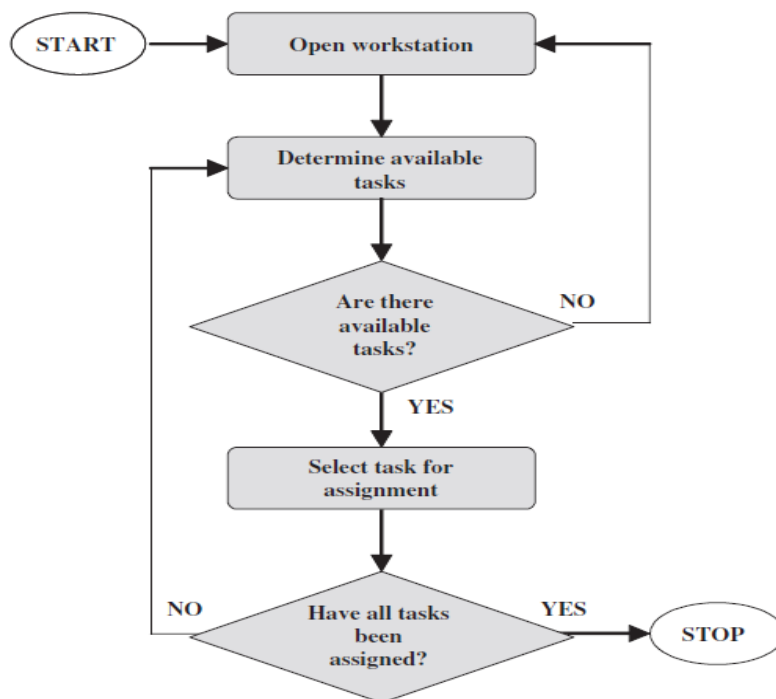


fig. 6

Come verrà spiegato più dettagliatamente del capitolo 3 la formica si muove seguendo una legge probabilistica, con la quale essa deciderà se muoversi in una o nell'altra direzione. La funzione obiettivo è focalizzata sulla massimizzazione dell'efficienza della linea (WE), del bilanciamento tra le stazioni (B_b), e del bilanciamento all'interno di ogni singola stazione (B_w), il tutto espresso dalla relazione:

2.2 Classificazione dei problemi¹

Ciascun problema di sequenziamento di tipo mixed-model può essere descritto con tre principali elementi: le caratteristiche operazionali delle stazioni, le caratteristiche della linea nel suo complesso e l'obiettivo da seguire. I tre elementi sono classificati utilizzando il lo schema $[\alpha,\beta,\gamma]$ [Graham et al., 1979], dove α corrisponde alle caratteristiche della stazione, β a quelle delle stazioni, γ sono gli obiettivi.

Boysen et al. (2009) utilizzarono la stessa metodologia per effettuare uno schema del sequenziamento a modelli misti, che viene riportata di seguito.

Caratteristiche della stazione

Limiti delle stazioni α_1 :

$\alpha_1=0$ Se le stazioni sono chiuse, gli operatori devono operare entro i limiti di confine della stazione. Non è permesso agli operai oltrepassare lo spazio a loro dedicato. La chiusura di alcune stazioni risulta necessaria ogni volta che l'area di lavoro è caratterizzata da specifiche condizioni ambientali, per esempio, nel caso di produzione di vernice. Dove è utile per interpretare una situazione l'utilizzo anche di $\alpha_1=closed$.

¹ Boysen N. et al., 2009, *Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique*, European journal of Operational Research, Vol.No.192, pp.349-375.

$\alpha_1 = \text{open}^i$ I confini delle stazioni possono essere oltrepassati in una certa misura, e solitamente essi sono delimitati da vincoli tecnici, come la limitata gamma di strumenti o la movimentazione dei materiali. Si può distinguere in

$\lambda = 0$: Entrambi i confini sono aperti

$\lambda = \text{left}$: Stazioni aperte verso sinistra

$\lambda = \text{right}$: Stazioni aperte verso destra

Reazione all'imminente sovraccarico

$\alpha_2 = 0$ Il sovraccarico di lavoro non incide sul tempo d'inizio della successiva stazione

$\alpha_2 = \text{off}$ I pezzi lavorati sono tolti da un sistema di trasporto

$\alpha_2 = \text{stop}$ La linea è interrotta non appena un pezzo non finito raggiunge una stazione di confine, che

porta ad avere tempo d'attesa nelle altre stazioni

$\alpha_2 = \text{var}^i$ I sovraccarichi possono essere compensati dalla variazione dei confini delle stazioni. Si può avere λ

$\lambda = 0$: early start model si impone il bordo sinistro fisso, cosicchè ogni stazione si può espandere solo a valle.

$\lambda = \text{late}$: late start model le stazioni si possono espandere in entrambe le direzioni.

Tempo di processamento

$\alpha_3 = 0$ La natura stocastica del tempo può non essere considerata, il tempo di processamento viene considerato statico e deterministico

$\alpha_3 = p^{\text{sto}}$ Il tempo di processamento viene considerato stocastico la cui variazione segue una conosciuta funzione di distribuzione.

Operazioni simultanee

Operazioni simultanee se permesse consentono agli operai di iniziare una lavorazione ad una stazione sebbene la precedente non abbia ancora finito il suo lavoro.

$\alpha_4 = 0$ operazioni simultanee non sono contabilizzate

$\alpha_4 = cc$ la sequenza considerata può avere operazioni simultanee

Setup

$\alpha_5 = 0$ Nessun tempo o costo di setup viene considerato

$\alpha_5 = \text{setup}^\lambda$ In base al fatto che si considerino tempi o costi di setup λ

$\lambda = \text{time}$: sono considerati i tempi di setup

$\lambda = \text{cost}$: sono considerati i costi di setup

Stazioni in Parallelo

$\alpha_6 = 0$ Nessuna parallelizzazione viene considerata

$\alpha_6 = \text{par}^\lambda$ la parallelizzazione può essere λ

$\lambda = 0$ Le stazioni vengono collocate l'una affianco all'altra

$\lambda = \text{chr}$ La parallelizzazione viene ottenuta tramite l'aggiunta di operai

Caratteristiche della linea

Numero di stazioni

$\beta_1 = 0$ Se la linea può essere composta da un numero di stazioni arbitrario

$\beta_1 = n$ il numero di stazioni deve essere ristretto ad un numero positivo pari a n

Omogeneità delle stazioni

$\beta_2 = 0$ tutte le stazioni hanno le stesse caratteristiche

$\beta_2 = \text{div}$ La linea di assemblaggio è costituita da macchine con caratteristiche diverse

Disciplina di lancio

$\beta_3 = 0$ Tasso di lancio fisso: unità consecutive vengono poste sulla linea ad intervalli di tempo sempre uguali al tempo di ciclo C , il che facilita il calcolo dell'output

$\beta_3 = v/$ Tasso di lancio variabile: permette una maggiore flessibilità. Gli intervalli di tempo possono essere modificati per limitare i tempi di fermo o i sovraccarichi.

Velocità di ritorno

$\beta_4 = 0$ Se il movimento degli operai nella posizione di inizio lavorazione è considerevolmente più veloce rispetto a quello della linea si può considerare influente

$\beta_4 = \text{fin}$ Se il tempo di ritorno varia considerevolmente tra un ciclo e un altro o tra un operaio e il successivo.

Layout della linea

$\beta_5 = 0$ Le linee sono disposte in modo seriale lungo il flusso della linea

$\beta_5 = u$ La linea è organizzata secondo una linea ad U , il che permette all'operatore di seguire più operazioni stando nella stessa postazione

$\beta_5 = feeder$ Uno o più alimentatori si congiungono in una linea principale.

Obiettivi

$\gamma = o$ Minimizzare il sovraccarico di lavoro

$\gamma = len$ Minimizzare la lunghezza della linea: obiettivo raggiungibile se i bordi della linea non sono fissi.

$\gamma = thru$ Minimizzare il tempo di attraversamento, definito dall'intervallo di tempo tra il lancio del primo pezzo di lavorazione e la fine dell'ultimo. Questo obiettivo dipende anche dalla non fissità della lunghezza delle stazioni

$\gamma = dis$ Minimizzare il massimo spostamento dei lavoratori dal loro rispettivo punto di riferimento

$\gamma = idle$ Minimizzare il tempo di inattività, che rappresenta la capacità non utilizzata di macchinari e lavoratori. Ciò si verifica quando gli operai devono aspettare l'arrivo di pezzi da produrre o la fine delle operazioni sulla macchina precedente , nel caso in cui non fossero possibili lavori in contemporanea

$\gamma = stop$ Minimizzare la durata delle fermate: durante un fermo macchina nessun pezzo può essere prodotto, quindi questo obiettivo minimizza il costo opportunità delle vendite perse.

2.2.1 Classificazione di Graham

Partendo dalla classificazione effettuata da Graham e dalla sua espansione effettuata da Zhu e Wilhelm[Zhu ,Wilhelm 2006], ho implementato a mia volta l'elenco delle possibili caratteristiche. I nuovi elementi sono stati elaborati partendo dall'analisi degli articoli da me letti, di cui i più rappresentativi sono stati riportati nella Tabella b. La classificazione ottenuta è la seguente: gli elementi evidenziati in verde sono quelli da me implementati.

The α field specifies the machine configuration:

1	single machine
<i>Af</i>	<i>Assembly Flow-Shop</i>
<i>Fm</i>	<i>m-machine flow shop</i>
<i>FFc</i>	flexible flow shop with <i>c</i> stages in series, each with a set of identical machines in parallel
<i>FJc</i>	flexible job shop with <i>c</i> work centers, each with a set of Identical machines in parallel
<i>HFc</i>	hybrid flow shop with <i>c</i> stages in series, each with a set of Unrelated machines in parallel (see Ruiz and Maroto,2006)
<i>J</i>	<i>Job Shop</i>

<i>Jm</i>	<i>m</i> -machine job shop in which each job has its own predetermined Routing
<i>O</i>	Open shop
<i>Pm</i>	<i>m</i> identical machines in parallel
<i>Qm</i>	<i>m</i> uniform machines in parallel, each operating at a different speed
<i>R</i>	Limited number of identical vehicles and all jobs can be transported by any of the vehicles
<i>Rm</i>	<i>m</i> unrelated machines in parallel, each with a unique processing time for a job

The θ field specifies any processing restrictions and constraints that may be relevant:

<i>Block</i>	blocking can occur in a flow shop because buffers have limited capacities
<i>brkdwn</i>	breakdown or shutdown of machines
<i>bsij(bsijk)</i>	SDS time (or cost) for batch <i>j</i> immediately after batch <i>i</i> (on machine <i>k</i>)
<i>dj(d^{-j})</i>	jobs have due dates (deadlines)
<i>d(d⁻)</i>	all jobs have a common due date (deadlines), $d_j=d(d^{-j}=d^{-})$

M_j	not all m machines in parallel are capable of processing job j
nwt	jobs cannot wait between operations in a flow shop
$prmp$	jobs can be preempted
$prec$	precedence constraints relate jobs
$prmu$	a permutation sequence is used in a flow shop
r_j	jobs have known release dates
$recrc$	jobs may recirculate to be processed on the same machine several times
$s_{ij}(s_{ijk})$	SDS time (cost) for job j immediately after job i (on machine k)
t_{kl}	job-independent, but machine dependent loaded travel times
t_{kl}'	machine dependent empty travel times

Setup information

ST_{si}	sequence-independent setup time
SC_{si}	sequence-independent setup cost
ST_{sd}	sequence-dependent setup time
SC_{sd}	sequence-dependent setup cost
$ST_{si,b}$	sequence-independent batch or family setup time
$SC_{si,b}$	sequence-independent batch or family setup cost

STsd,b	sequence-dependent batch or family setup time
SCsd,b	sequence-dependent batch or family setup cost
Rsi	sequence-independent removal time
Rsd	sequence-dependent removal time
Rsi,b	sequence-independent batch or family removal time
Rsd,b	sequence-dependent batch or family removal time

The γ field describes the objective to be minimized:

Cmax	makespan
<i>Dmax</i>	<i>maximum delivery time</i>
Lmax	maximum lateness
Tmax	maximum tardiness
$\sum (w_j)E_j$	total(weighted) earliness
$\sum (w_j)F_j$	total(weighted) flowtime
$\sum (w_j)C_j$	total (weighted) completion time
$\sum (w_j)T_j$	total (weighted) tardiness
$\sum (w_j)U_j$	(weighted) number of tardy jobs
$\sum E_j + \sum T_j$	total earliness/tardiness
$\sum w' E_j + \sum w'' T_j$	total weighted earliness/tardiness with the same earliness

	penalty for all jobs and the same tardiness penalty for all jobs
$\sum w'jEj + \sum w''j Tj$	total weighted earliness/tardiness with arbitrary earliness and tardiness penalties for all jobs
$\sum_j (w_j E_j + w_j T_j + c^s_j)$	Earliness cost, tardiness cost and setup cost
$\sum s_{ij}, \sum s_{ijk}, \sum b_{sij}$ or $\sum b_{sijk}$	total setup time (cost) with respect to s_{ij} , s_{ijk} , b_{sij} , or b_{sijk} (TST/C)
F_j	<i>Total flowtime</i>
\mathcal{R}	\sum any regular measure of performance (see Pinedo (2002))
γ	any measure of performance
Π	minimize cost
Π'	minimize sum (or average over time horizon) of setup and holding Cost.

Tabella 2

Scheduling	Type	Contraints	Obiective Function	Method	Terms of performance	Note
McMullen ,Tarasewich 2005 <i>Fm sij(sijk) γ</i>	Mixed model	Inizial Setup Sequence- indipendent	Min both usage rate and number of setup	Efficient Frontier	CPU ratio, Average Inferiority, Frontier voids	Need memory to hold all the nodes of level
Caridi , Sianesi 2000	Mixed model		Min difference between actual output and theoretical output	Mathematical rapresentation		
Miltenburg 2007 <i>FFc </i>	Mixed model		Optimal schedule	Dynamic programming algorithm	Maximum Absolute Difference Time period	Constraints of changeovers or due date increase the computation time
McMullen ,Tarasewich 2000 <i> STsi </i>	Multi-model	Inizial Setup Sequence-	Min both usage rate and number	Genetic algorithm;	Makespan Usage rate	and Computationally expensive

		independent	of setup	Simulated annealling			
Jin Wu 2002	Mixed model		Min variation in rate of consuming parts	Goal chasing method plus opportunity cost	SDQ value, computational time	Simple, fast, regardless of the number of parts, demand. Myopia, use up good units in early iteration	
Fliedner, Boysen, Scholl 2007	Mixed model Multi Level		Objective rate variation				
Ponnambalam Aravindan, Subba Rao 2003	Mixed model assembly line	Pace constant	Min the variation in parts usage.	GA with Pareto	variability in parts consumption (VPC)	Balancing has achieved using an average cycle time for the products	
Af STsd $\sum sij, \sum sijk, \sum bsij$ or $\sum bsijk$	MMAL	sequence-dependent setup	Min the total utility work. Min the set-up cost.				
Tavakkoli-Moghaddam, Taheri,	Parallel Machine	Sequence	Min Tardy Job	GA	Computational		

Bazzazi, Izadi, Sassani 2009		dependent and total time				
$P_m STsd, prec \sum (w_j)U_j, \sum (w_j)C_j$		time setup, precedence		completion time		
Kopanos, Lainez, Puigjaner 2009	Single stage multiproduct batch plants with different processing unit in parallel	Assignment , timing, sequencing, e.i. with release time and ready time	Min combined function of tardiness and earliness	MILP model, b&b	Computational time	
$HF_c prec, r_j, sij(sijk) \sum E_j + \sum T_j$						
Sun, Xue 2009	Multiproduct batch plants with parallel units	Release time, Due date,	Min Makespan	2 Rules	Computational time, reduce model size	
$P_m r_j, dj(d^-j) C_{max}, \sum (w_j)E_j$			Min Earliness tot	Algorithm		
Deti, Meloni, Pranzo 2007	Two-stage industrial plants		Optimizing both number of setups and max number of setups paid	ILS (Iterated Local Sources) Metaheuristics	Potentially dominating solution PDS and area ratio AR	
$F_m \sum sij, \sum sijk, \sum bsij \text{ or } \sum bsijk$						

Chen,Liu, Feng, Shao 2002 $FFc r_j, STsd Cmax, \sum (w_j)E_j, \sum (w_j)T_j, \sum (w_j)U_j, Lmax$	Multiproduct batch plants with parallel units	Sequence dependent setup time, release time	Min Makespan, -Mean earliness, -Mean tardiness, -Number of tardy orders, -Lateness	MILP formulation	Computational time
Aubry,Rossi,Espinouse,Jacomino 2008 $FFc sij(sijk) \Pi$	Parallel multi-purpose machines	Setup cost	Minimum cost setup	MILP	
Krasir,Leung,Pinedo,Zhang 2008 $1 sij(sijk) \sum_i (wE_j+wT_j+c^s_j)$ $Pm sij(sijk) \sum (w_j)C_j$	Single machine	Setup cost			Presented more kinds of problems with setup cost
Tavakkoli-Moghaddam, Taheri, Bazzazi, Izadi, Sassani 2009 $Qm prec, dj(d^-j) \sum (w_j)U_j, \sum (w_j)C_j$	Parallel Machine	Precedence, due date	Min Tardy job, Total completion time	GA	Computational time
Baykasoglu,Ozbakir,L.Gorkemli ,B. Gorkemli 2009	Parallel Assembly Line	Precedence	Min number of stations and idle times	ACO	Number of stations

Dorigo,Bonabeaub,Theraulaz 2000			Traveling Salesman Problem	AS			Response Threshold method
Dorigo ,Maniezzo,Colorni 1996			Traveling Salesman Problem	AS			Explain the idea
Deroussi,Barahona da Fonseca (2009)	FMS		Min total vehicle distance	loaded travel	QAP+ACS		Makespan criterion
Stutzle,Hoos 2000			Travelling Salesman Problem		MMAS		Avoid premature ant's convergence
Mullen,Monekosso,Barman, Remagnino 2009	Mixed Model		Travelling Salesman Problem		AS,ACS, ASrank, MMAS		Review
Vilarinho,Simaria 2006	Mixed model assembly line Parallel workstation	Capacity Precedence Zoning	Min number of workstation	AS particular probability transition rule	with	Number of operator and computational time	
Li,Qiao,Tian,Wu 2009	Semiconductor wafer		Min and	Tardiness Max	ACO	Number of movements and	

movements

machine utilities

Capitolo 3

3.1 La tecnica multi-agente e l'analogia con i paradigmi naturali della Insect Society

In questo capitolo verranno descritte le proprietà dei sistemi ad agenti autonomi la cui struttura prende ispirazione dall'osservazione delle logiche che dirigono il mondo naturale, ed in particolare degli insetti che vivono in colonie. Nei paragrafi 3.2-3.3 verranno descritte le caratteristiche dei sistemi multi agente (MAS). Nel paragrafo 3.4 vi sarà una presentazione dell'Ant System, delle sue analogie con il mondo animale e delle formule che ne regolano il funzionamento. Il paragrafo 3.5 metterà in luce le differenze tra le varie tipologie di Ant System incontrate in letteratura.

3.2 La decentralizzazione dell'organo decisionale: i sistemi multi-agente²

A partire dagli anni '70 abbiamo assistito ad una lunga evoluzione delle tecniche di produzione su corto-periodo. Dopo un primo periodo in cui l'ottimizzazione ha tentato di imporre il proprio dominio, subentrò l'approccio euristico che cerco di superarne le limitazioni,

² Caridi M., Sianesi A., Multi-agent Systems in production planning control: An application to the scheduling of mixed-model assembly lines, International Journal Production Economics 68 (2000) pp.29-42

introducendone però altre. Successivamente l'attenzione dei ricercatori si concentrò su altri paradigmi innovativi, che erano più efficaci nei contesti moderni. In particolare uno di questi consiste nell'Artificial Intelligence (AI): in particolare la teoria degli agenti autonomi, un prodotto dell'AI, è uno dei più interessanti campi di ricerca. L'evoluzione delle tecniche di pianificazione può essere divisa in quattro momenti: l'era dell'ottimizzazione, l'era euristica, l'era della complessità e l'era della programmazione interattiva.

L'era dell'ottimizzazione che può essere collocata temporalmente tra gli anni '70 e '80 è stata caratterizzata dalla Computer Integrated Manufacturing(CIM), la cui caratteristica era quella di essere organizzata in modo fortemente gerarchico, con un controllo top-down e una completa automazione del sistema di produzione. Questa tecnica non ottenne grande successo poiché la ricerca della completa automazione richiedeva molto tempo mentre il mercato richiedeva risposte estremamente veloci, la standardizzazione riduceva le possibilità dell'azienda di rispondere alle richieste di differenziazione ed oltretutto rappresentare il complesso sistema manifatturiero attraverso degli algoritmi risultava molto complesso. A fronte di tutte queste limitazioni ben presto si resero conto che questo metodo rappresentava una via poco percorribile, da qui ebbero l'idea di intraprendere un approccio opposto, quello euristico. Il paradigma euristico originò dalla necessità di superare le difficoltà del modellamento della realtà, offrendo uno strumento più efficiente e veloce, ed ebbe il suo massimo sviluppo negli anni '80. I principali vantaggi ottenuti consistevano nel fatto che il modello logico fosse più vicino a quello fisico e che il diagramma di flusso fosse costruito sulla base dell'esperienza dei progettisti. Le principali limitazioni erano rappresentate dalla staticità di questo metodo in contrasto con la rapida evoluzione del contesto in cui questo veniva utilizzato: regole e priorità erano fissate al momento della programmazione. Ulteriore limitazione consisteva nell'impossibilità di codificare il modo in cui far reagire il sistema a tutti i possibili guasti, ritardi o disturbi nella produzione che si potevano verificare. Queste caratteristiche proprie dell'era dell'ottimizzazione e dell'era dell'euristico, per la loro incapacità a reagire repentinamente alle mutazioni della domanda, vengono classificate sotto "Tecniche di dinamica semplice".

Dalla seconda metà degli anni '80 assistiamo alla nascita dell'era dell'intelligenza artificiale, che sembra essere la naturale risposta alle necessità di interpretare i complessi sistemi

manifatturieri. In questo periodo sono nate diverse tecniche: i sistemi esperti, le reti neurali, gli algoritmi genetici e le architetture ad agenti autonomi. Nei sistemi esperti la conoscenza dei programmatori viene inserita in una serie di regole di comportamento, ciascuna delle quali viene utilizzata quando alcuni eventi accadono ed esse sono continuamente aggiornate dal sistema, la difficoltà del codificare la conoscenza e la complessità del software hanno ridotto le possibili applicazioni di questa tipologia di algoritmo. Le reti neurali sono un particolare sistema esperto dove la conoscenza viene trasmessa in una pseudo-cerebrale architettura composta da neuroni e sinapsi. Il sistema riceve in ingresso dei segnali, il neurone vi applica una funzione di trasferimento (Fdt) e trasmette il segnale ai successivi neuroni. Per simulare la funzione di amplificazione o di inibizione del neurone reale si assegnano dei “pesi della connessione”, ovvero dei valori numerici che se positivi amplificano il segnale uscente dal neurone o viceversa lo inibiscono se negativi. Le limitazioni di questo sistema sono le stesse presenti nei sistemi esperti. Gli algoritmi genetici si basano su principi biologici del sistema evolutivo e possono essere catalogati come una particolare classe di euristico adattativo. Anche in questo caso le limitazioni sono simili a quelle delle reti neurali. Dalla fine degli anni '90 la ricerca ha focalizzato l'attenzione sulla teoria degli agenti autonomi per il controllo e la pianificazione della produzione. La particolarità di questa teoria viene riscontrata dal fatto che il processo decisionale viene distribuito tra entità autonome ed intelligenti (gli agenti autonomi), che lavorano insieme per raggiungere un obiettivo locale. L'obiettivo globale viene suddiviso in molti obiettivi locali e così facendo si riesce a superare i problemi di complessità, e incertezza (disturbi provenienti dall'ambiente di lavoro, o incertezza del lead time, etc). Le principali ragioni che portano a questo risultato possono essere riassunte in:

- coordinazione nel sistema di produzione ottenuto tramite l'intelligenza degli agenti
- distribuzione tra gli agenti della mole di dati da trattare
- il sistema non deve utilizzare una complessa funzione obiettivo globale
- i disturbi possono essere risolti tramite locali trattative tra gli agenti

L'implementazione di questa tecnica mostra un aumento delle performance dei sistemi produttivi come ad esempio la riduzione del Work In Progress, della media del time-in-progress, dei costi di produzione o del ritardo di produzione.

Negli anni '90 le limitazioni date dai paradigmi CIM hanno spinto i ricercatori verso lo studio di un sistema di produzione che avesse come punto di forza la semplicità. Si sviluppa il periodo della programmazione interattiva, che rappresenta la tipologia più semplice tra i sistemi di programmazione poiché la pianificazione non viene eseguita dalle macchine ma dai programmatori stessi, mentre il sistema verifica ad ogni passo la fattibilità delle decisioni prese.

3.3 Caratteristiche degli agenti autonomi

Sono state date molte definizioni di “agente” i cui concetti possono essere riassunti nei seguenti punti:

- *Un agente è un sistema, un insieme di elementi che hanno particolari relazioni tra di loro e con l'ambiente. Ciascun agente svolge una particolare funzione per gli altri agenti e questa funzione da le risorse per sopravvivere.*
- *Gli agenti autonomi sono sistemi indipendenti che sviluppano da soli le leggi e le strategie in base mediante le quali essi regolano il loro comportamento. Per poter sopravvivere gli agenti devono essere in grado di mutare i propri comportamenti per adattarsi alle dinamiche dell'ambiente in cui vivono.*
- *L'intelligenza è una proprietà degli agenti autonomi che permette loro di interpretare la realtà costruendo una rappresentazione di essa. La capacità di adattarsi velocemente alle dinamiche dell'ambiente è una delle caratteristiche più distintive di un sistema intelligente.*

Per quanto riguarda i Multi Agent System (MAS) possiamo utilizzare la definizione di O'Hare and Jennings, [O'Hare and Jennings,1996] “Una rete di solutori di problemi che lavorano insieme per risolvere problemi che sono oltre le loro individuali capacità. L'interesse crescente nei confronti degli MAS è da ricercare nei vantaggi riscontrati:

- Risolve problemi che potrebbero essere troppo grandi per un sistema centralizzato
- Permette la interconnessione tra diversi sistemi esistenti
- Fornisce soluzioni di problemi con una distribuzione propria

L'innovazione dell' approccio e quindi quello di sfruttare entità che sono autonome e intelligenti atte a trovare regole per modificare se stesse, utilizzando informazioni trovate localmente, per raggiungere una soluzione globale.

Risulta inoltre importante sottolineare l'importanza della comunicazione tra gli agenti poiché essa è una sorta di negoziazione: "la negoziazione è il processo di comunicazione di un gruppo di agenti per poter raggiungere un accordo reciprocamente accettato in merito ad un argomento". In generale la strategia inizia con la proposta di qualche agente, la quale viene valutata dagli altri e il ciclo di negoziazione riprende con una nuova proposta considerando le nuove informazioni.

3.4 Il paradigma dell'Ant Colony

L'uomo è sempre stato molto affascinato dal mondo naturale che lo circonda e l'osservazione dello stesso lo ha portato a realizzare e migliorare molte delle sue invenzioni. La Natura, per fare un esempio su tutti, ha ispirato in tempi remoti Leonardo con la "macchina volante"(fig.7) e più recentemente i fratelli Wright con il "flyer", la realizzazione di un mezzo di trasporto che ora risulta fondamentale per la nostra società, l'aereo.

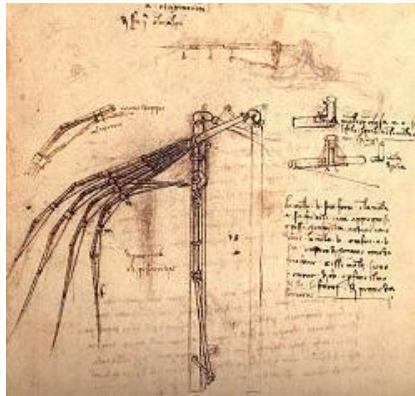


fig. 7

Osservando il mondo degli insetti grande interesse destò, agli inizi degli anni '90, il sistema di organizzazione delle colonie delle formiche. Questi insetti sono tra le specie più popolose sulla terra oggi, ne si stima una popolazione di 10^{16} individui [Wilson 94]. La comunità che studia l'Intelligenza Artificiale (AI) considera l'ant algorithm (algoritmo delle formiche) sotto una categoria denominata *swarm intelligence*, che considera i sistemi di implementazione multi-agente intelligenti, che si basano sul comportamento reale degli insetti, uno strumento per risolvere problemi.

Il paradigma naturale dell'ant system venne proposto per la prima volta da Dorigo [Dorigo, 1996] per risolvere problemi di ottimizzazione combinatoria statistica utilizzando un algoritmo che sfrutta l'analogia con le società di insetti organizzate in colonie. Le caratteristiche che emersero fin dalle prime applicazioni furono:

- Un'architettura distribuita per evitare premature convergenze su ottimi locali
- Un feed back positivo che porta rapidamente nella direzione di miglioramento più promettente
- La capacità di questo algoritmo di individuare delle buone soluzioni fin dalle prime fasi del processo.

Le successive sperimentazioni portarono alla luce altre importanti caratteristiche che sottolineano in quali ambiti l'Ant System ottenga le maggiori performance. Le più importanti sono:

-la sua *versatilità*, ovvero l'applicabilità a simili versioni dello stesso problema, per esempio c'è una chiara estensione dal traveling salesman problem TSP, all'asimmetrico traveling salesman problem ATSP.

-la sua *robustezza* dimostrata dalla possibilità di utilizzare l'algoritmo in altri problemi di ottimizzazione quali il quadratic assignment problem (QAP) e il job-shop scheduling problem (JSP) con delle piccole variazioni

-sistema costruito da una popolazione di organismi elementari che garantisce la parallelizzazione delle attività di elaborazione.

Tutte le qualità descritte rappresentano indubbiamente un vantaggio, ma probabilmente le prestazioni raggiunte in ogni singola situazione saranno superate da algoritmi costruiti specificatamente per quel tipo di problemi. Le attività di ricerca sono distribuite tra degli agenti, che noi chiamiamo formiche, che hanno delle capacità molto limitate e che riproducono il comportamento degli insetti reali. Questi agenti software sono infatti in grado di individuare la strada più breve tra due punti, così come le formiche sono altamente efficaci nel trovare la strada più corta che congiunge il formicaio alla fonte di cibo. Questa caratteristica degli insetti risulta essere alquanto sorprendente in quanto miopi, dotati di scarsa memoria e scarsa consapevolezza dell'ambiente che le circonda. Risulta quindi immediato chiedersi come queste piccole creature siano in grado di fare ciò. Il modo di comunicare tra questi insetti racchiude in sé il segreto di questa loro innata dote organizzativa.

Gli studi evidenziarono come le formiche avessero l'olfatto molto sviluppato e come utilizzassero questo senso per comunicare tra di loro. La particolare forma di comunicazione indiretta utilizzata dagli insetti per coordinare le loro attività venne definita *stigmergy*. Il primo a introdurre questo termine fu Grassè che descrisse una forma di comunicazione indiretta mediante la mutazione dell'ambiente che egli osservò in due specie di termiti, e la sua

definizione di stigmergy fu: “Stimolazione dei lavoratori dalle prestazioni che hanno raggiunto”[Grassè,1956].

Venne scoperto che il metodo utilizzato dalle formiche per comunicare quale cammino si dovesse intraprendere, consisteva in una scia di feromone: una sostanza chimica distinguibile da ogni formica che provoca reazioni chimiche modificando il comportamento dell’insetto. Una formica muovendosi lascia del feromone sul suolo e così facendo “segna” il territorio. Se un’altra formica incrocia questa scia di feromone viene, con alta probabilità, indotta a seguirla incrementando a sua volta la quantità di feromone di quella scia. Analizzando la vita di una colonia di formiche alla ricerca di cibo si evidenzia come le formiche partano in ordine sparso in tutte le direzioni arrivando poi ad un comportamento autocatalitico verso un’unica direzione, poichè maggiore sarà il numero delle formiche che percorrono il tratto maggiore sarà la sua attrattività.

Se ipotizziamo che la fonte di cibo si trovi in un’unica direzione rispetto al formicaio, le formiche che ne seguiranno altre correranno il rischio di perdersi, di essere catturate dai predatori o di morire di fame. Se la fonte di cibo si dovesse trovare nelle vicinanze del formicaio sarà altamente probabile che ogni formica che esplora il terreno riesca prima o poi a trovarla. Tutte le formiche che oltre a trovare il cibo riusciranno a rientrare nel formicaio, garantiranno il ritorno anche a quelle compagne che per caso incroceranno la loro striscia di feromone, mentre l’evaporazione della sostanza eviterà che altre formiche seguano percorsi conducenti a fonti di cibo esaurite o in direzioni errate. Le formiche che usciranno per la prima volta dal formicaio si troveranno di fronte ad una scia già marcata che le condurrà al cibo e se la fonte non sarà esaurita marcheranno a loro volta la scia. Le formiche che muovendosi casualmente incontreranno la traccia di feromone, riusciranno a capire in che direzione muoversi per raggiungere il cibo o il formicaio. Le formiche, pur essendo fortemente attratte dal feromone mantengono comunque una tendenza a muoversi in modo casuale, e ciò permette loro di continuare l’esplorazione del territorio alla ricerca della via più breve, e nel caso dovessero trovare un buon percorso altre formiche saranno maggiormente attratte dal feromone rilasciato su quest’ultimo e l’evaporazione della scia del vecchio percorso aiuterà il processo autocatalitico. In fig.8 viene rappresentato il problema appena descritto.

Nell'immagine a) siamo di fronte ad un gruppo di formiche reali dirette verso una fonte di cibo, le quali hanno individuato nella linea tratteggiata la via più agevole tra il nido (nest) e il cibo (food). Viene posto un ostacolo sul percorso per interrompere il flusso di formiche, avendo cura di lasciare alle formiche due percorsi di lunghezza differente per riprendere la via tratteggiata.

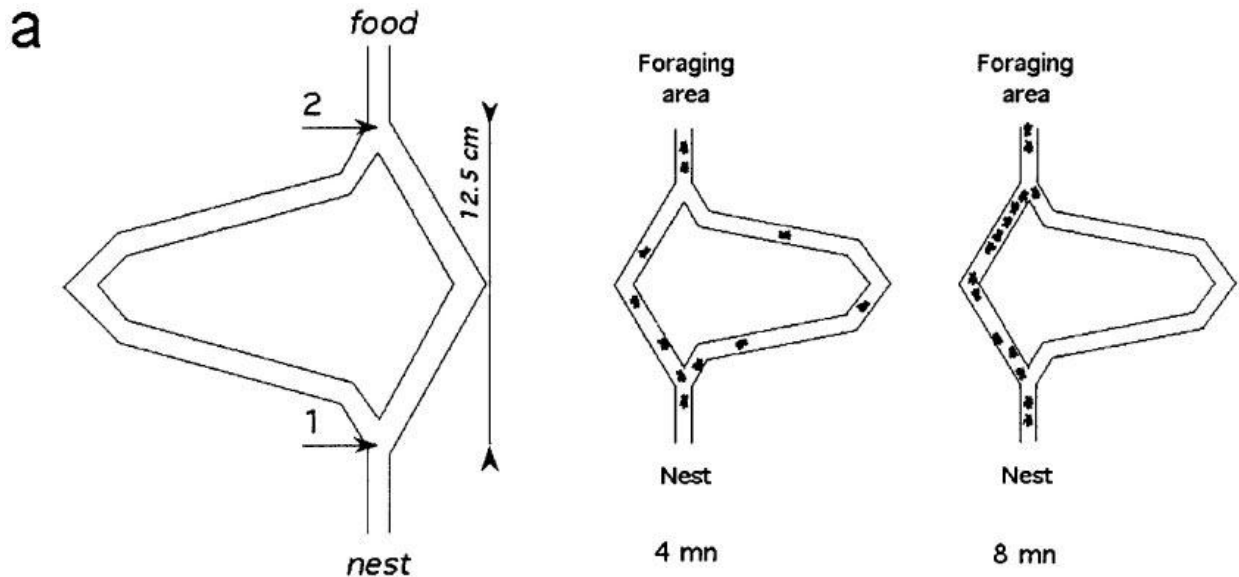


fig. 8

A questo punto le formiche quando arriveranno nel punto 1 dovranno scegliere se superare l'ostacolo passando da destra o da sinistra inquanto sul terreno non è presente nessuna scia di feromone. Le formiche che sceglieranno il percorso destro, essendo più corto, giungeranno prima al punto 2 e quindi alla fonte di cibo, rispetto a quelle che sceglieranno il percorso sinistro. Al ritorno esse saranno fortemente stimolato dal loro stesso feromone a seguire la via intrapresa all'andata rinforzando ulteriormente la traccia sul terreno.

A questo punto anche le nuove formiche provenienti dal nido saranno portate a seguire la traccia di feromone del percorso più breve che va via via intensificandosi. La scia che supera da sinistra l'ostacolo col passare del tempo evapora, e non venendo alimentata più dal passaggio di altre formiche a poco a poco svanisce.

Il comportamento delle formiche reali ha ispirato l'ant system, un algoritmo in cui formiche artificiali cooperano alla soluzione di un problema attraverso lo scambio di informazioni

attraverso il feromone rilasciato sul grafico. L'algoritmo che verrà in seguito presentato deriva strettamente dallo studio del comportamento delle formiche reali, ma l'uso di insetti artificiali come strumento di ottimizzazione evidenzia delle differenze rispetto alle prime:

- vengono dotate di memoria
- non sono completamente cieche
- vivono in un ambiente che è discreto rispetto al tempo.

In un modello iterativo, ciascuna formica si muove dallo stato S_i allo stato S_j guidato da due principali fattori:

1. un informazione euristica: indica una preferenza per lo spostamento dallo stato S_i allo stato S_j , è un'informazione conosciuta a priori rispetto al lancio dell'algoritmo e non viene modificata durante la sua elaborazione.
2. Traccia di feromone artificiale: misura del feromone depositato dalle formiche nelle precedenti transizioni dallo stato S_i allo stato S_j . E' un informazione che muta durante l'elaborazione.

Analizzando dettagliatamente quelle che sono le principali proprietà delle formiche artificiali osserviamo che:

- Ciascuna formica ha una memoria interna che è usata per immagazzinare il percorso seguito dalla stessa
- Partendo da uno stato iniziale denominato $S_{iniziale}$ ciascuna formica tenta di costruire una soluzione fattibile per il problema in esame, muovendosi in un modello iterativo attraverso il suo ambiente di ricerca
- I fattori che guidano i movimenti di ricerca delle formiche sono costituiti da delle regole di transizione che sono applicate prima di ogni spostamento tra gli stati S_i e S_j .
- L'ammontare di feromone che ogni formica rilascia sul percorso è gestito da una specifica regola di aggiornamento.

- La deposizione di feromone può avvenire anche durante la costruzione della soluzione, si ha un aggiornamento *online step-by-step pheromone trial update*.
- La deposizione del feromone può avvenire a soluzione individuata, viene indicata come *online delayed pheromone update*.

3.5 Gli algoritmi e le loro versioni

3.5.1 L'Ant Colony³

L'Ant System è stato inizialmente implementato per risolvere problemi TSP (Traveling Salesman Problem, commesso viaggiatore), ovvero la rappresentazione mediante un grafo di nodi connessi da archi del problema, dove la lunghezza di quest'ultimi rappresenta la distanza tra le città che il commesso viaggiatore deve visitare. Ciascuna formica è costituita da un agente autonomo le cui regole d'azione sono:

³ Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A., *Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*, IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics, **26** n°1 (1996)

- Scelta del nodo destinazione con una probabilità direttamente proporzionale alla quantità di feromone presente sull'arco che porta al nodo destinazione e inversamente proporzionale alla distanza.
- Ogni formica viene dotata di una "Tabu List" nella quale sono indicati i nodi già visitati affinché essa non li scelga una seconda volta.
- La deposizione del feromone sugli archi avviene una volta terminato il percorso.

La modellazione prevede la presenza di m formiche distribuite sul grafico costituito da n nodi. Nell'eseguire l'algoritmo si sviluppano delle iterazioni, ovvero gli spostamenti lungo un arco di tutte le formiche, ottenendo quindi un ciclo dopo n iterazioni. È fondamentale osservare che a differenza di quanto accade per le formiche reali, gli insetti virtuali non si muovono a velocità costante, ma si muovono in uno spazio temporale discreto, percorrendo un arco ad ogni iterazione indipendentemente dalla sua lunghezza. Per ottenere che l'upgrade del feromone avvenga in modo corretto arricchendo soprattutto i percorsi più brevi, la discretizzazione del tempo richiede che la quantità di feromone deposta su ogni arco sia inversamente proporzionale alla lunghezza dello stesso. Per poter rappresentare in modo fedele l'ambiente reale è necessario introdurre anche l'effetto dell'evaporazione del feromone, il che inoltre garantisce una minore precoce convergenza verso una soluzione. Alla fine di ogni ciclo, prima di distribuire il feromone, la quantità presente su ogni arco viene decrementata moltiplicandola per un fattore $\rho < 1$ il quale ha il compito di simulare l'effetto dell'evaporazione. Per poter ampliare la possibilità di ricerca delle formiche e cercare di evitare il più possibile il raggiungimento di ottimi locali, all'inizio dell'elaborazione le formiche vengono poste in ordine casuale su ogni nodo e viene dato un valore iniziale di feromone ad ogni arco. Risulta quindi fondamentale definire quelle che sono le regole che gestiscono le decisioni attuate da ogni singolo agente autonomo. Il comportamento delle formiche e il mutamento dell'ambiente in cui esse si muovono viene gestito da due principali equazioni, la prima la "*Probability Transition*" gestisce la probabilità con la quale un agente dal punto i si sposti nel successivo punto j , e "*The Pheromone upgrade*" ovvero di quanto si modifica il valore di feromone sul terreno, il quale come detto porta ad un comportamento autocatalitico e permette lo stigmergy. La letteratura ha messo in evidenza come dalla nascita l'ant colony

abbia subito delle modifiche nelle sue formulazioni di base per cercare di ottimizzare sempre di più i risultati.

Le formulazioni iniziali che Dorigo sviluppò all'inizio degli anni 90' sono di seguito riportate.

Probability Transition



Rappresenta la probabilità che la k -esima formica all'istante t passi da i a j . Il simbolo τ rappresenta il valore di feromone sull'arco i - j che si sta analizzando, mentre μ rappresenta il valore euristico, che nel caso del TSP è riferito alla distanza e vale $1/d_{ij}$. I valori α e β rappresentano dei pesi che noi diamo arbitrariamente per rendere più o meno significativo il valore del feromone rispetto al valore euristico. Al denominatore della prima condizione è presente una sommatoria su A , il quale rappresenta l'insieme di città ancora da visitare. Si nota inoltre la condizione posta su j di appartenenza all'insieme A , il che evita il passaggio del commesso viaggiatore per due volte nella stessa città, o nel caso di un problema di produzione, la doppia produzione dello stesso prodotto. La probabilità di ripassare in una città già visitata risulta quindi uguale a 0.

The Pheromone Upgrade

Per poter rappresentare al meglio una condizione naturale si deve prestare molta attenzione alla sue sfaccettature e il termine ρ ne è un esempio, esso rappresenta infatti la persistenza della sostanza chimica e possiamo pensarla a $(1 - \rho)$ come l'evaporazione della scia del feromone. Col passare del tempo infatti l'evaporazione della scia chimica eviterà che dei percorsi poco performanti per la nostra soluzione non vengano più presi in considerazione dalle formiche, dando loro la possibilità di concentrarsi sui percorsi più promettenti. Ad ogni passo quindi il valore di feromone viene moltiplicato per ρ i cui valori sono compresi tra 0 e 1. La sommatoria presente, indica la quantità per unità di lunghezza del percorso di sostanza lasciata sull'arco ij dalla k -esima formica durante l'ultima iterazione. Poichè, come precedentemente detto, noi lavoriamo in un ambiente discreto e non continuo come è nella realtà si deve tenere in considerazione il fatto che se un percorso è più breve, nella realtà le formiche impiegheranno meno tempo a percorrerlo, ma in un ambiente ricostruito ciò non è vero. Per poter simulare ciò la prima versione dell'ant system utilizza la seguente regola.

—

Una quantità fissa Q di feromone viene quindi suddivisa su tutta la lunghezza di ogni soluzione trovata. Mediante l'applicazione di questo metodo, gli archi appartenenti ai percorsi più lunghi riceveranno meno feromone rispetto a quelli appartenenti alle soluzioni migliori. Questa metodologia viene definita da Dorigo *ant-quantity*.

3.5.2 L'Ant Colony System

L'Ant Colony System, ACS, venne sviluppato da Dorigo in collaborazione con Gambardella a metà degli anni 90'. Questo metodo differisce da quello base per tre principali motivi:

- i) Lo studio della probabilità di transizione da un nodo all'altro provvede ad un bilanciamento tra l'esplorazione di nuovi archi e la ricerca veloce di una soluzione ottimale.
- ii) L'aggiornamento del feromone viene effettuato solo sul percorso rappresentante la migliore soluzione dell'iterazione considerata.
- iii) Mentre le formiche costruiscono la soluzione viene effettuato un upgrade locale oltre che quello globale a fine iterazione.

Utilizzando questo metodo le m formiche sono posizionate in modo random sulle n città, da qui ciascuna crea la propria soluzione applicando la probability transition, che ha delle differenze peculiari rispetto a quella base. Mentre costruisce la soluzione la formica modifica l'ammontare del feromone sugli archi visitati applicando l'upgrade locale di feromone. Una volta che tutte le formiche hanno concluso il proprio tour, viene nuovamente modificato il valore di feromone presente sugli archi mediante l'upgrade globale.

Probability Transition

Viene introdotta una nuova variabile, il valore q . Ad esso viene assegnato un valore compreso tra 0 ed 1. Durante l'esecuzione dell'algoritmo ad ogni scelta che la formica deve effettuare viene generato, in modo random, un valore q_0 tramite il quale si decide quale delle probabilità sotto espresse si deve utilizzare.

Se $q < q_0$

Altrimenti se $q > q_0$

Questa metodologia viene chiamata dai suoi scopritori Pseudo Random Probability Rule, nella quale tutti i fattori sono esattamente gli stessi già spiegati precedentemente. Anche in questo caso vengono in generale favoriti quei percorsi che presentano una via più breve. Se come detto, α e β rappresentano dei pesi per determinare l'importanza che vogliamo dare al feromone piuttosto che al valore euristico, il valore di q determina il prevalere di una ricerca volta all'esplorazione piuttosto che all'utilizzo.

The Pheromone Upgrade

Durante il percorso le formiche effettuano un aggiornamento locale che segue la relazione:

Il valore di α rappresenta il fattore di decadimento che ha valori compresi tra 0 e 1. L'elemento τ_0 rappresenta il valore del feromone iniziale, scelta che viene definita la migliore da Dorigo e Gambardella nel loro lavoro. L'aggiornamento globale del feromone da attuare una volta che tutte le formiche hanno finito il loro tour è data da:

Importante osservare come con questo metodo solamente gli archi che appartengono alla soluzione migliore trovata in quella iterazione ricevono la parte $\Delta\tau$ dell'aggiornamento di feromone. Il valore di Q in questo caso ha valore di 1.

3.5.3 Max Min Ant System

La ricerca applicata mediante Ant Colony ha mostrato che si può ottenere un aumento delle prestazioni mediante un forte utilizzo della migliore soluzione trovata durante la ricerca. Per poter ottenere le migliori soluzioni possibili oltre ad un forte utilizzo della migliore soluzione si deve cercare di evitare una prematura convergenza delle soluzioni arrivando quindi precocemente in una situazione di stagnazione. L'algoritmo Max Min Ant System è stato specificatamente sviluppato per poter raggiungere questi obiettivi. Le principali differenze riscontrabili tra il metodo MMAS e AS sono le seguenti:

- i. Sfruttare la migliore soluzione trovata durante un iterazione o durante il funzionamento dell'algoritmo, dopo ogni iterazione solo una singola formica aggiungerà il feromone al suo percorso. Questa formica potrà essere quella che ha trovato la migliore soluzione durante l'ultima iterazione, *iteration-best*, oppure la formica che ha trovato la migliore soluzione tra tutte le iterazioni fino a quel momento effettuate.
- ii. Per evitare la stagnazione della ricerca, il range dei valori di feromone ottenibile su ogni arco viene limitato tra τ_{lim} e τ_{max} .
- iii. Il valore di feromone iniziale viene impostato pari a τ_{max} , ottenendo in questo modo una più alta esplorazione delle soluzioni.

Probability Transition

Il metodo MMAS sfrutta le stesse equazioni dell' AS ovvero:

La particolarità di questo metodo sta nei valori che il termine τ può assumere. Come verrà poi esplicitato dalla formula relativa all'aggiornamento del feromone, τ deve mantenersi tra un valore max e uno min.

Il valore di τ_{max} è dato dalla seguente equazione:

$$\tau_{max} = \frac{1}{p_{dec}}$$

Il valore di τ_{min} dipende da τ_{max} , dal numero di città da visitare n , e da p_{dec} . Quest'ultimo valore viene calcolato effettuando una radice n -esima di p_{best} , ovvero della probabilità che una volta raggiunta la convergenza la formica abbia trovato la soluzione migliore.

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max}}{n^{p_{best}}}$$

Le analisi effettuate da Stützle e Hoos indicano che le soluzioni migliori si trovano per valori di p_{best} pari a 0,005.

The Pheromone Upgrade

L'equazione è data da:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$$

in cui sono ben evidenti i limiti caratteristici di questa metodologia. In questa metodologia l'unica formica che può aggiornare il feromone a fine iterazione è quella che ha trovato la soluzione migliore nell'ultimo run. Con le condizioni indicate nella prima parentesi grafa si vincola il valore del feromone tra i due limiti trovati. Risulta molto importante inizializzare il sistema applicando del feromone su ogni arco del sistema, la cui quantità deve essere pari a τ_{max} . Questa scelta deriva dalla necessità di estremizzare il più possibile l'esplorazione di tutte le possibili soluzioni. Impostando un valore di feromone elevato sugli archi alla prima iterazione, ognuno di questi avrà la stessa probabilità di essere scelto. Col passare delle iterazioni alcuni archi verranno percorsi meno di altri, ma la soluzione adottata all'inizio permette che il divario tra i valori degli archi con maggiore feromone e quelli che ne hanno meno non sia troppo elevato e che quindi quest'ultimi non vengano troppo penalizzati. Questa operazione permette quindi di aumentare l'esplorazione del grafico.

3.5.4 Ant System rank

L'Ant System rank sfrutta ed estende l'idea di effettuare una selezione tra le formiche e di creare un gruppo di formiche elitarie. La strategia elitaria nel contesto dell'ant system si prefigge l'obiettivo di dare un'enfasi più marcata ai migliori percorsi trovati fino a quel momento dopo ogni iterazione. L'effetto di enfaticizzazione dei percorsi più brevi diminuisce però quando la lunghezza degli stessi diminuisce e soprattutto quando molte formiche attraversano un buon percorso, ma di qualità sub-ottimale. Per cercare di superare questo problema è stato studiato il metodo *rank*. Questo metodo ordina tutte le m formiche in base alla lunghezza del percorso da loro trovato ($L_1 < L_2 < \dots < L_m$), e il contributo di ognuna di esse risulta essere pesato in accordo con il rango μ della formica. Oltre a ciò solo un numero ω tra le migliori formiche viene considerato, cosicché viene evitata la possibilità di enfaticizzare più del necessario dei percorsi sub-ottimali. Viene imposto un peso σ al livello del percorso

appartenente alla migliore soluzione trovata fino a quel momento, valore che non deve essere superato da nessun altro.

Probability Transition

Questo metodo non presenta differenze con il metodo AS per cui si ha:

dove tutti i parametri presenti sono gli stessi presentati precedentemente.

The Pheromone Upgrade

Dove

e

e

In cui si osserva come nella legge di upgrade sia presente un fattore riferito alla selezione elitaria delle formiche che quello riferito al rango della soluzione . Le sperimentazioni dimostrano che questa procedura porta a un buon bilanciamento tra l'esplorazione delle possibili soluzioni e l'utilizzazione.

CAPITOLO 4

4.1 La Sperimentazione

In questo capitolo vengono mostrati i criteri con cui è stata realizzata la struttura della campagna prove, il dominio dei valori attribuiti alle variabili applicate nell'algoritmo descritto in precedenza.

Nel capitolo 4.1 viene descritta la struttura della campagna prove, le tipologie delle distinte base utilizzate e le caratteristiche delle domande di prodotti finiti. Nel capitolo 4.2 viene descritto l'indice di prestazione utilizzato per l'analisi dell'algoritmo e la valutazione delle sue performance. Nel capitolo 4.3 vengono descritte altre possibili funzioni obiettivo perseguibili utilizzando l'algoritmo, in alternativa a quella utilizzata.

4.1.1 Il Dominio delle prove

I dati utilizzati per la campagna prove di questo lavoro sono gli stessi utilizzati in [Massè97], con i cui risultati verrà poi effettuato un confronto per definire le caratteristiche dei due diversi algoritmi utilizzati. Nei capitoli successivi vengono sottolineate le diverse variabili protagoniste dello studio oltre che una rappresentazione grafica per meglio comprendere l'intera sperimentazione.

4.1.2 La composizione del prodotto finito

Vi sono due caratteristiche per la definizione della distinta base del prodotto da schedare: il GRADO DI COMUNANZA e la COMPLESSITÀ.

Il grado di comunanza descrive la presenza di ogni parte i al livello j della distinta base in ogni parte i al livello $j-1$. La convenzione utilizzata è stata espressa come “**1:tutti**” se la parte i al livello j è presente in tutte le parti i a livello $j-1$, e dalla sigla “**1:2**” se la presenza della parte i è pari solo al 50 % nelle parti a livello $j-1$. Importante sottolineare come la struttura del pezzo sia divisa in tre livelli per comprendere meglio la caratteristica appena descritta. I livelli sono in ordine crescente: Prodotto finito, Sottoassieme, Componente. Si ha quindi un grado di comunanza che esprime quindi la presenza dei sottoassiemi nei prodotti finiti e un grado di comunanza tra i componenti e sottoassiemi. Un esempio di grado di comunanza viene quindi ad esempio espressa dalla sigla “**1:2/1:tutti**”, indicando quindi che solo il 50% dei sottoassiemi fa parte dei prodotti finiti e che ogni componente è presente in ogni sottoassieme.

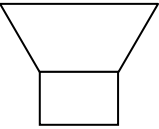
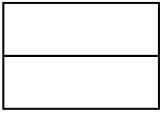
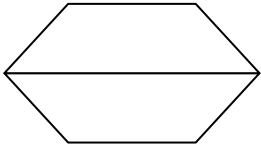
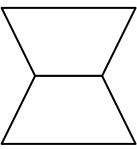
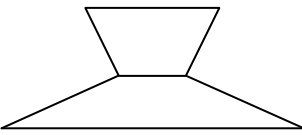
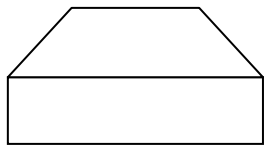
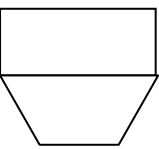
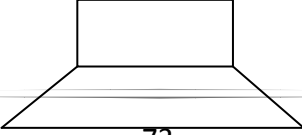
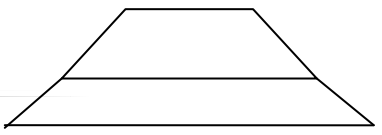
La tabella 3 esprime tutte le quattro combinazioni presenti nella campagna prove realizzata relative al grado di comunanza.

		Componenti nei sottoassiemi	
		1:2	1:tutti
Sottoassiemi nei prodotti finiti	1:2	1:2/1:2	1:2/1:tutti
	1:tutti	1:tutti/1:2	1:tutti/1:tutti

Tabella 3

La complessità della distinta base definisce la struttura del prodotto indicando il numero di parti presenti in ciascuno dei tre livelli che costituiscono la stessa. La convenzione utilizzata per fornire questa informazione è del tipo “6/3/12” che indica la presenza di 6 tipologie di prodotti finiti, 3 tipologie di sottoassiemi e 12 tipi di componenti. In questa campagna prove il numero di tipologie di prodotti viene mantenuto costante e pari a 6 mentre i sottoassiemi compaiono con numerosità pari a 3,6,12 ed i componenti 3,6,12,18.

L’insieme delle combinazioni delle diverse numerosità dei tre livelli porta a nove configurazioni diverse di distinta base che vengono riassunte nella tabella 4. Questo insieme di configurazioni si ritiene possa essere esaustivo per poter testare in modo efficace l’algoritmo: considerando sia il grado di comunanza che le tipologie di distinta base si ha un totale di 36 tipologie che verranno poi combinate con 4 tipologie di domanda.

		
6/3/3	6/6/6	6/12/6
		
6/3/6	6/3/12	6/12/12
		

6/6/3	6/6/12	6/12/18

Tabella 4

4.1.3 Le diverse tipologie di domanda

In questo lavoro sono state affrontate 4 tipologie di domanda per poter confrontare adeguatamente i dati con il modello di riferimento. La differenza tra le diverse domande è costituita dalla **Polarizzazione** delle stesse. La polarizzazione indica su quanti dei, nel nostro caso 6, tipi di prodotto finito, si ha una maggiore concentrazione della domanda, che è costantemente formata da 49 pezzi.

I 4 gradi di polarizzazione sono i seguenti:

1= Domanda Uniforme

2=Domanda polarizzata su 3 pezzi

3=Domanda polarizzata su 2 pezzi

4=Domanda polarizzata su 1 pezzo

La polarizzazione rappresenta oltre i già indicati gradi di comunanza e complessità la terza variabile considerata per definire lo spazio delle prove.

Nello specifico le 4 domande utilizzate sono così costituite[Massè,1998]:

Domanda uniforme: {8,7,9,6,9,10}

Domanda polarizzata su 3 pezzi: {13,11,12,4,5,4}

Domanda polarizzata su 2 pezzi: {17,16,5,3,4,4}

Domanda polarizzata su 1 pezzo: {30,3,5,2,5,4}

Osservando le quattro tipologie di domanda si nota il crescente sbilanciamento verso il primo prodotto e come la domanda si mantenga costante di 49 pezzi.

Per dare una spiegazione grafica che possa far meglio comprendere l'intera campagna si rimanda alla fig. 9, in cui si possono osservare le diverse combinazioni delle tre variabili appena descritte. Ogni punto di incrocio rappresenta in realtà non un solo valore ma bensì 6, poichè per ognuno di queste combinazioni sono stati sperimentati 3 diversi valori di Rho e 2 di Beta, il cui significati sono stati presentati nelle formule del capitolo 3.5.3.

Dalla'analisi della letteratura si è evinto come i parametri Rho e Beta siano fondamentali per determinare la probabilità con cui l'agente autonomo "formica" decida di proseguire verso una o l'altr prodotto. Seguendo gli esempi trovati in letteratura si è deciso di intraprendere la sperimentazione di 3 diversi livelli per il valore di Rho, ovvero del tasso di evaporazione, e di 2 livelli per Beta, il coefficiente atto a pesare la distanza tra due punti, come esplicito nella probability transition.

Rho \ Beta	0,7	0,8	0,9
2	Beta=2-Rho=0,7	Beta=2-Rho=0,8	Beta=2-Rho=0,9
5	Beta=5-Rho=0,7	Beta=5-Rho=0,8	Beta=5-Rho=0,9

Osservando la Probability transition del paragrafo 3.5.3 si osserva come sia presente anche il parametro Alfa, esponente del valore di feromone presente sul tratto da percorrere, posto in questa sperimentazione sempre pari a 1. Per ogni esperimento sono state effettuate 3 ripetizioni, scelta determinata dall'onerosità del tempo necessario per l'intera campagna prove.

Il conteggio totale della campagna prove risulta quindi essere:

4 tipologie di domanda* 4 gradi di comunanza* 9 gradi di complessità* 3 valori di Rho* 2 valori di Beta= 864 prove

Effettuando 3 ripetizioni il numero complessivo dei run è stato di **2592** ($864 \cdot 3$). La durata di ogni run è strettamente dipendente dalla complessità della Distinta Base da analizzare e varia da 30 a 48 minuti, partendo dalla distinta 633 per arrivare alla 61218. Considerando quindi una durata media di 40 minuti per ogni run, l'intera campagna prove ha richiesto circa **1728** ore di simulazione effettiva. Ogni run di simulazione è stato interrotto dopo 1000 iterazioni, considerando tale valore un limite ampio per il raggiungimento della convergenza.

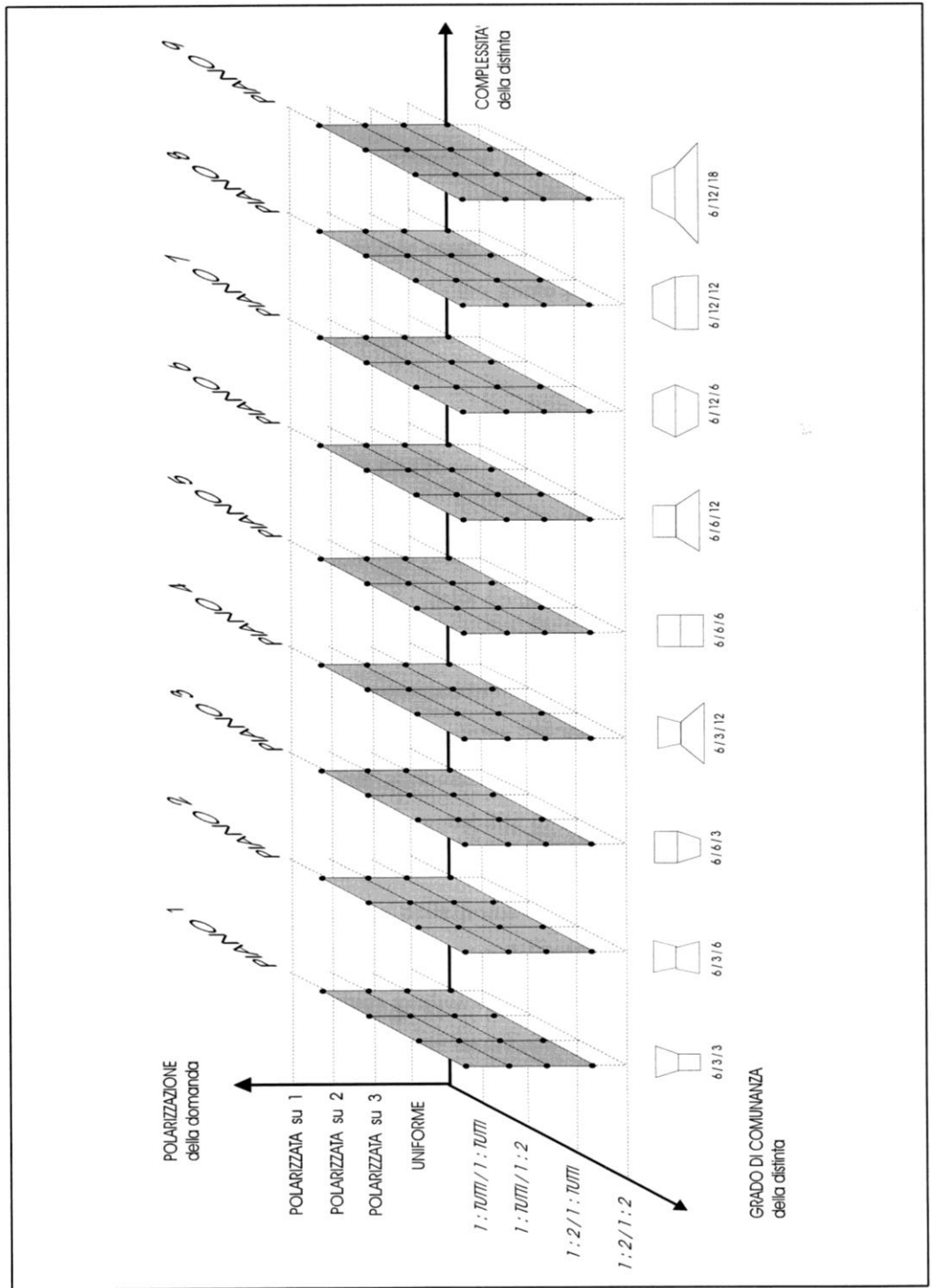


fig. 9

4.2 La funzione obiettivo

Come viene sottolineato da [Saracino 97], vi sono diverse funzioni obiettivo perseguibili nella risoluzione del sequenziamento delle linee di montaggio a modelli misti, di cui ne riporto le più importanti.

La prima funzione obiettivo evidenziata corrisponde a quella utilizzata nel presente lavoro .

Minimizzazione della deviazione rispetto ad una schedazione ideale

La Funzione Obiettivo da minimizzare viene definita come SDQ (Square Deviation Quantity) il cui calcolo viene definito dalla formula seguente:

—

Dove:

j = livello della distinta 1=prodotto finito 2=sottoinsieme 3=componente

k = passo della schedazione $k=1,2,\dots,DT$

DT = orizzonte schedazione

n_j = numero di parti a livello j della distinta

$x_{i,j,k}$ = numero cumulato di parti i a livello j schedate fino al passo k

$d_{i,j}$ = domanda complessiva della parte i a livello j

DT_j = numero complessivo di parti i a livello j

w_i = peso attribuito alla parte i (in questo lavoro pari a 1).

Viene quindi minimizzato lo scarto quadratico medio tra il valore corrispondente al consumo reale () e il consumo ideale (—), calcolato su tutte le parti dei livelli, dei sottoassiemi e dei componenti. Il compito del peso w_i è quello di evidenziare la criticità di consumo di particolari componenti, tanto più è critico il consumo della i -esima parte maggiore sarà il suo valore. Nel presente lavoro non sono state effettuate graduatorie di criticità tra i componenti così da imporre il valore 1 a tale parametro. In molti dei grafici che verranno presentati in seguito, saranno evidenziate delle differenze percentuali tra vari parametri, nelle rappresentazioni verranno indicati gli scostamenti dei valori di SDQ in funzione ad esempio del Rho considerato o del paragone tra MMAS e ACO. La regola utilizzata per ottenere questi risultati è data da:

Livellamento del carico di lavoro su ogni stazione della linea

Questa funzione obiettivo si prefigge il compito di minimizzare la probabilità di mancato completamento, il che può verificarsi ad esempio se un operaio non riuscisse a completare le operazioni previste dal ciclo di lavorazione, all'interno dei limiti dell'area in cui deve operare. Questa situazione può verificarsi nel momento in cui ad una stazione venisse assegnato un carico di lavoro superiore rispetto a tutte le altre, la quale sarà quindi costretta ad esaurire la mole di lavoro creatasi rischiando di non riuscire a completare i prodotti schedulati. Il carico di lavoro di ogni stazione può essere controllato tramite il sequenziamento dei prodotti finiti da assemblare, con l'accortezza di non porre in sequenza prodotti che vadano a sovraccaricare le stazioni, ottenendo quindi un distribuzione livellata delle operazioni sulla linea.

Minimizzazione della lunghezza totale della linea

L'obiettivo è da considerarsi perseguibile se sia il numero degli operatori che il numero di stazioni che compongono la linea sono modificabili nel breve periodo, seguendo quelle politiche tipiche di un gestione JIT orientata alla flessibilità operativa della linea descritte in precedenza e alla flessibilità della manodopera identificata con il termine giapponese "shojinka". Se queste operazioni non fossero possibili l'obiettivo si traduce in una minimizzazione del massimo spostamento a valle di ciascun operatore della linea che corrisponde alla minimizzazione della probabilità di mancato completamento delle operazioni svolte da ciascun operatore.

Minimizzazione del makespan

Il Makespan corrisponde per le linee di assemblaggio al tempo necessario per assemblare il mix corrispondente al Minimum Part Set (MPS), definito come:

—

Dove:

$DT = (d_1, d_2, \dots, d_{n1})$ = vettore delle domande di ciascun prodotto finito

q = massimo comun divisore degli elementi di DT

Individuata la sequenza che minimizza il tempo per assemblare il MPS, basterà ripeterla q volte. La minimizzazione del makespan corrisponde alla minimizzazione dell'istante di inizio lavorazione della prima unità da parte dell'operatore dell'ultima stazione.

Ottimizzazione dell'utilizzo degli operatori

La minimizzazione del costo totale delle inefficienze provocate da uno scorretto sequenziamento dei modelli sulla linea corrisponde all'obiettivo da perseguire. Le inefficienze possono essere di vario genere e natura, le principali sono determinate da:

-Idle Time: l'operatore rimane inattivo generando tempi improduttivi poiché la stazione a monte non riesce a fornire il materiale da lavorare.

-work overload: il carico di lavoro eccessivo non consente all'operatore di eseguire tutte le sue mansioni nell'interno entro il confine a valle della zona a lui assegnatagli.

-work deficiency: l'operatore termina il proprio operato su di un pezzo prima che il successivo sia entrato nei confini della zona a lui assegnatagli, costringendolo a varcarli a monte per raggiungere il pezzo.

-work congestion: l'operatore per poter concludere le proprie operazioni di montaggio deve uscire dal confine a valle della propria stazione di lavoro.

Le ultime due tipologie di inefficienza sono da considerabili nel momento in cui sia possibile una sovrapposizione delle aree di lavoro degli addetti a monte e a valle di ogni stazione.

Le inefficienze vengono quindi individuate e valutate in termini temporali e moltiplicate per il costo unitario di ciascuna; sommando tutti i costi ottenuti si ottiene la funzione obiettivo desiderata che verrà quindi poi minimizzata:

Quando si trattano le linee di assemblaggio a modelli misti, i tempi di setup vengono considerati trascurabili o notevolmente ridotti, ma ciò non è sempre possibile poiché in alcuni casi questi hanno notevole rilevanza (es. Verniciatura nell'industria automobilistica). In questi casi la riduzione dei tempi di attrezzaggio viene inclusa tra gli obiettivi del sequenziamento delle linee mixed-model da conseguire.

In allegato sono riportati tutti i grafici, relativi alle migliori soluzioni trovate dall'algoritmo, divisi per comunanza. Per ogni soluzione saranno rappresentati 2 grafici, il primo indica la lunghezza del percorso migliore trovato all'i-esima iterazione, sul quale quindi è evidente

l'andamento nel tempo della bontà della soluzione. Nel primo grafico è quindi possibile vedere se e quanto velocemente l'algoritmo è arrivato a convergenza; il valore indicato come "TRIF" indica il valore dell'iterazione nella quale è stata trovata la soluzione migliore. Nei grafici in cui l'andamento è molto oscillatorio o in cui non si è arrivati a convergenza "TRIF" perde totalmente di significato. Anche nel caso in cui si giunga a convergenza il momento il momento in cui si ottiene il risultato migliore è di poco interesse, poichè essendo un andamento convergente, la tendenza è quella di trovare la soluzione migliore verso la fine della simulazione, ecco perchè spesso saranno presenti valori superiori ad 700. Per capire se è possibile interrompere prima la sperimentazione, e quando, si dovrebbe effettuare una stima della variazione del valore ottenuto a fine sperimentazione e quello presente alla iterazione presa come riferimento, ma questa analisi viene lasciata a studi futuri. Nella prima tipologia di grafico, nella parte sottostante, viene rappresentata anche una stima del numero medio di connessioni per ogni nodo, che come si osserva decresce arrivando anch'essa a convergenza, ma è un parametro di cui non verrà tenuto conto nelle analisi. Nel secondo grafico sono stati disposti ordinati lungo una circonferenza tutti i prodotti e seguendo le linee che li congiungono si arriva ad ottenere l'ordine di assemblaggio corrispondente alla migliore soluzione trovata.

Per disporre i prodotti sulla circonferenza ho usato la seguenti formule:

$$x=1+0,5*\text{COS}(360*(\#\text{pezzo}/\text{DT})) \quad y=1+0,5*\text{SIN}(360*(\#\text{pezzo}/\text{DT})).$$

A titolo d'esempio vengono di seguito riportati una coppia di grafici figg.10-11. Nella sezione allegati sono riportati i grafici dei casi in cui MMAS prevale su ACO.

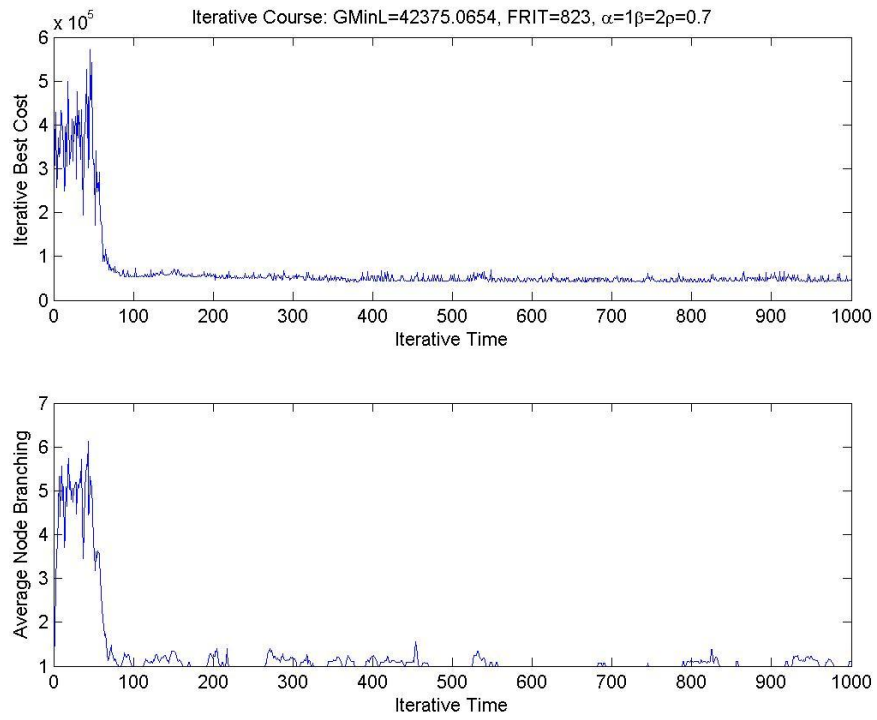


fig. 10

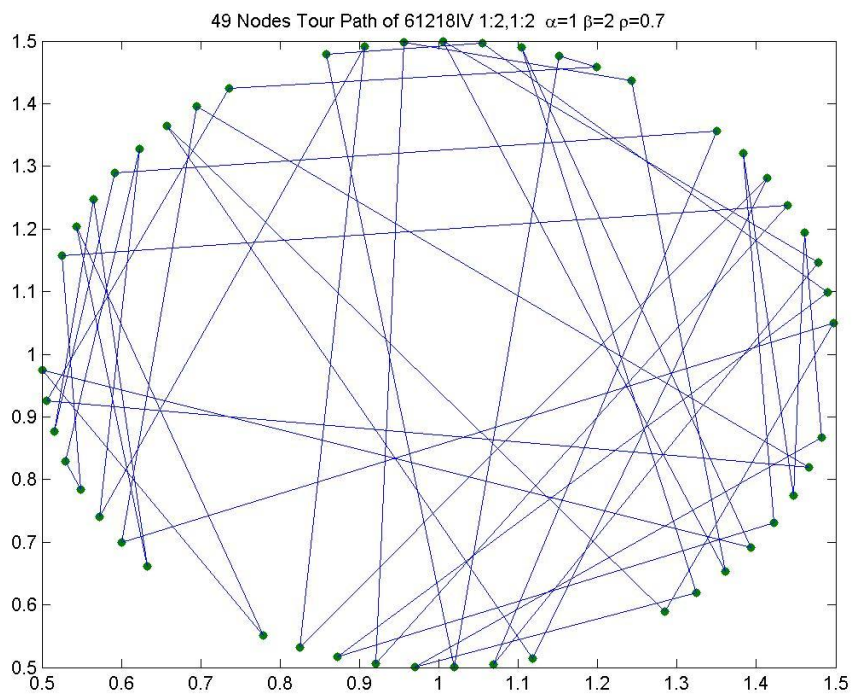


fig. 11

CAPITOLO 5

5.1 L'analisi dei risultati

In questo capitolo vengono illustrati i risultati della campagna sperimentale presentata nel capitolo 4. Verranno presentati i risultati relativi all'andamento dei risultati in base a tutte le variabili considerate, evidenziati i confronti tra i vari livelli delle stesse ed effettuati i confronti con il modello ACO, per evidenziare in quali circostanze sia vantaggioso il metodo MMAS.

5.1.1 L'analisi Statistica

Come primo passo, dopo aver accuratamente catalogato i risultati è stato effettuare un'analisi della varianza tramite il software Minitab. Ho creato un piano fattoriale replicato 3 volte con tutte le variabili considerate: rho, comunanza, polarizzazione, distinta base, ed in corrispondenza delle diverse combinazioni ho posto i risultati ottenuti nella campagna prove.

L'analisi fornita dal software evidenzia come tutti i fattori e le relative interazioni siano da considerarsi significativi. Il test di Levene che consiste in una procedura robusta per testare gli scostamenti dalla normalità dei residui e quindi per verificare l'ipotesi di eguaglianza delle varianze dei diversi trattamenti, dava però esito negativo. Ho modificato quindi i risultati utilizzati tramite il metodo Box-Cox, i quali notarono che per riuscire a stabilizzare la varianza della risposta, rendere la distribuzione della variabile di risposta più vicina alla distribuzione normale e migliorare l'accostamento del modello ai dati è molto utile utilizzare la **famiglia di trasformazione** di potenze $y^* = y^\lambda$. Il valore λ risulta essere il parametro di trasformazione da determinare. Il risultato dell'analisi Box-Cox espresso dalla fig.6 porta ad una trasformazione logaritmica dei dati, più precisamente $y^* = \ln(y)$.

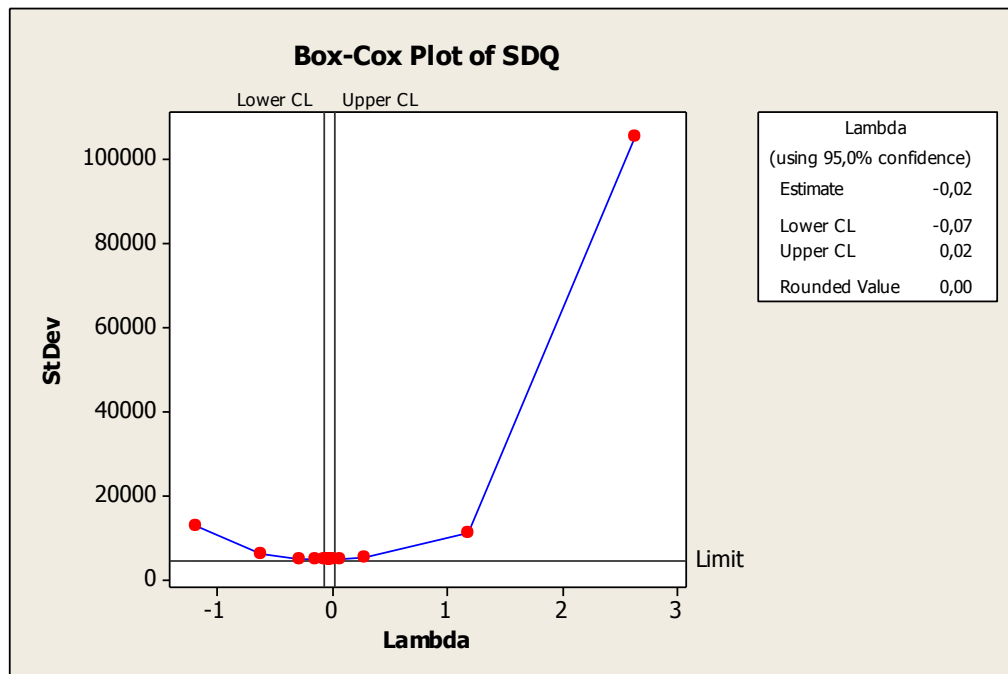


fig. 12

Eseguendo nuovamente l'Analisi della varianza si ottengono i seguenti risultati:

General Linear Model: SDQ mod. versus Rho; Comunanza; DiBa; Polarizzazio

Factor	Type	Levels	Values
Rho	fixed	3	0,7; 0,8; 0,9
Comunanza	fixed	4	1-2 1-2; 1-2 1-t; 1-t 1-t; 1-t 1-2
DiBa	fixed	9	633; 636; 663; 666; 6126; 6312; 6612; 61212; 61218
Polarizzazione	fixed	4	Uniforme; Pol.su 3; Pol.su 2; Pol.su 1

Analysis of Variance for SDQ mod., using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Rho	2	30,400	30,400	15,200	733,71
Comunanza	3	499,312	499,312	166,437	8034,03
DiBa	8	1471,389	1471,389	183,924	8878,11
Polarizzazione	3	6,944	6,944	2,315	111,73
Rho*Comunanza	6	14,415	14,415	2,402	115,97
Rho*DiBa	16	8,342	8,342	0,521	25,17
Rho*Polarizzazione	6	0,977	0,977	0,163	7,86
Comunanza*DiBa	24	166,333	166,333	6,931	334,54
Comunanza*Polarizzazione	9	22,457	22,457	2,495	120,45
DiBa*Polarizzazione	24	19,349	19,349	0,806	38,92
Rho*Comunanza*DiBa	48	15,320	15,320	0,319	15,41
Rho*Comunanza*Polarizzazione	18	8,092	8,092	0,450	21,70
Rho*DiBa*Polarizzazione	48	2,654	2,654	0,055	2,67
Comunanza*DiBa*Polarizzazione	72	29,335	29,335	0,407	19,67
Rho*Comunanza*DiBa*Polarizzazione	144	11,481	11,481	0,080	3,85
Error	864	17,899	17,899	0,021	
Total	1295	2324,699			

Source	P
Rho	0,000

Comunanza	0,000
DiBa	0,000
Polarizzazione	0,000
Rho*Comunanza	0,000
Rho*DiBa	0,000
Rho*Polarizzazione	0,000
Comunanza*DiBa	0,000
Comunanza*Polarizzazione	0,000
DiBa*Polarizzazione	0,000
Rho*Comunanza*DiBa	0,000
Rho*Comunanza*Polarizzazione	0,000
Rho*DiBa*Polarizzazione	0,000
Comunanza*DiBa*Polarizzazione	0,000
Rho*Comunanza*DiBa*Polarizzazione	0,000
Error	
Total	

S = 0,143932 R-Sq = 99,23% R-Sq(adj) = 98,85%

Risulta evidente come tutte le variabili principali e le rispettive iterazioni risultino essere significative. Anche il parametro R-square(adjusted), che misura la porzione di variabilità totale spiegata dal modello, tiene conto anche della “dimensione” del modello, ovvero del numero dei fattori, è alto indicando la bontà del modello.

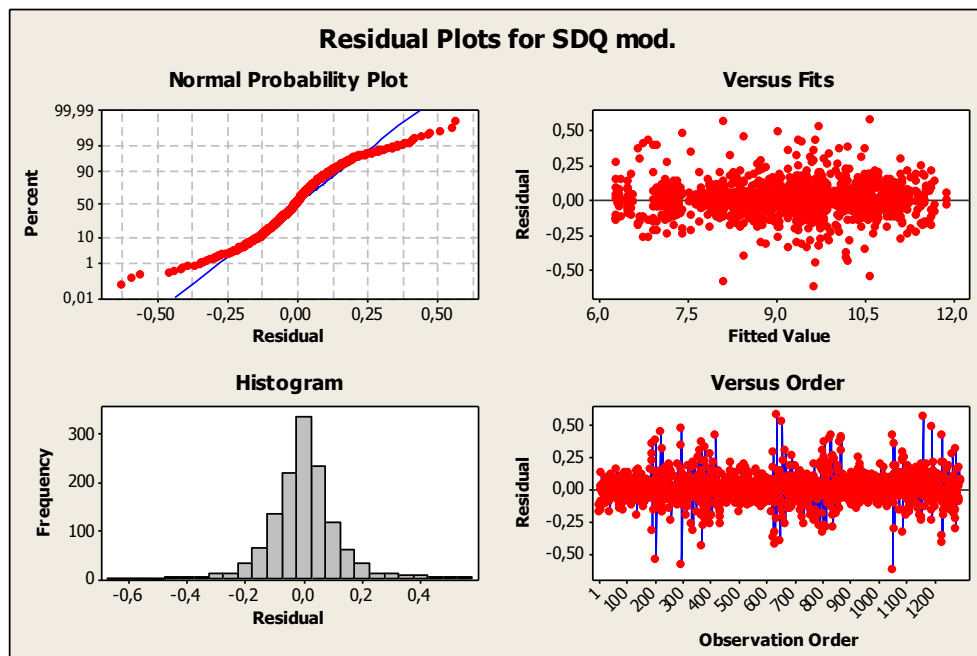


fig. 13

I grafici ottenuti dall'analisi sono stati presentati nella fig.13.

Importante notare come nel grafico che mette in relazione i residui con i valori attesi, non vi siano particolare trend dei residui, il che significa la completa ininfluenza del pc utilizzato per l'analisi. Si nota anche una distribuzione normale dei residui, mentre il grafico della normalità ha un andamento piuttosto ad S. Per verificare la bontà del modello ho effettuato nuovamente il test di Levene ottenendo il seguente risultato:

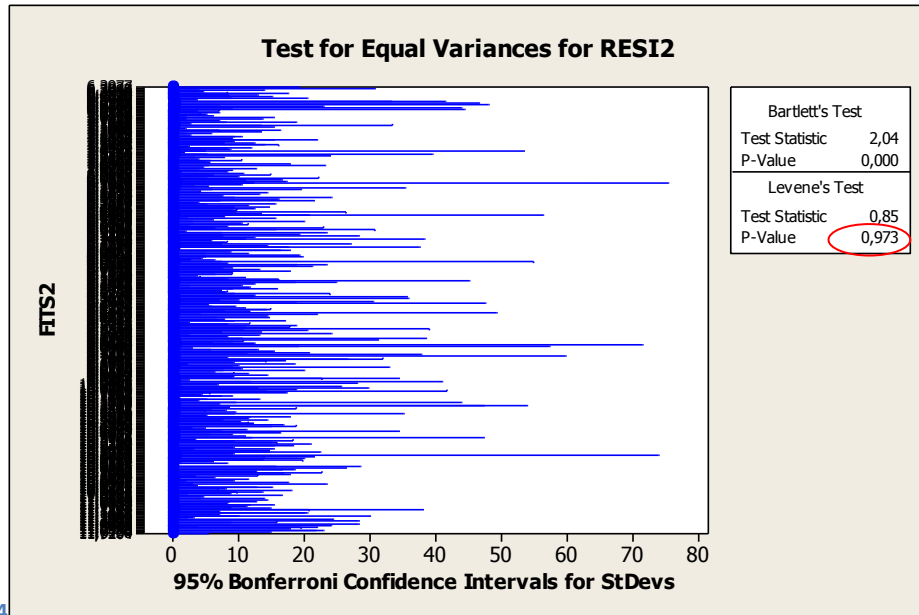


fig. 14

In evidenza, nell'ovale rosso, il valore elevato del p-value che fa accettare l'ipotesi nulla di eguaglianza delle varianze.

5.2 Analisi della variabile Beta

Come prima analisi ho cercato di evidenziare quale tra i due livelli del fattore Beta desse i risultati migliori. Come evidenziato nel capitolo 4 i valori di Beta testati sono stati $\beta=2$ e $\beta=5$.

Come dimostra chiaramente la fig.8 , in cui sono stati calcolate le medie dei valori dello Square Deviation Quantity per ogni tipologia di Distinta Base, in ogni situazione analizzata i risultati ottenuti mediante $\beta=2$ sono migliori di quelli ottenuti con $\beta=5$. Come è facilmente osservabile dall'esempio riportato in fig.9 e fig. 10, nonostante in entrambe le circostanze si arrivi a una convergenza dei risultati, con $\beta=2$ questa risulta nettamente più marcata e veloce. Con $\beta=5$ la convergenza non sempre viene raggiunta e qualora ciò avvenisse i risultati ottenuti sono nettamente superiori rispetto a quelli trovati con $\beta=2$.

La spiegazione di questo andamento è da attribuire al fatto che per valori di β così elevati, nella probability transition, il peso del feromone risulta quasi trascurabile rispetto a quello della distanza delle città, vanificando quindi il ruolo di quest'ultimo, il vero artefice dello "stigmergy" tra le formiche e quindi del loro comportamento convergente verso un percorso comune.

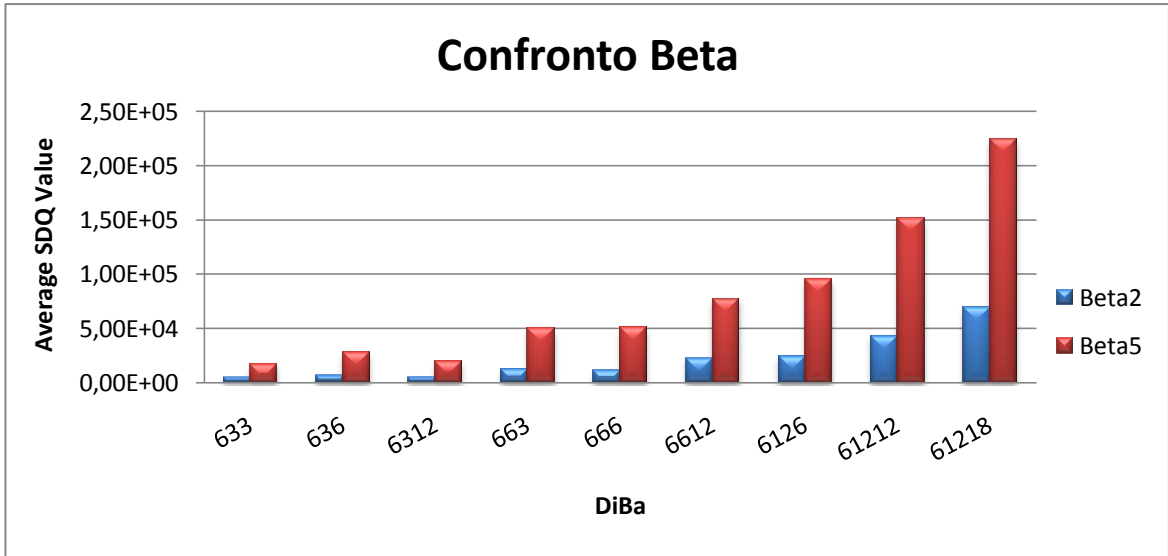


fig. 15

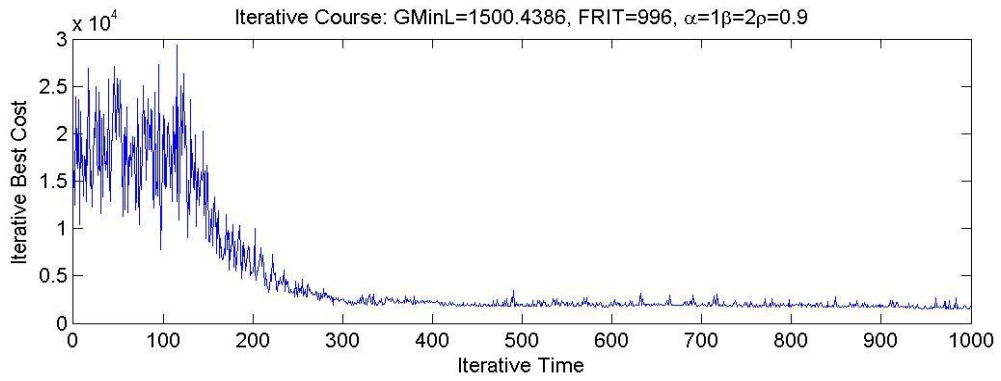


fig. 16

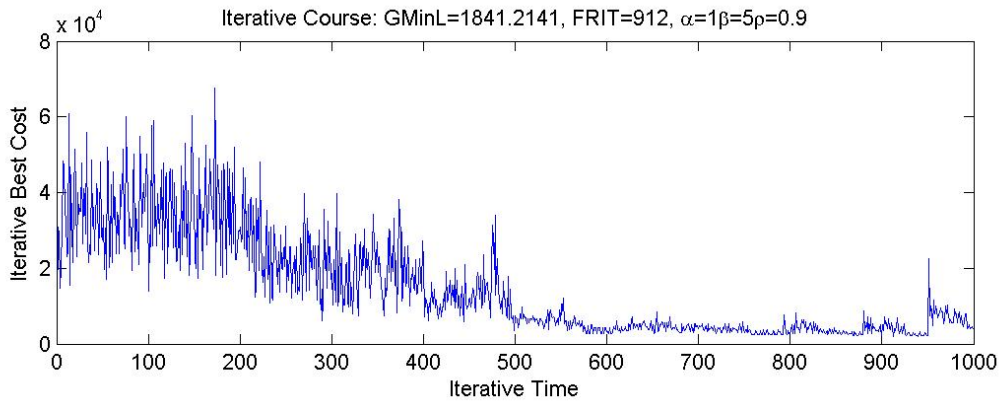


fig. 17

Gli esempi riportati in fig.16 e fig.17 si riferiscono alla Distinta Base 663 con Polarizzazione Uniforme e grado di comunanza 1-2 1-2 e rho pari a 0,9.

La scelta effettuata è stata quindi quella di indagare il comportamento del modello solo tra i risultati ottenuti tramite $\beta=2$, cercando quindi la migliore combinazione con il parametro rho, per ogni tipologia di Distinta Base.

Ponendo in evidenza le sole medie riferite a $\beta=2$ dell'SDQ , in funzione delle distinte base si ottiene il grafico di fig.18, in cui l'ordine in cui sono state poste le Distinte Base è stato scelto seguendo un criterio di crescente complessità, pur mantenendo vicine Distinte Base con lo stesso numero di sottoassiemi.

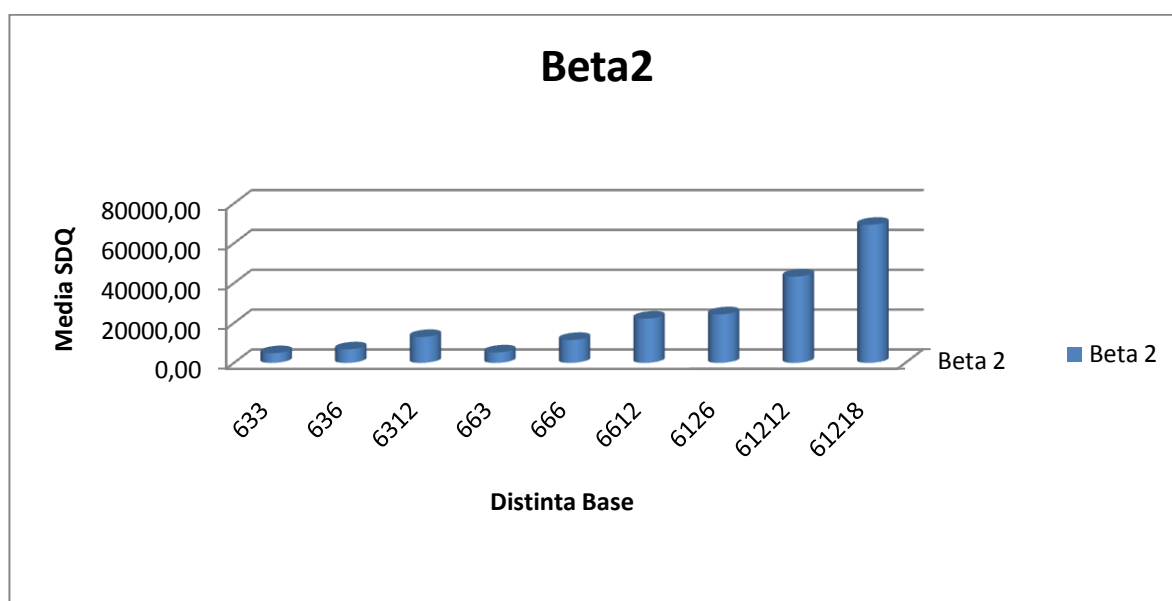


fig. 18

Risulta semplice osservare come al crescere della complessità della distinta base si abbia un aumento del valore dell'SDQ. La disposizione scelta permette inoltre di evidenziare come l'aumento del valore dei componenti sia molto influente sul valore finale dell'SDQ, accrescendone il valore notevolmente in tutti i casi.

Ulteriore evidenza dell'influenza del numero dei componenti è data dalla rappresentazione della media dell'SDQ in funzione della comunanza tra i tre livelli. Fig.19

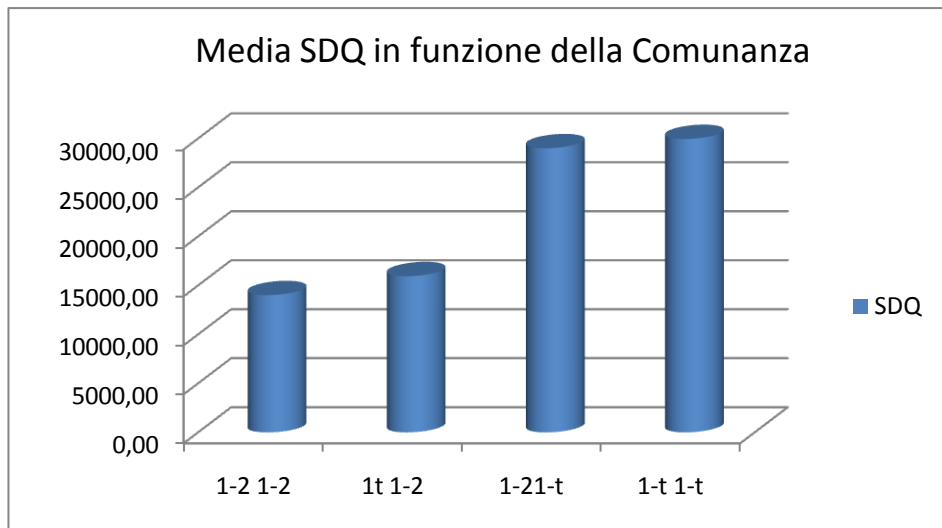


fig. 19

Il grafico mostra come al crescere del grado di comunanza cresca il valore medio di SDQ, ed in particolare che il gradiente tra situazioni con medesimo grado di comunanza tra prodotto finito e sottoassieme, ma diverso grado di comunanza tra sottoassieme e componente, sia elevato. Si ricorda come 1-2 stia a rappresentare che solo il 50 % delle parti a livello j siano presenti a livello j, mentre 1-tutti indica che tutte le parti presenti a livello j-1 sono presenti a livello j.

5.3 Analisi della variabile Rho

Identificato β mi sono concentrato sulla variabile ρ . Per ogni tipologia di comunanza e ogni grado di polarizzazione è stata calcolata la media tra i valori delle tre ripetizioni effettuate per

ogni combinazione di valori. Successivamente è stata calcolata la differenza percentuale tra le medie ottenute ed i risultati sono stati evidenziati nei grafici seguenti. Nei grafici seguenti si presenta, la variazione delle medie ottenute per ogni valore di rho, al variare delle Distinta Base per ogni combinazione di Comunanza e Polarizzazione.

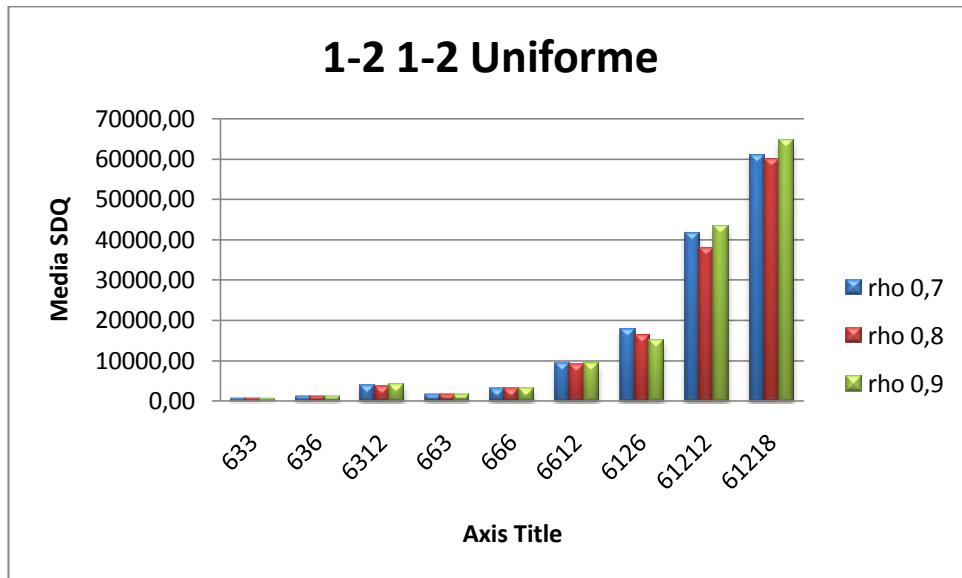


fig. 20

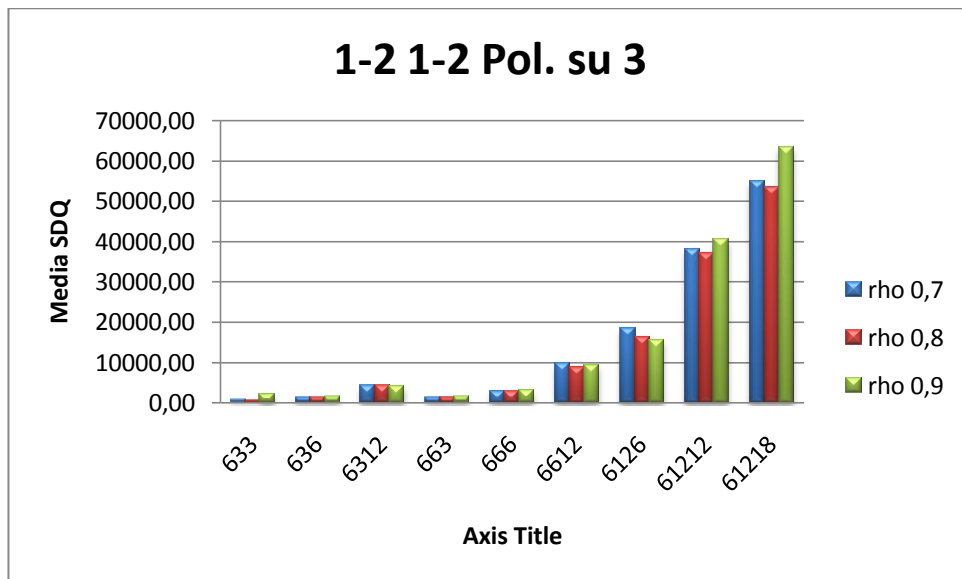


fig. 21

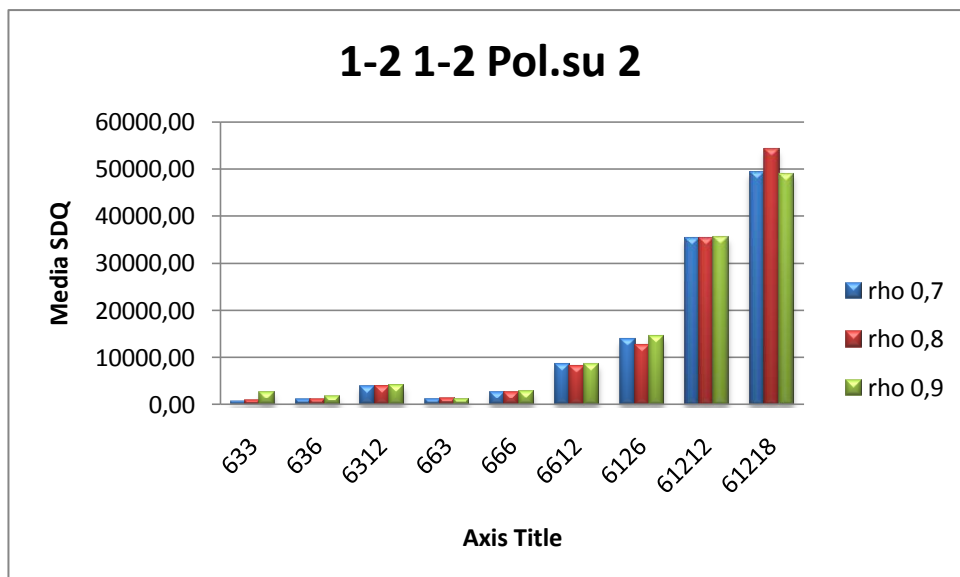


fig. 22

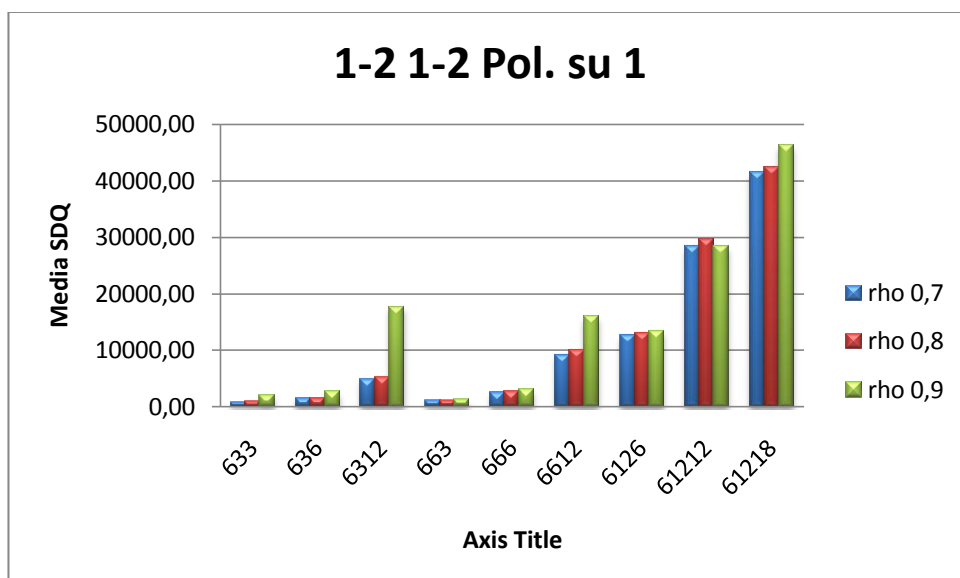


fig. 23

Nel grado di comunanza 1-2 1-2 nella maggior parte dei casi i tre valori di rho sembrano dare risultati simili. Per effettuare quindi un'analisi più accurata, è stata messa in evidenza la differenza percentuale tra le medie dei rho per ogni grado di polarizzazione.

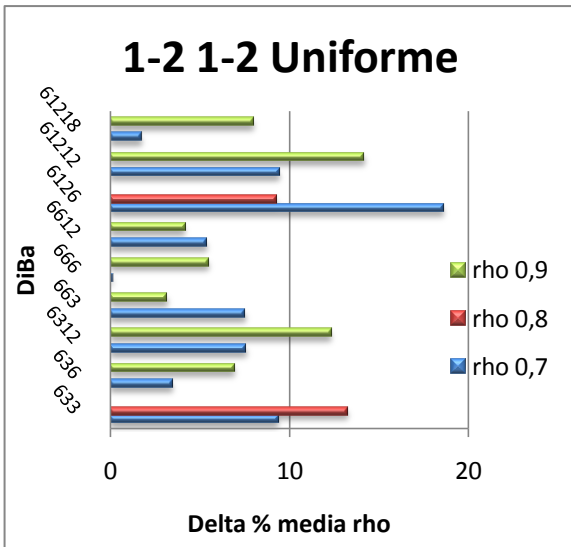


fig. 24

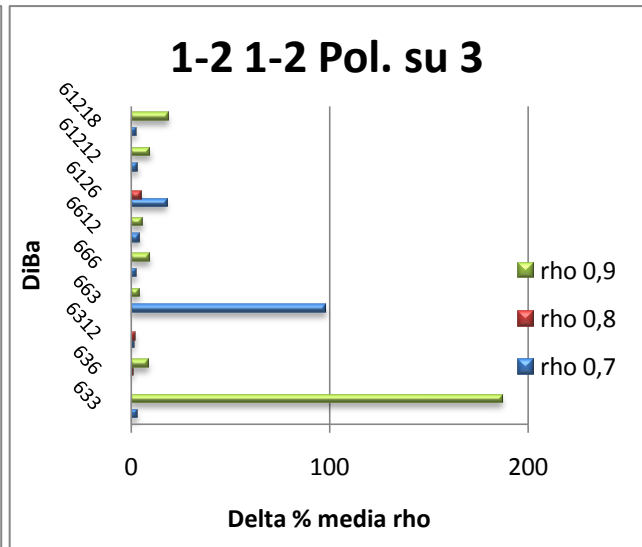


fig. 25

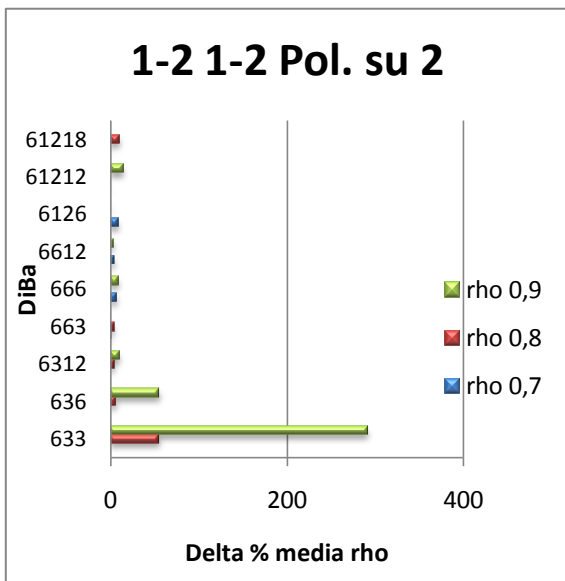


fig. 26

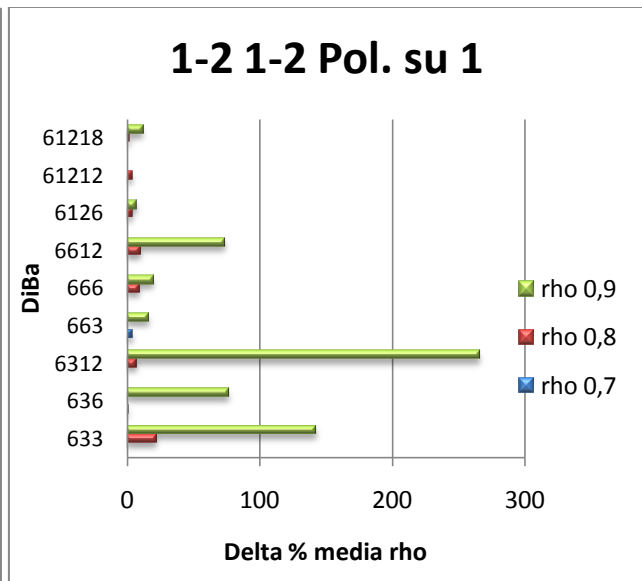


fig. 27

Sebbene dai primi grafici i risultati sembrassero molto allineati, evidenziando le differenze percentuali si evince che vi sono delle importanti differenze. Escludendo i valori relativi a rho=0,9 che risultano evidentemente quelli con una differenza percentuale rispetto al miglior valore più alto si ottengono i seguenti grafici, che evidenziano le differenze tra i risultati ottenuti con rho=0,7 e rho= 0,8 (figg.28-31).

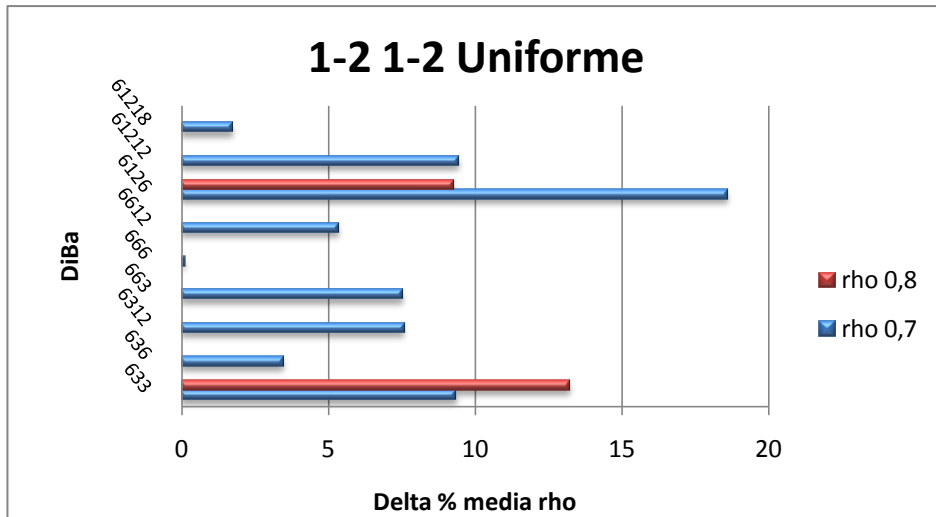


fig. 28

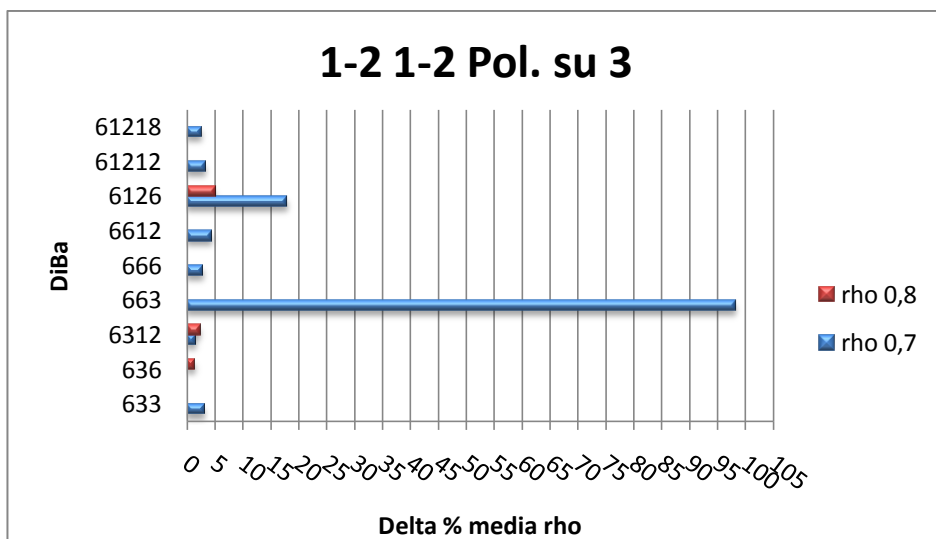


fig. 29

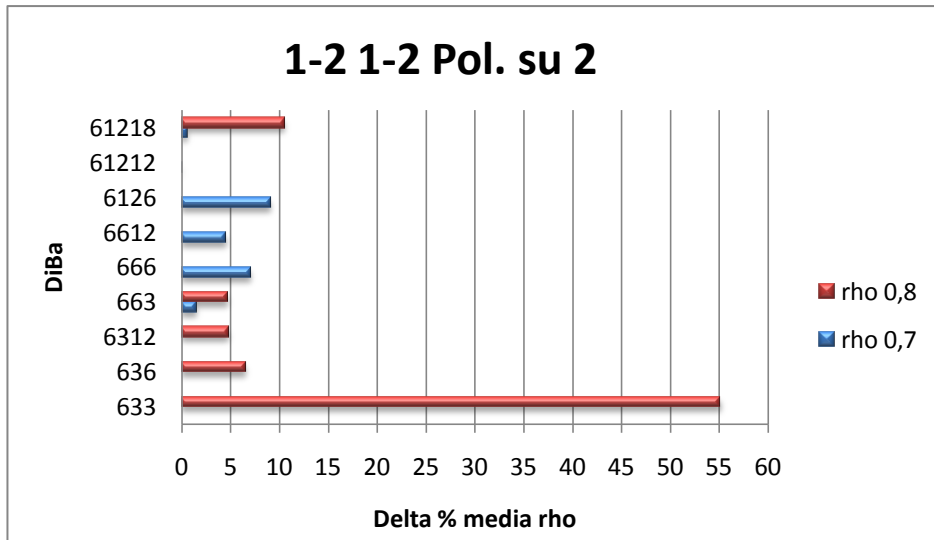


fig. 30

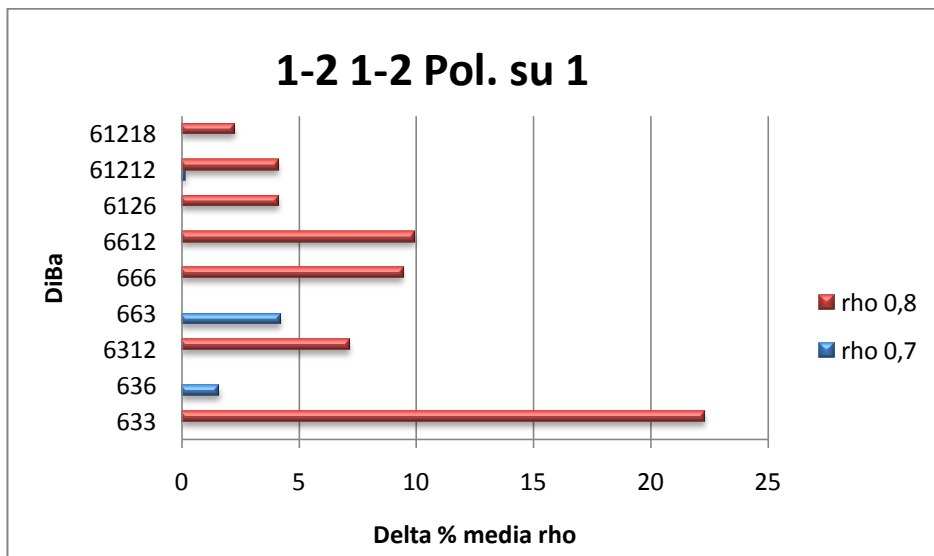


fig. 31

Analizzando i grafici si osserva come il colore meno rappresentato, indichi quale tipologia di rho sia meglio utilizzare,essendo il valore di riferimento per quella data tipologia di Distinta Base. Ho cercato quindi di imporre un valore di rho per ogni grado di polarizzazione, utilizzando come limite massimo il 5% come errore. Per il caso di polarizzazione uniforme prodotti fig.21, in cui risulta evidente come 0,8 sia il valore di rho da preferire, che però non può essere

utilizzato per le Distinte Base 633 e 6126 in quanto la differenza con la soluzione ottima, usando $\rho=0,8$ è superiore al 5%. Nel caso di polarizzazione su 3 prodotti si può utilizzare $\rho=0,8$ ad eccezione che per 6126 per il quale è consigliato il valore 0,9. Per la polarizzazione su 2 prodotti $\rho=0,7$ ad eccezione che per 666 e 6126 per cui è consigliato $\rho=0,9$. Per la polarizzazione su 1 prodotto $\rho=0,7$ è adatto ad ogni tipo di distinta base.

Con lo stesso criterio sono stati analizzati i risultati per tutti i gradi di comunanza di cui sono riportati di seguito i grafici.

Per il grado di comunanza 1-2 1-tutti:

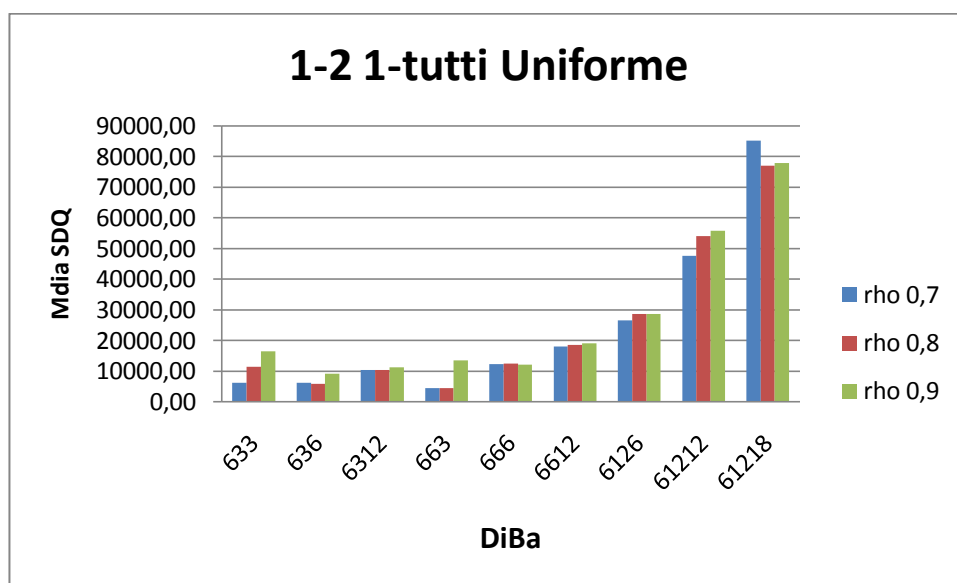


fig. 32

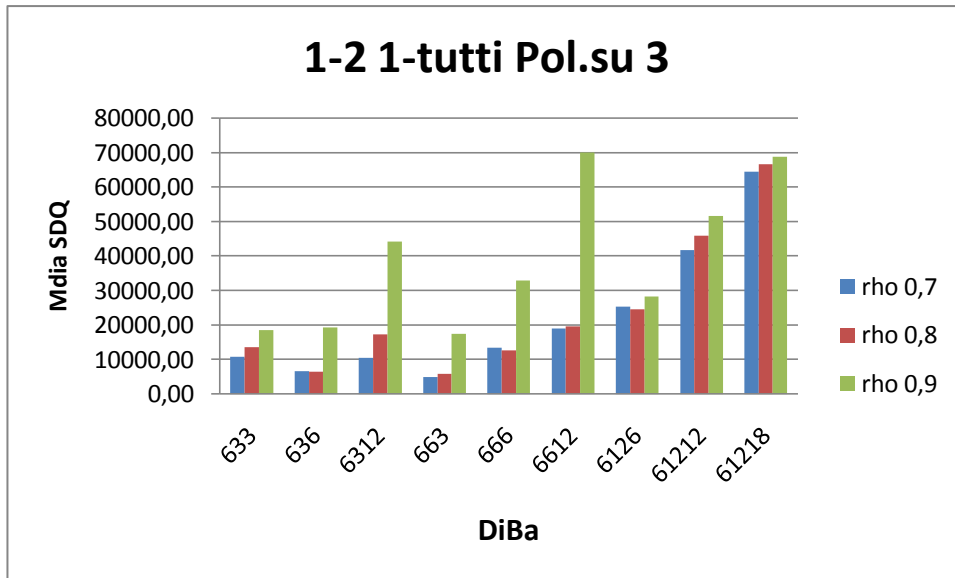


fig. 33

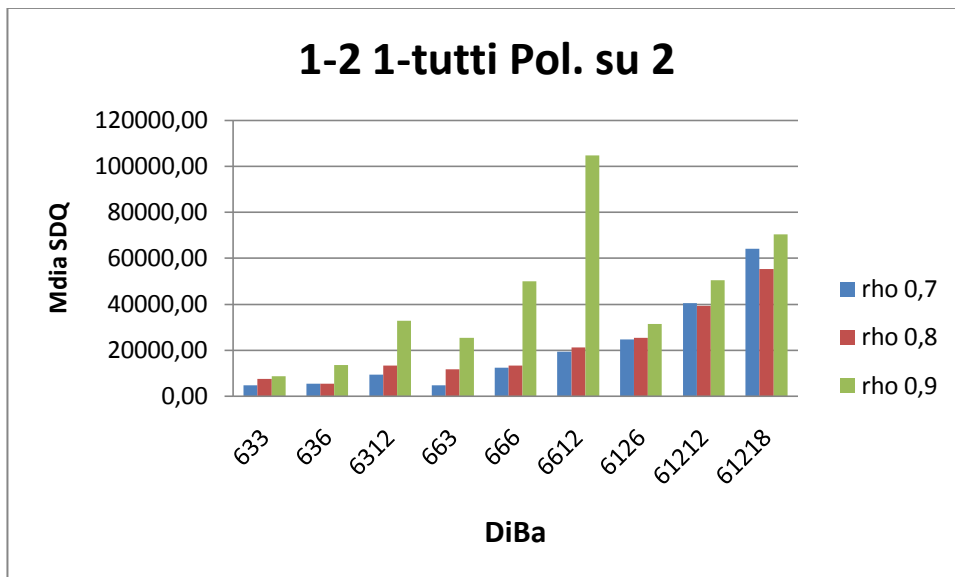


fig. 34

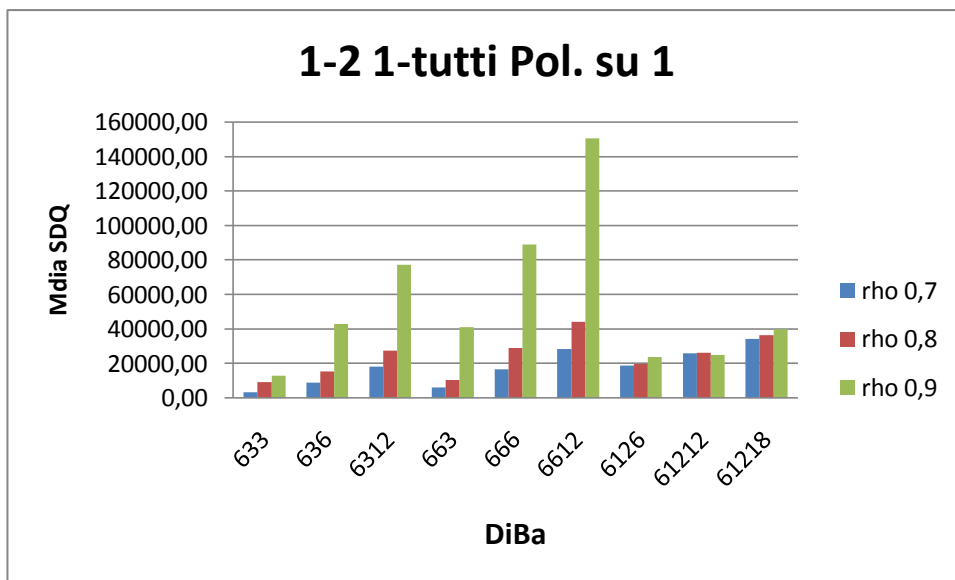


fig. 35

Con il grado di comunanza 1-2 1-tutti si nota maggiormente la bontà di valori di rho pari a 0,7 e 0,8 rispetto a 0,9. Il confronto tra rho=0,7 e rho=0,8 viene espresso dai seguenti grafici.

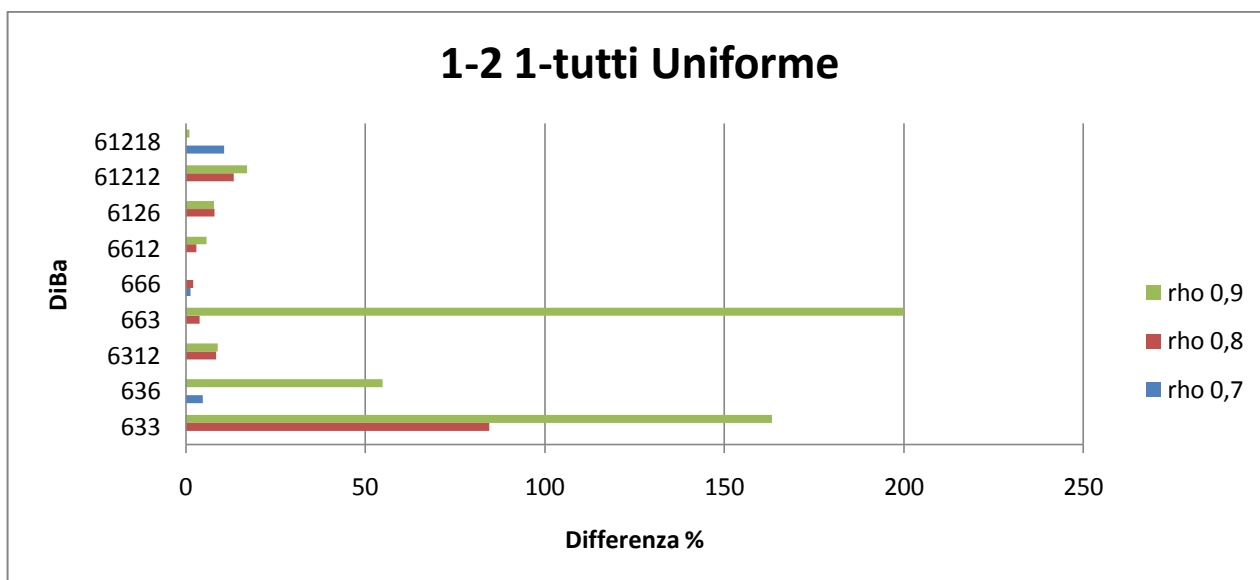


fig. 36

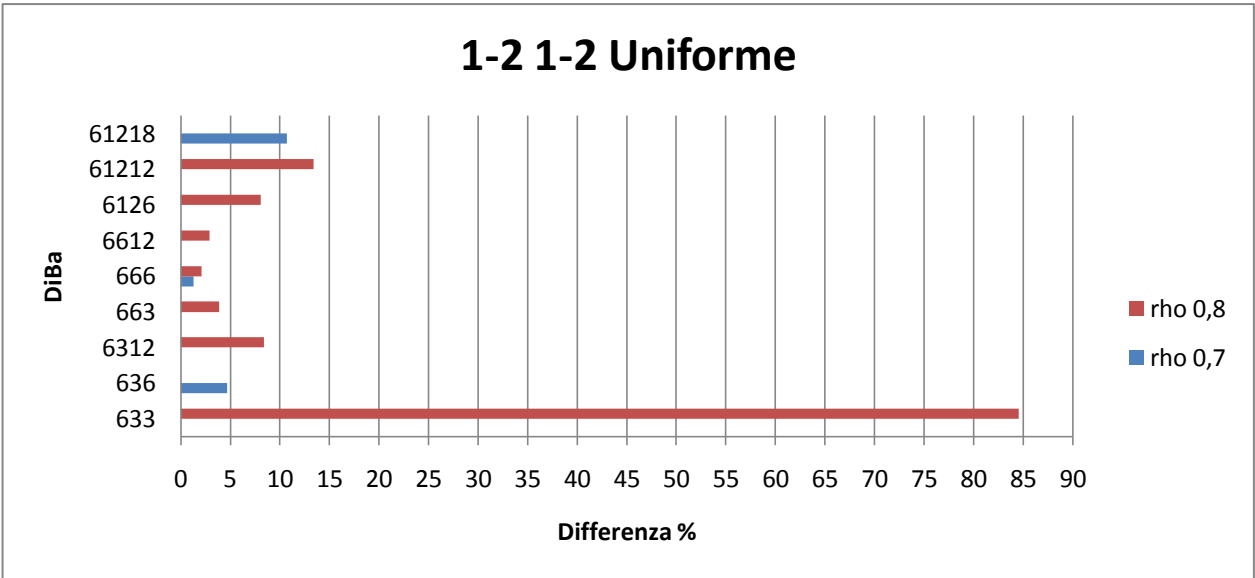


fig. 37

Rho=0,7 risulta essere la soluzione da preferire, ad eccezione che per 61218, poichè lo scarto percentuale risulta pari al 10,7%, per questa Distinta Base è consigliato l'utilizzo di rho=0,8.

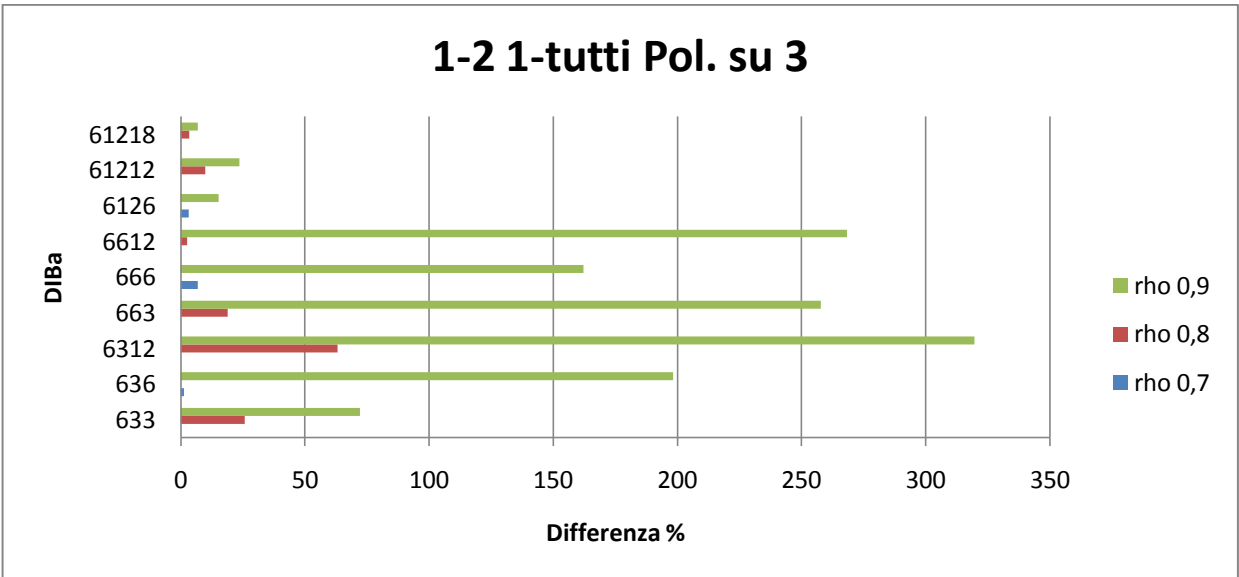


fig. 38

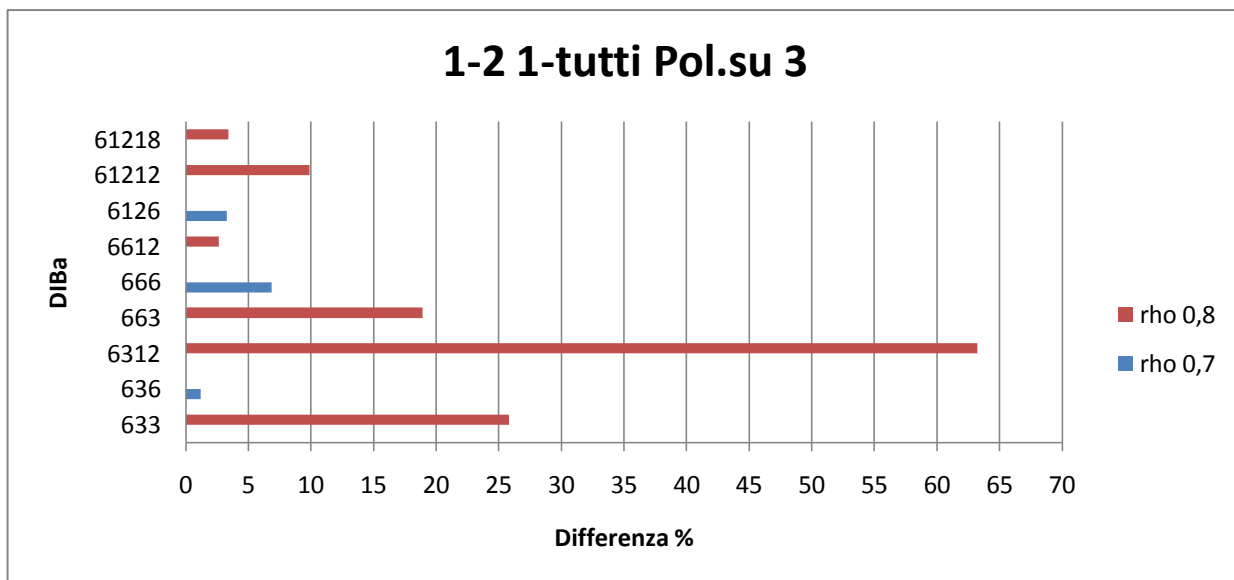


fig. 39

Anche in questo caso rho= 0,7 costituisce il riferimento, ad eccezione che per 666 per il quale si ha uno scarto di 6,8 %, in questo caso diventa preferibile rho=0,8.

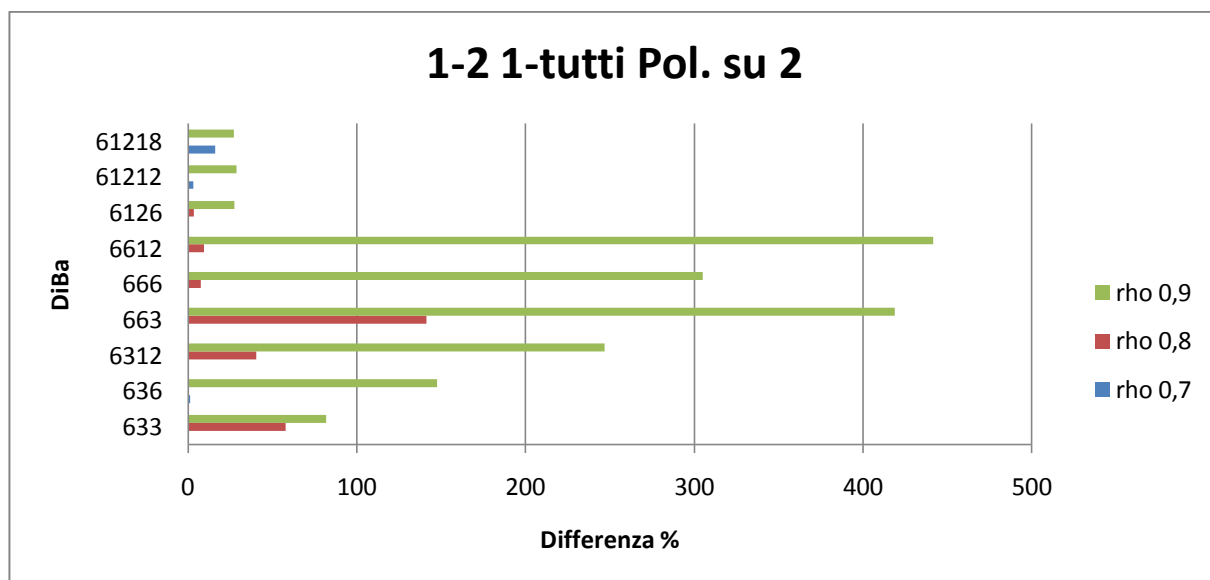


fig. 40

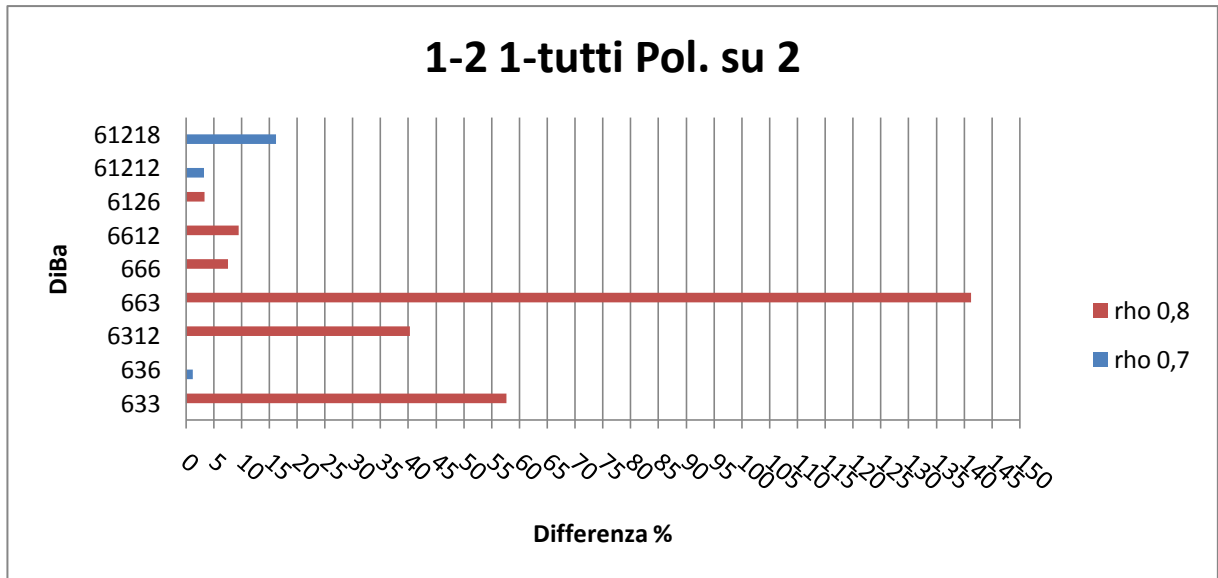


fig. 41

Si consiglia l'utilizzo di rho=0,7 per tutte le Distinte Base ad eccezione che per 61218 per la quale è consigliabile rho=0,8.

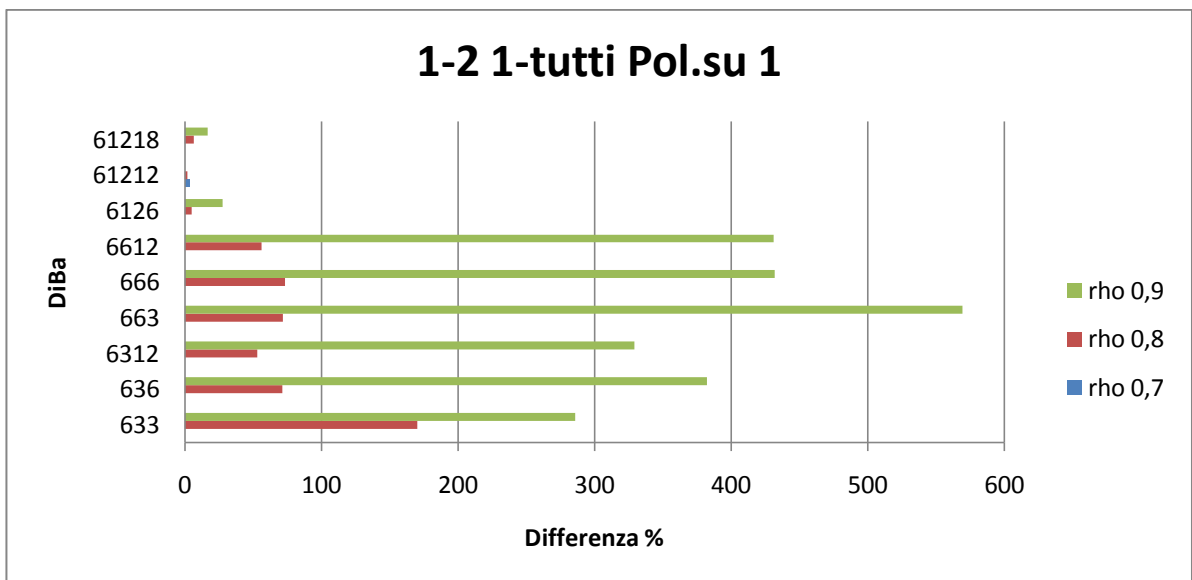


fig. 42

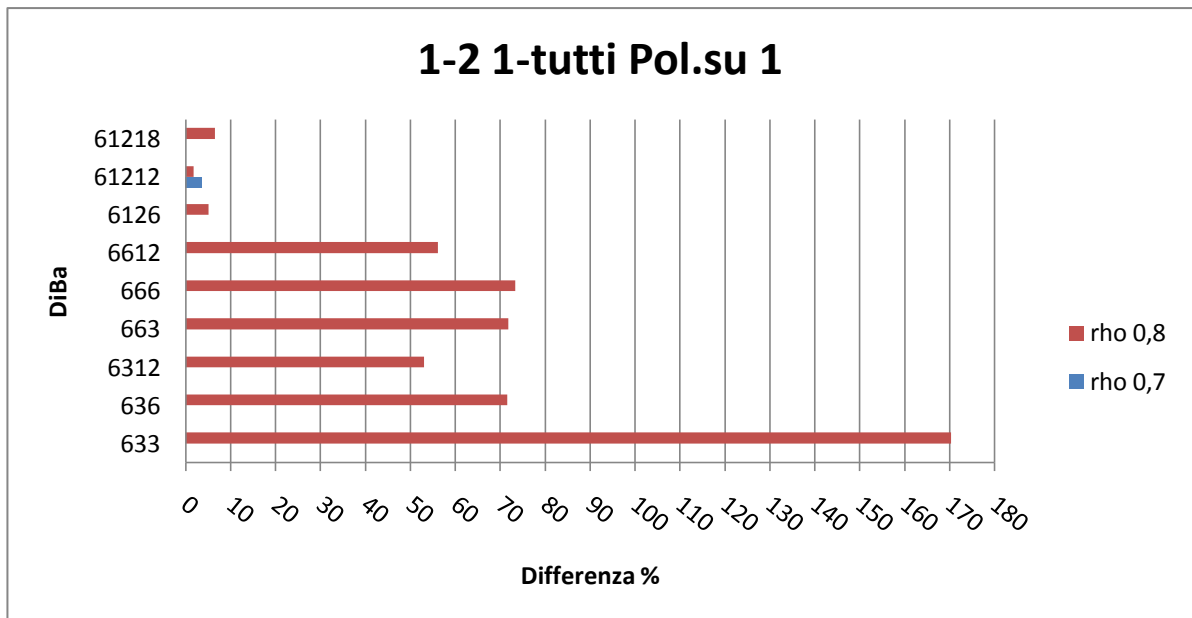


fig. 43

Si può utilizzare in ogni circostanza $\rho=0,7$.

Per il grado di comunanza 1-tutti 1-2:

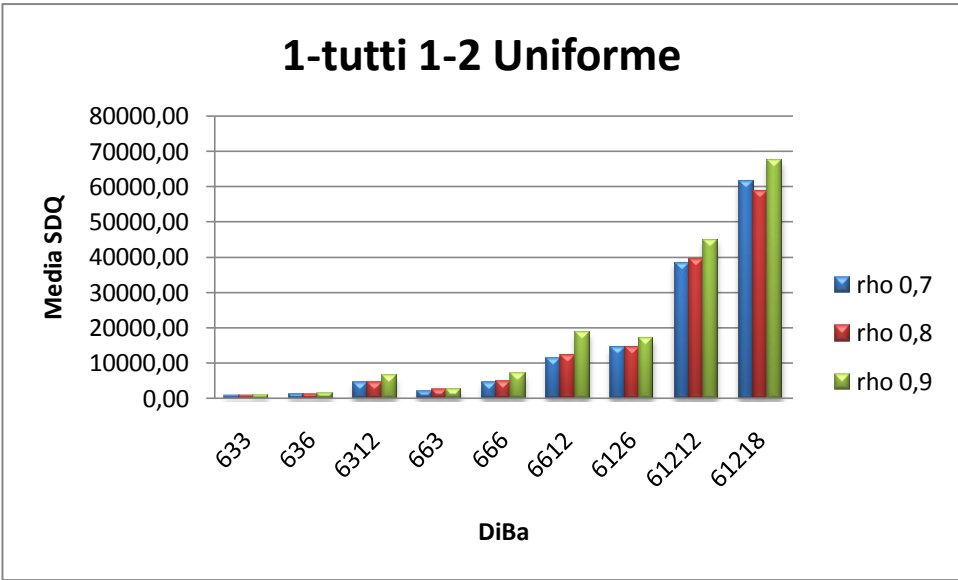


fig. 44

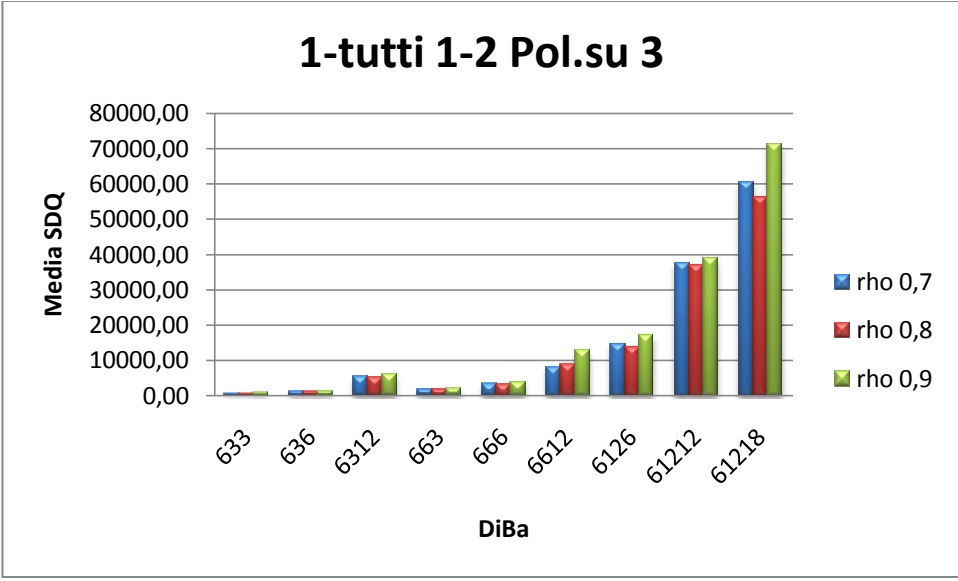


fig. 45

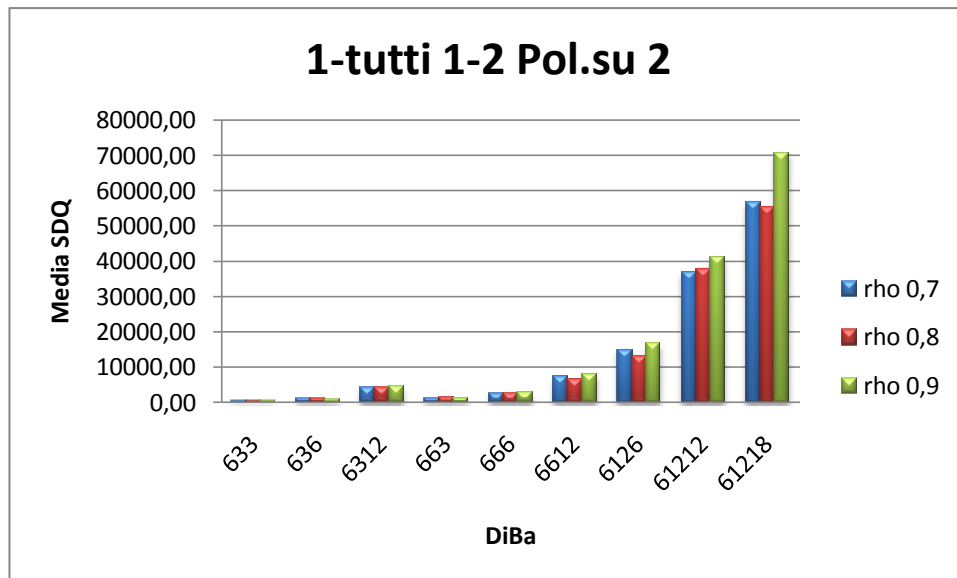


fig. 46

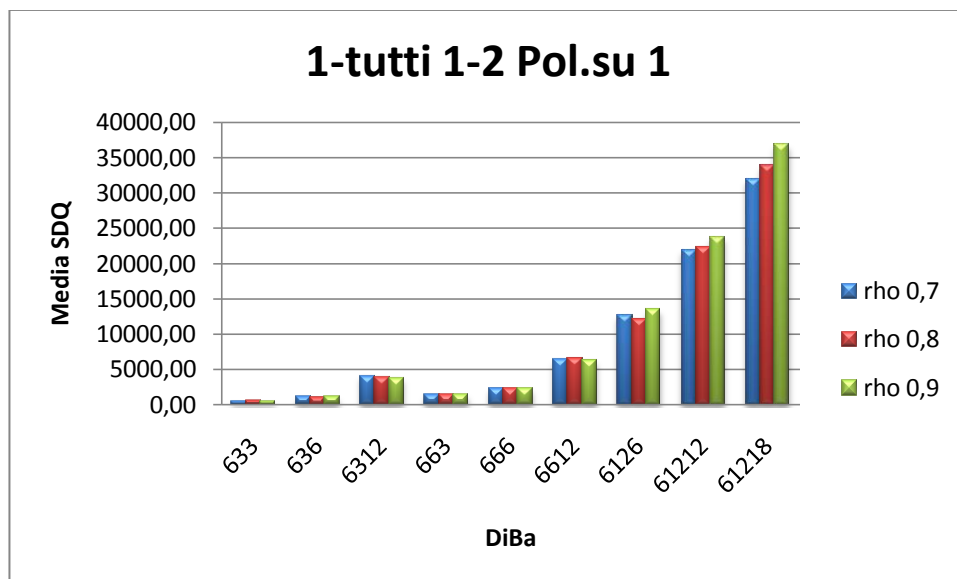


fig. 47

Le differenze tra i diversi Beta sembrano aumentare con la complessità della Distinza Base, senza però anche in questo caso dare chiare indicazioni su quale sia il valore di rho da prediligere. Effettuo quindi la consueta analisi.

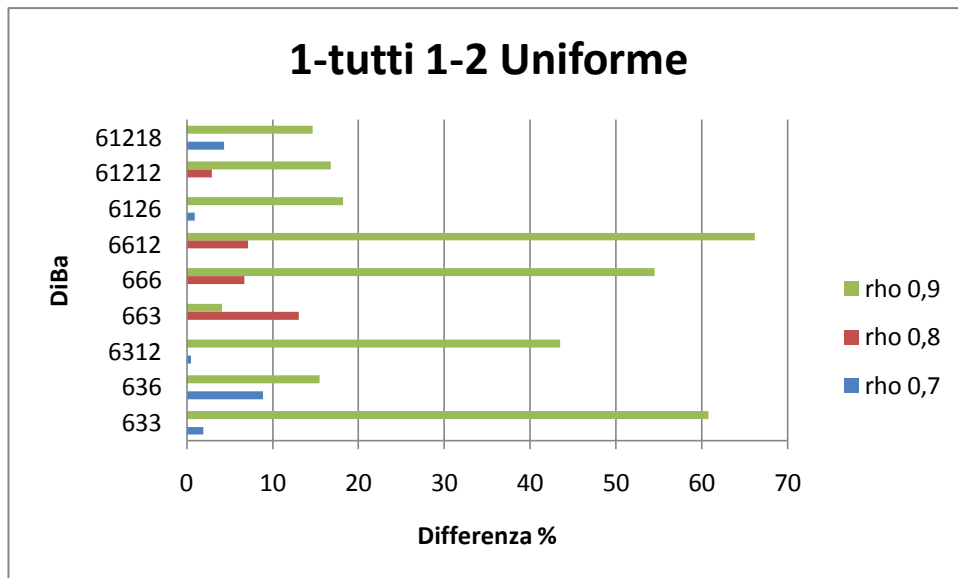


fig. 48

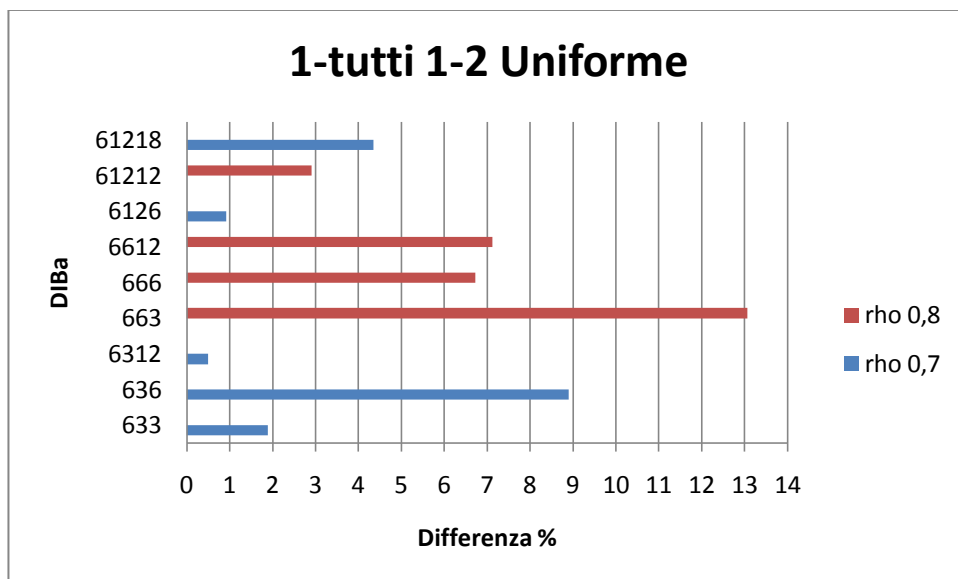


fig. 49

La scelta cade su rho=0,8 tranne che per 663,666,6612 per i quali è preferibile rho=0,7 avendo una differenza percentuale rispettivamente pari al 13%, 6,7% e 7%.

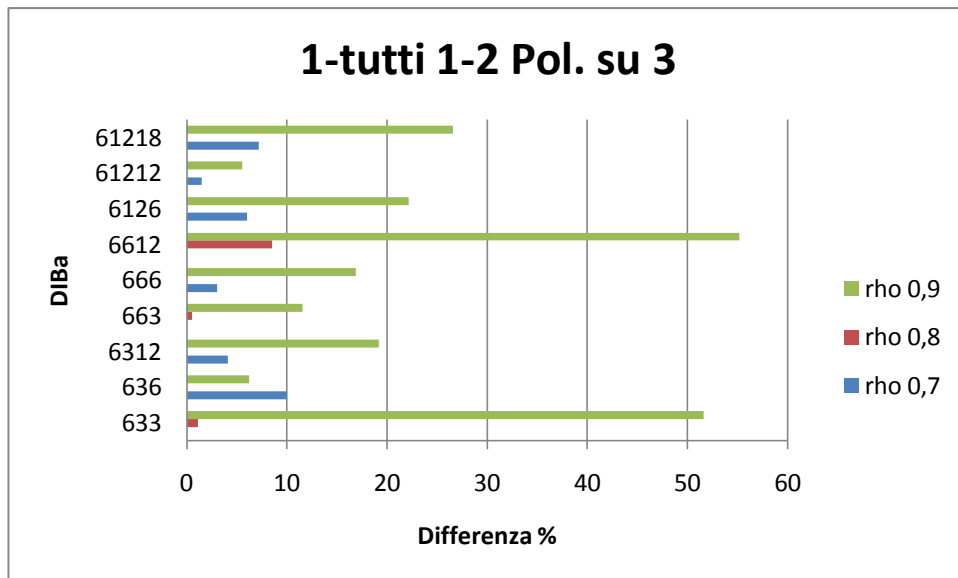


fig. 50

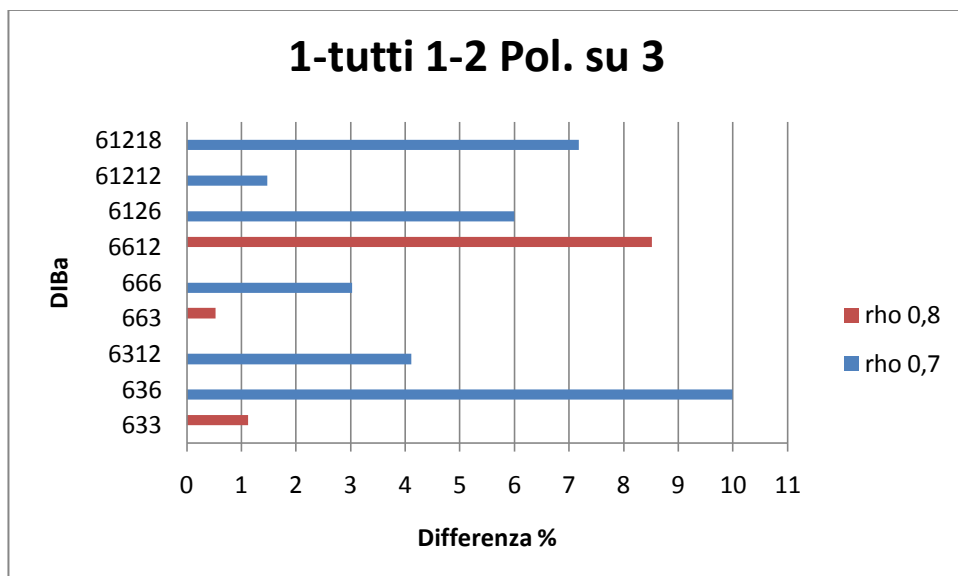


fig. 51

La soluzione da adottare è rho=0,8 ad eccezione che per 6612, per il quale è preferibile usare rho=0,7 avendo una differenza pari a 8,2% .

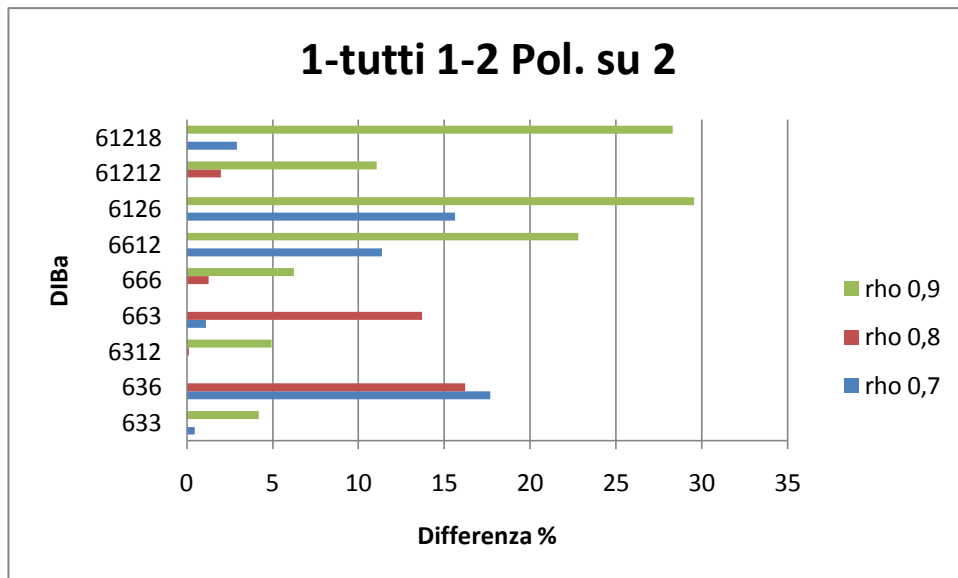


fig. 52

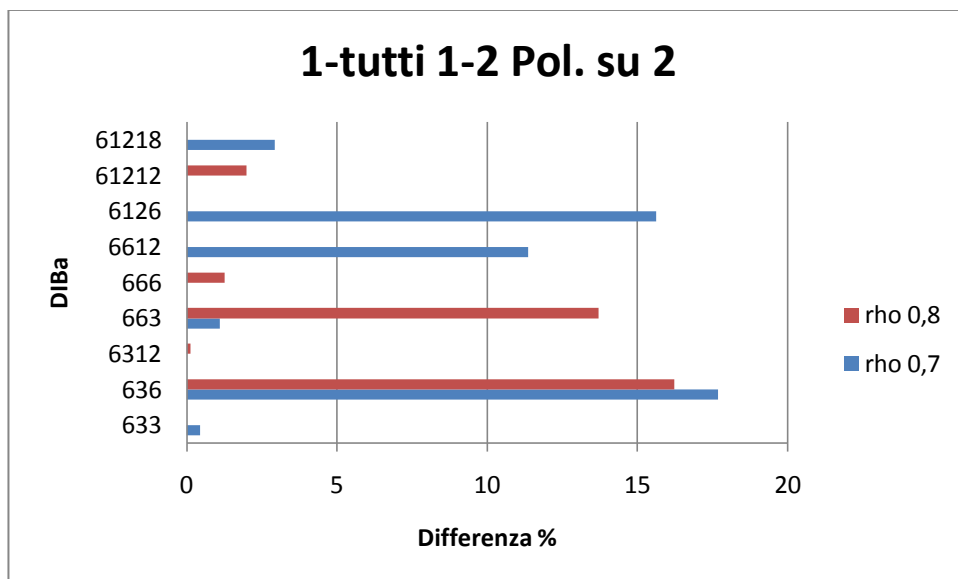


fig. 53

In questo caso si nota come rho=0,8 sia utilizzabile per la maggior parte dei casi, ma che per 636 e 663 sia consigliato l'utilizzo di rho=0,9.

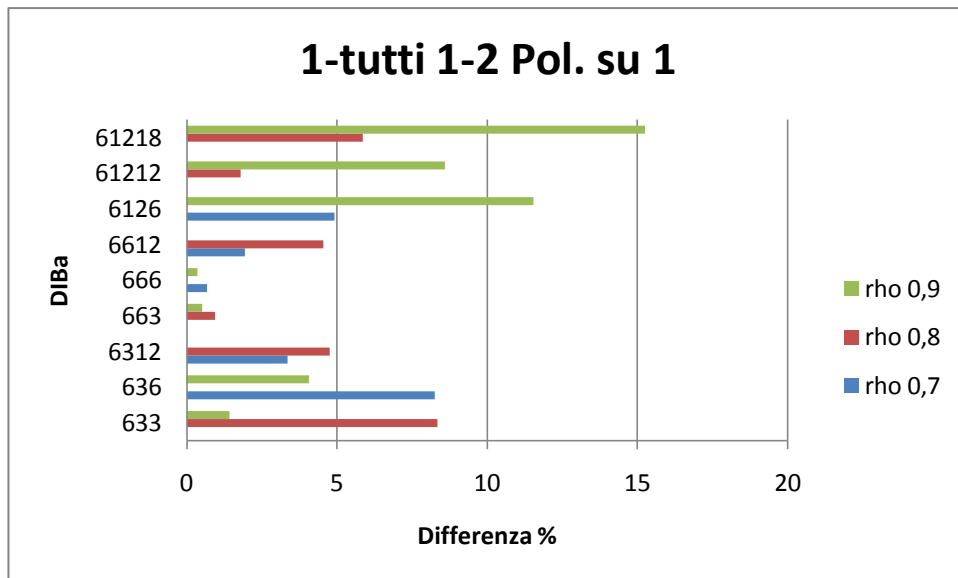


fig. 54

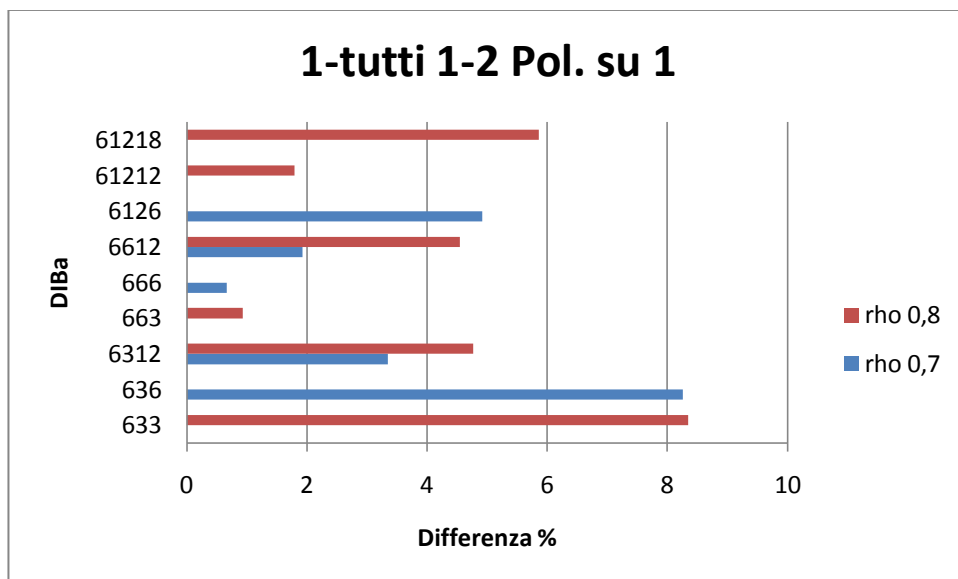


fig. 55

In questo caso si consiglia l'uso di rho=0,7. Per 636 è necessario l'uso di rho=0,8 (8,3%), mentre per 6126 i cui si ha una differenza di 4,9% si può valutare se utilizzare 0,7 o optare per 0,8, valore che fornisce il risultato migliore.

Grado di comunanza 1-tutti 1-tutti:

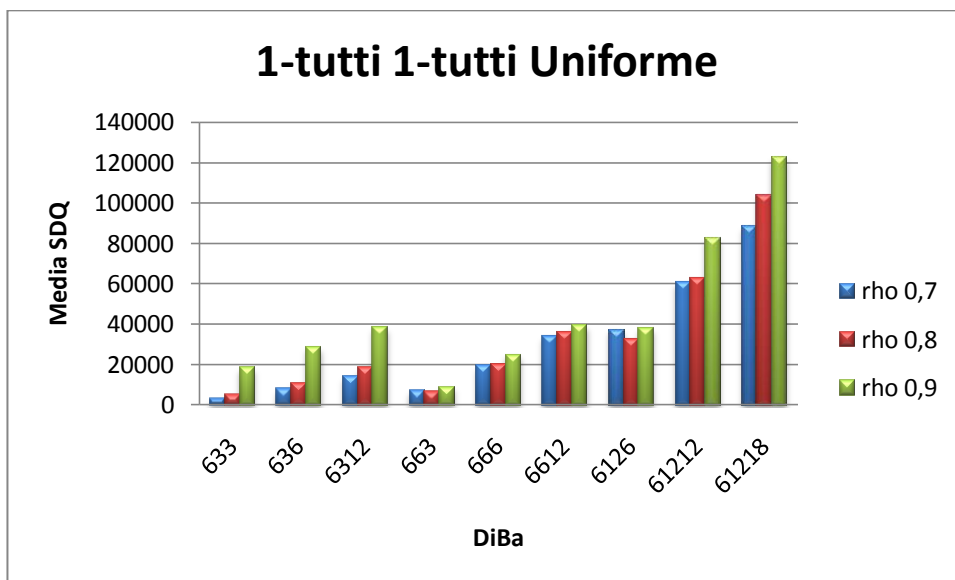


fig. 56

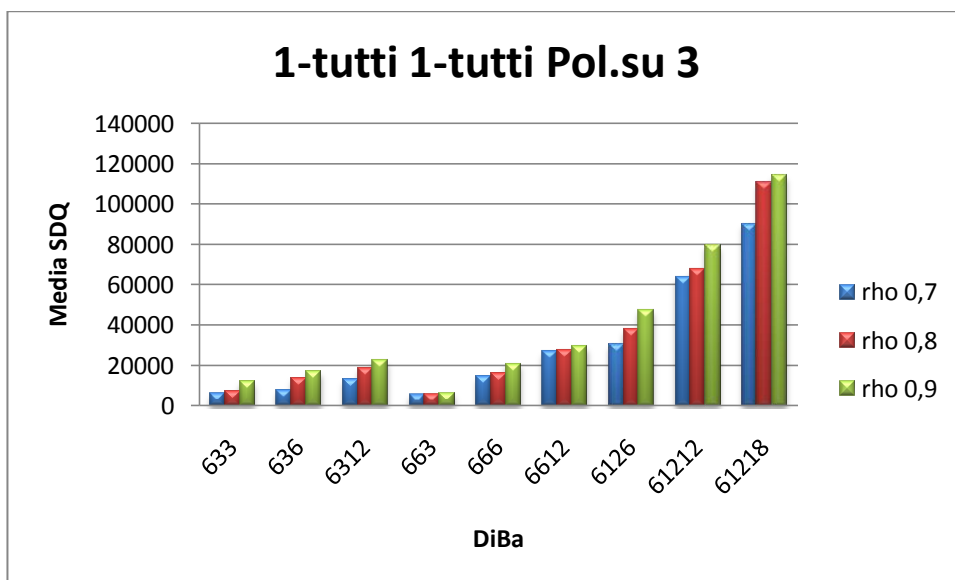


fig. 57

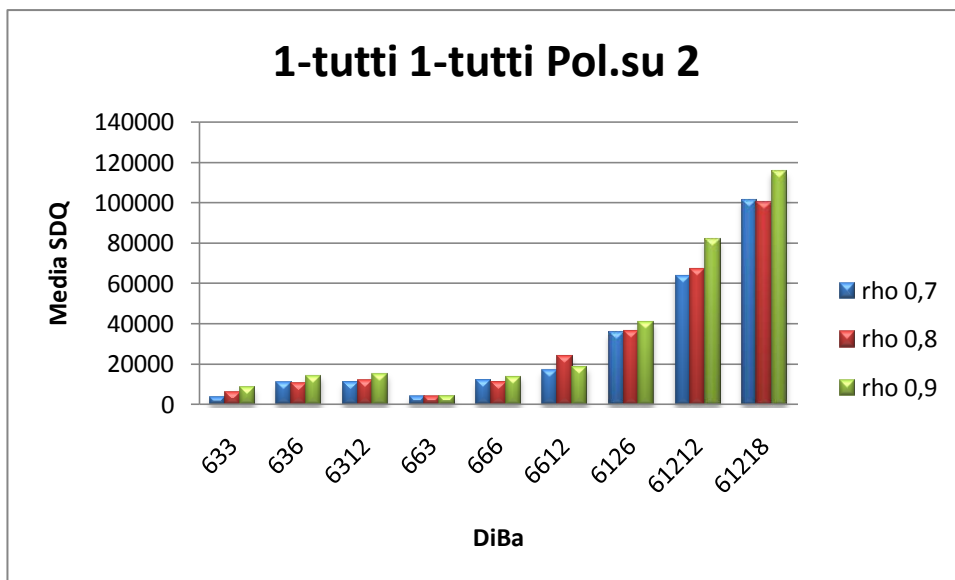


fig. 58

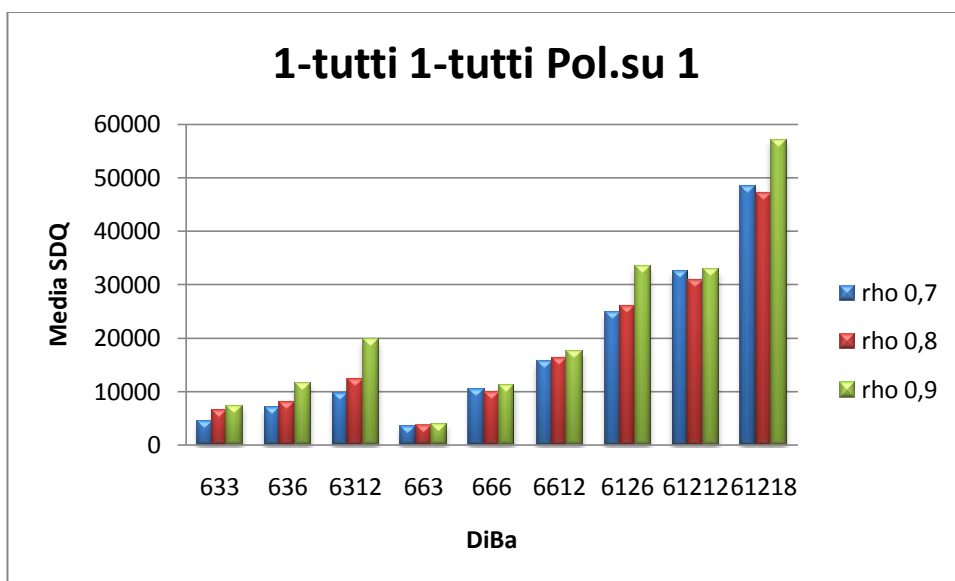


fig. 59

Anche le sperimentazioni effettuate con grado di comunanza 1-tutti 1-tutti mostrano una tendenza crescente dei valori di SDQ all'aumentare della complessità della Distinta Base. Si può notare in questo caso, più marcatamente rispetto ai casi precedenti, come i risultati ottenuti con rho pari a 0,9 siano maggiori rispetto a quelli ottenuti con rho pari a 0,7 o 0,8. L'analisi delle differenze percentuali viene mostrata dai seguenti grafici.

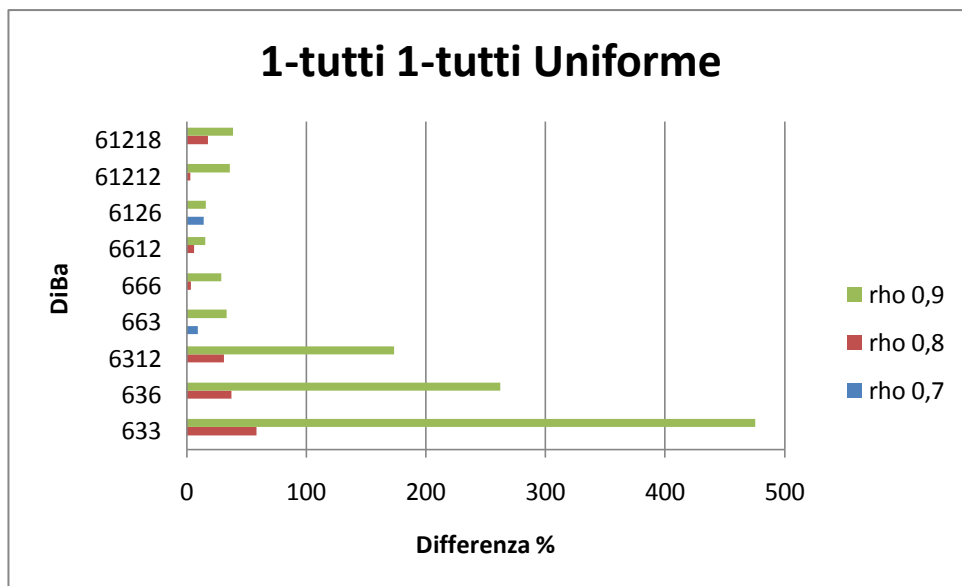


fig. 60

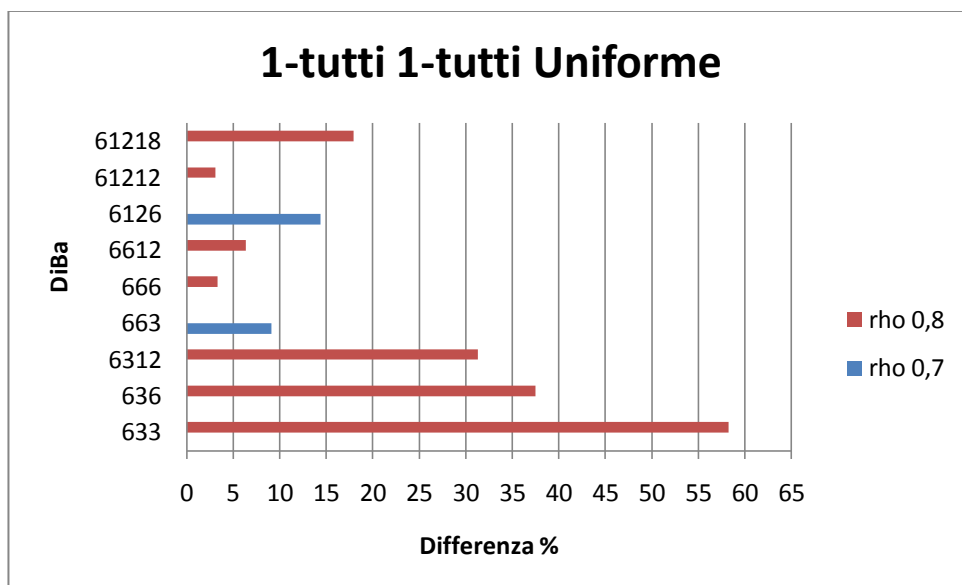


fig. 61

Risulta evidente come la scelta debba rivadere su $\rho=0,7$ e come questa sia una scelta non percorribile solo per 663 e 6126 , rispettivamente 9,1% e 14,3% di differenza rispetto alla migliore scelta se venisse utilizzato $\rho=0,7$; per entrambe le Distinte Base è preferibile quindi usare $\rho=0,8$.

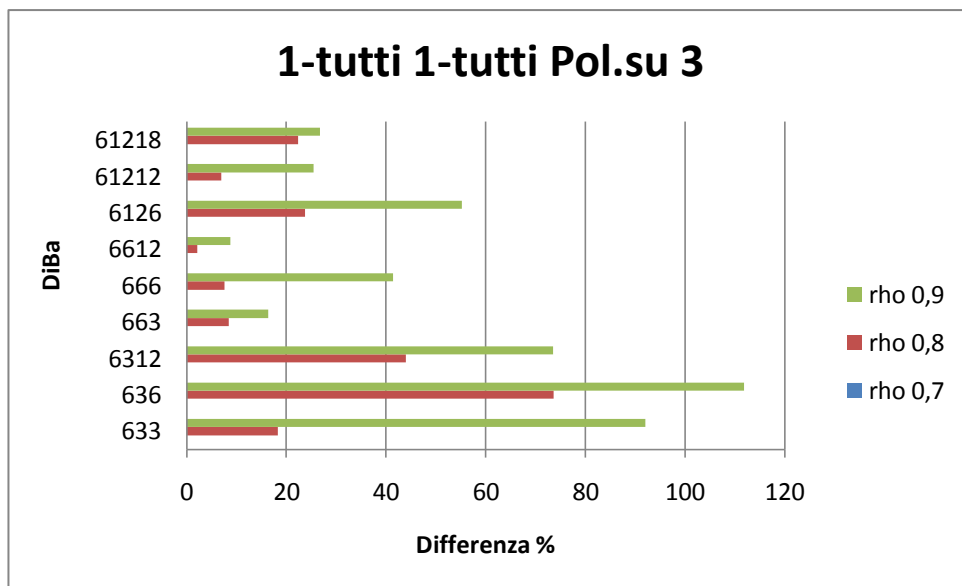


fig. 62

Osservando il grafico si nota la completa assenza di istogrammi rappresentanti il valore rho=0,7 il che indica, che per ogni Distinta Base l'utilizzo di tale valore porta all'ottenimento del risultato migliore possibile.

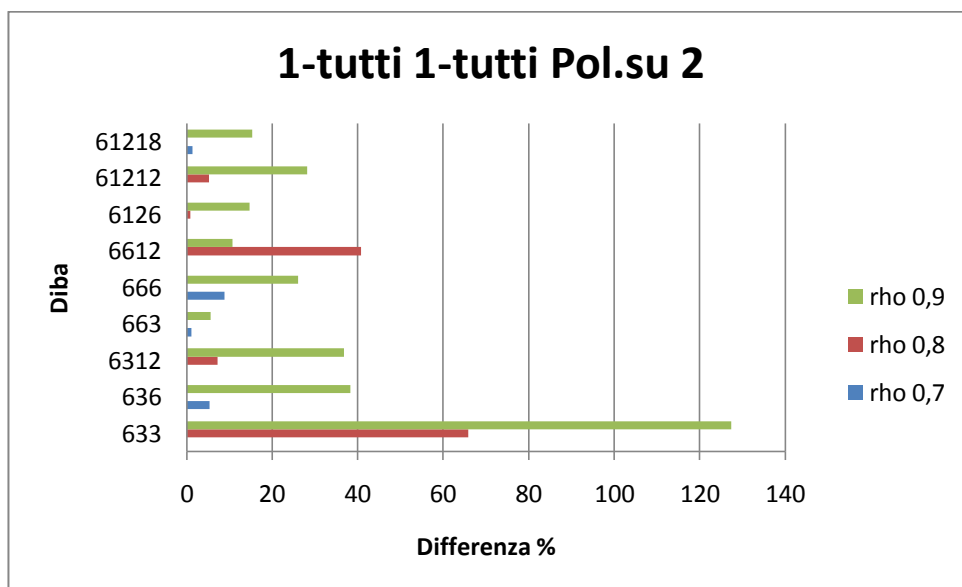


fig. 63

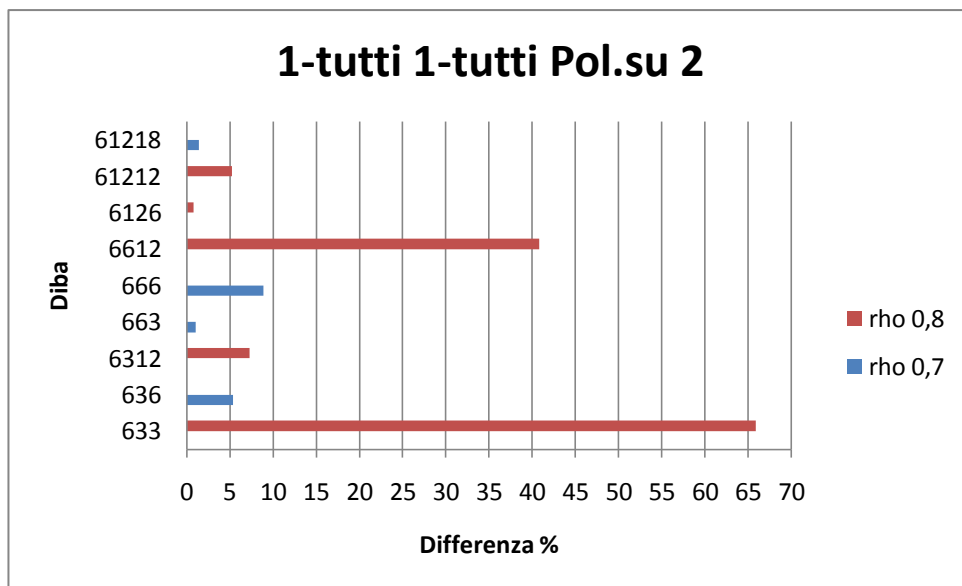


fig. 64

Il valore da scegliere risulta anche in questo caso 0,7 , ad eccezione che per 636 (5,4%) e 666 (8,86%), per i quali è preferibile un valore di rho pari 0,8.

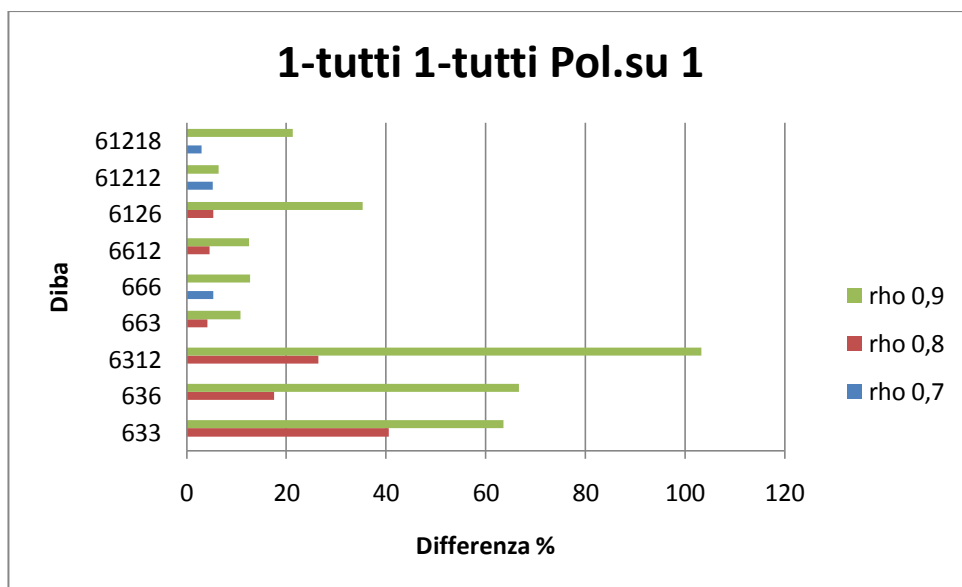


fig. 65

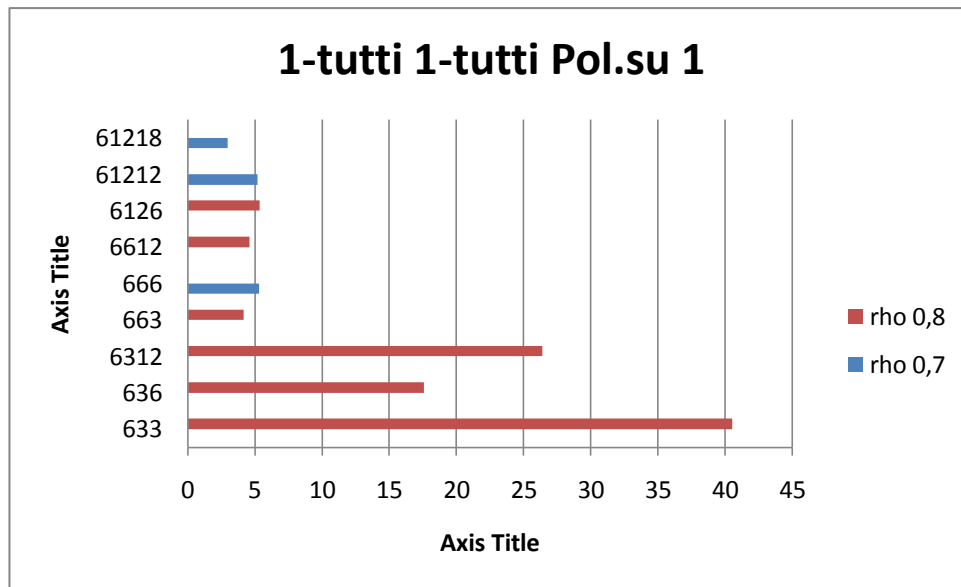


fig. 66

Le Distinte Base 666 e 61212 sono le uniche per le quali è consigliabile l'utilizzo di $\rho=0,8$, avendo rispettivamente 5,3% e 5,2% di errore nel caso in cui venisse utilizzato $\rho=0,7$, valore consigliato per tutti gli altri casi.

5.4 Confronto tra MMAS e ACO

Evidenziati i casi per i quali è preferibile l'utilizzo di un determinato valore di ρ piuttosto che un altro, l'analisi si è incentrata sul paragone tra i risultati ottenuti tramite l'MMAS in confronto con i dati di riferimento ottenuti tramite l'algoritmo ACO. Lo scopo del presente lavoro è infatti quello di confermare la bontà dell'algoritmo MMAS nei confronti dell'ACO, e di verificare se in un contesto mixed-model ciò valga a prescindere dalla Distinta Base considerata. Sono stati quindi presi i valori delle medie, relativi ad ogni tipologia di Distinta Base, corrispondenti al valore di ρ scelto con il metodo spiegato nel paragrafo 5.3; tale

valore è stato quindi confrontato con il corrispettivo trovato tramite l'algoritmo ACO e ne è stata calcolata la differenza percentuale utilizzando il metodo espresso nel paragrafo 4.2 .

I grafici presentati mettono in evidenza con degli istogrammi le differenze tra MMAS e ACO per ogni tipologia di Comunanza e Distinta Base, prima solo qualitativamente e poi quantitativamente tramite il calcolo delle differenze percentuali dei risultati trovati coi due algoritmi. La seconda tipologia di grafici rende chiaro e facilmente comprensibile in quali casi sia preferibile un metodo all'altro, oltre che dare un valore oggettivo a tale differenza.

Comunanza 1-2 1-2:

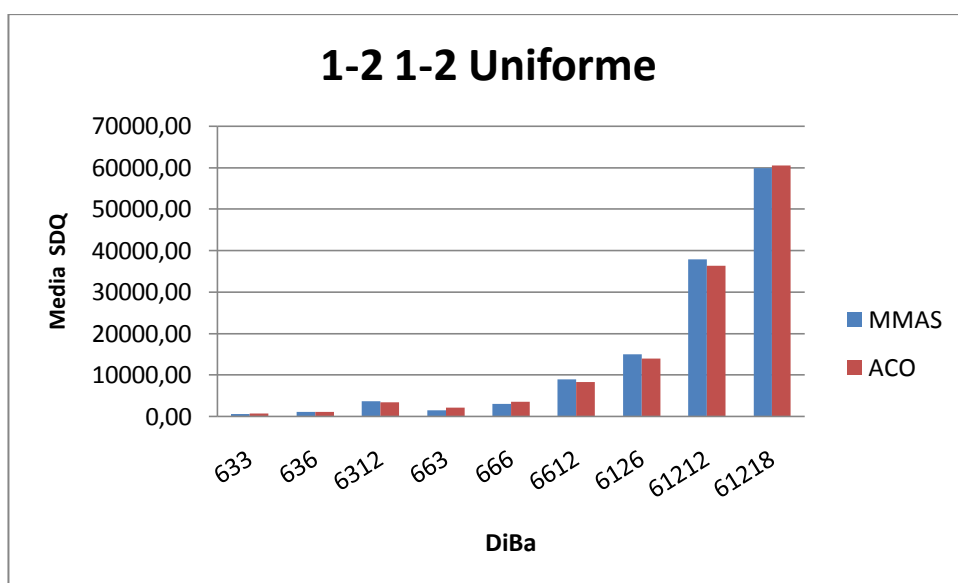


fig. 67

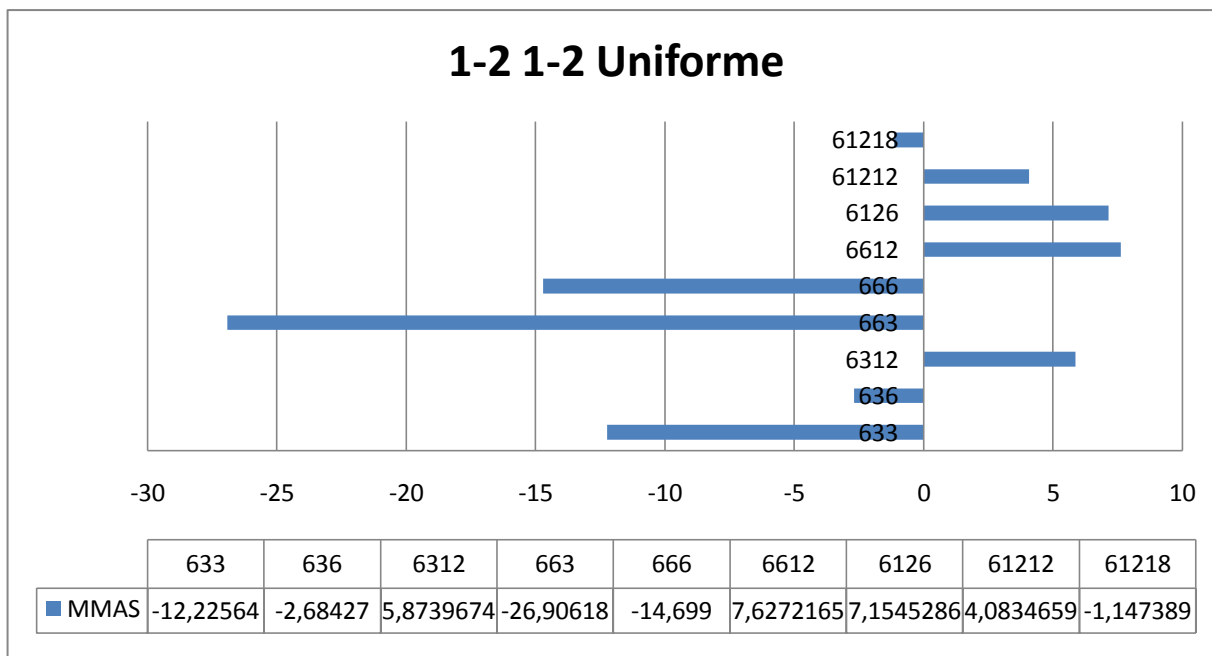


fig. 68

Risulta evidente come MMAS migliori i risultati di ACO con 633, 636, 663, 666, 61218, mentre negli altri casi ACO, seppur di poco, ottiene risultati migliori.

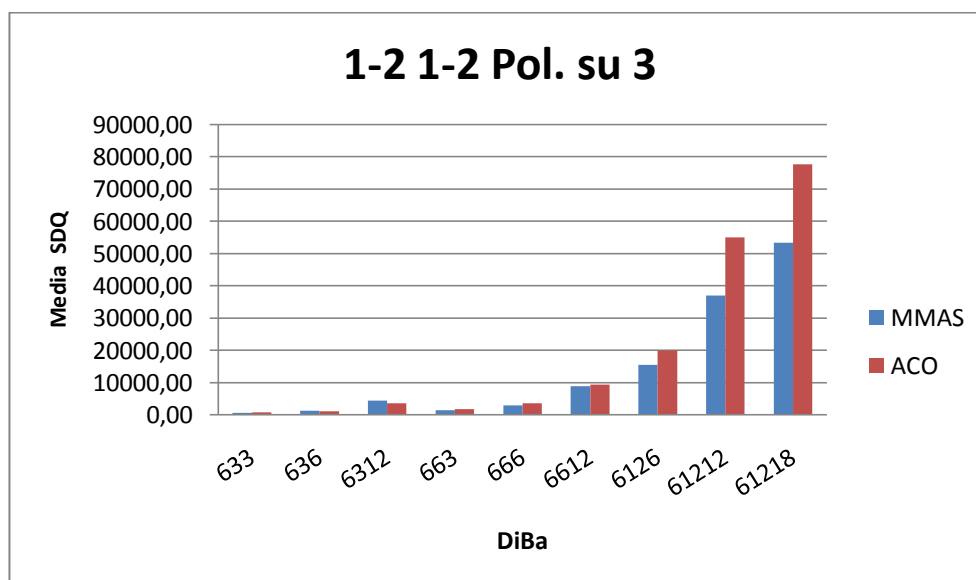


fig. 69

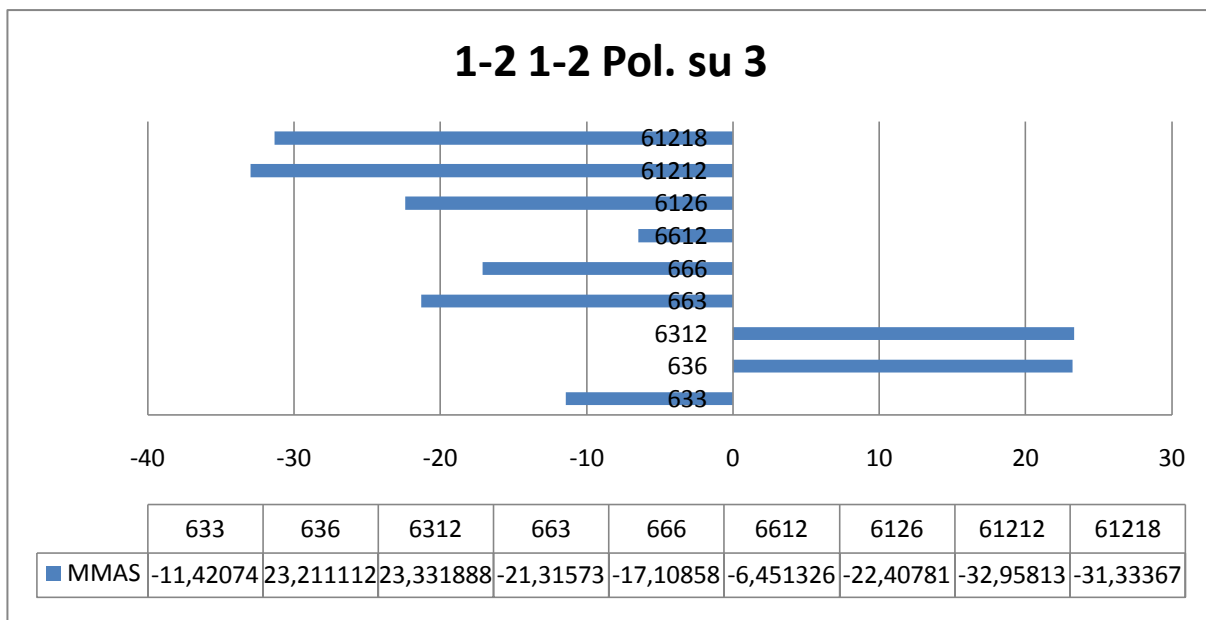


fig. 70

MMAS ottiene risultati migliori di ACO in molti dei casi considerati, raggiungendo differenze anche superiori al 30%.

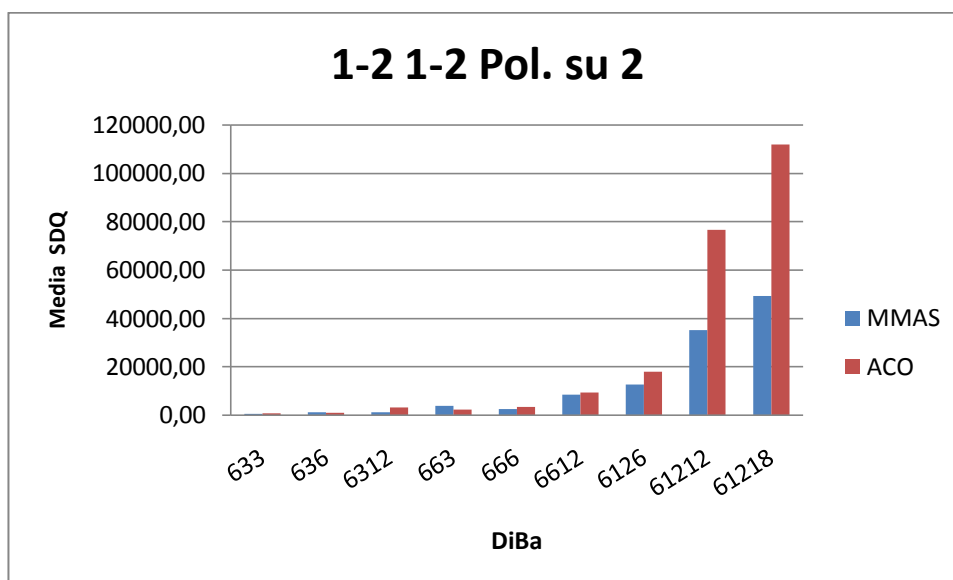


fig. 71

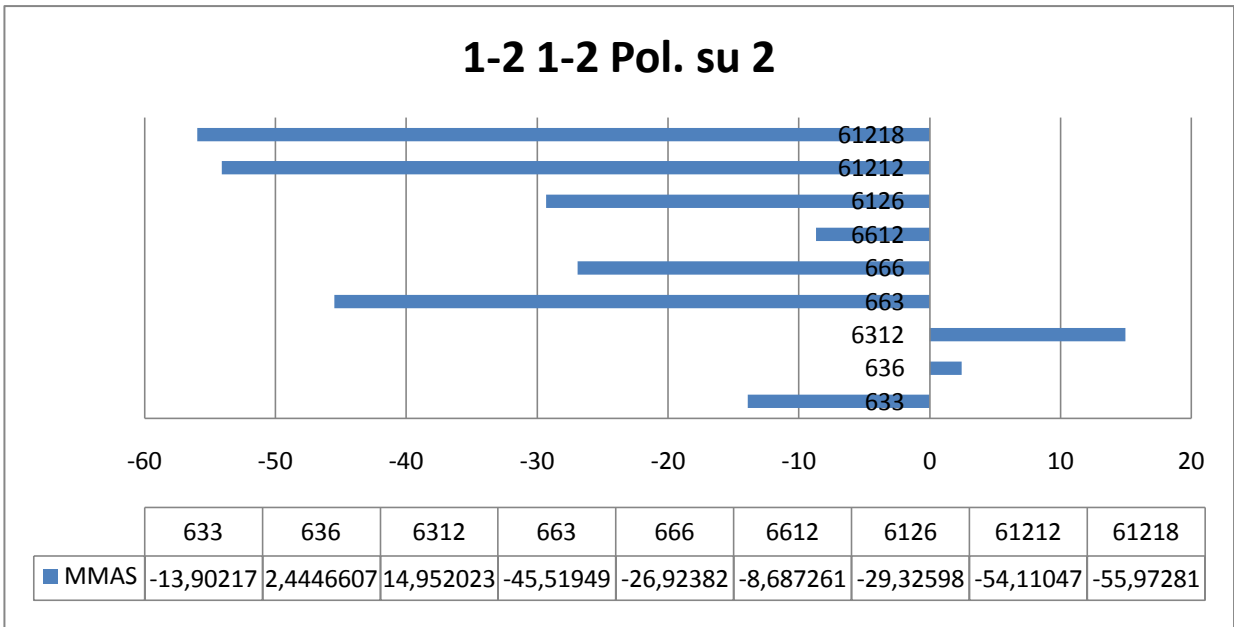


fig. 72

MMAS migliora notevolmente i risultati di ACO, tranne che per 636 e 6312 per i quali l'algoritmo, pur trovando una convergenza nei risultati, ottiene dei valori superiori.

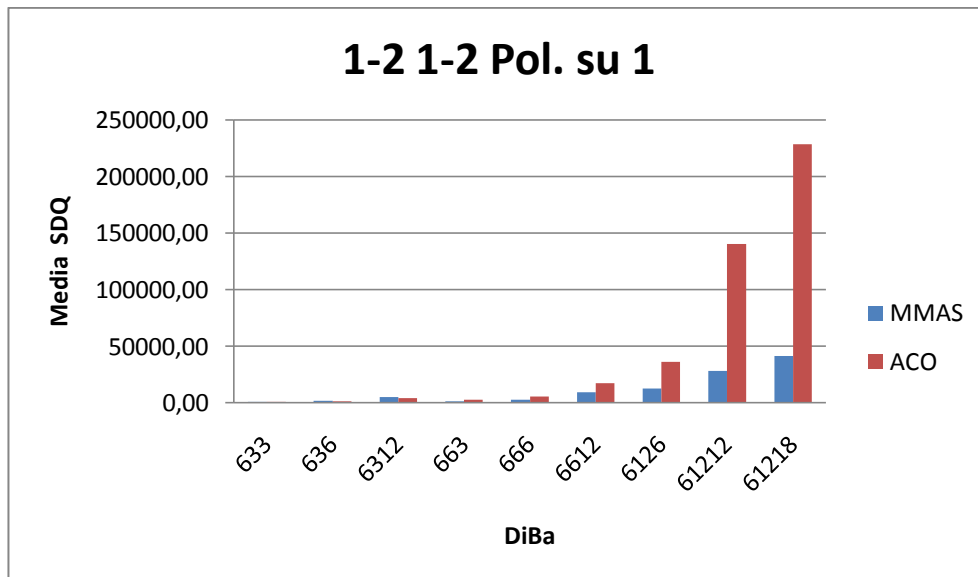


fig. 73

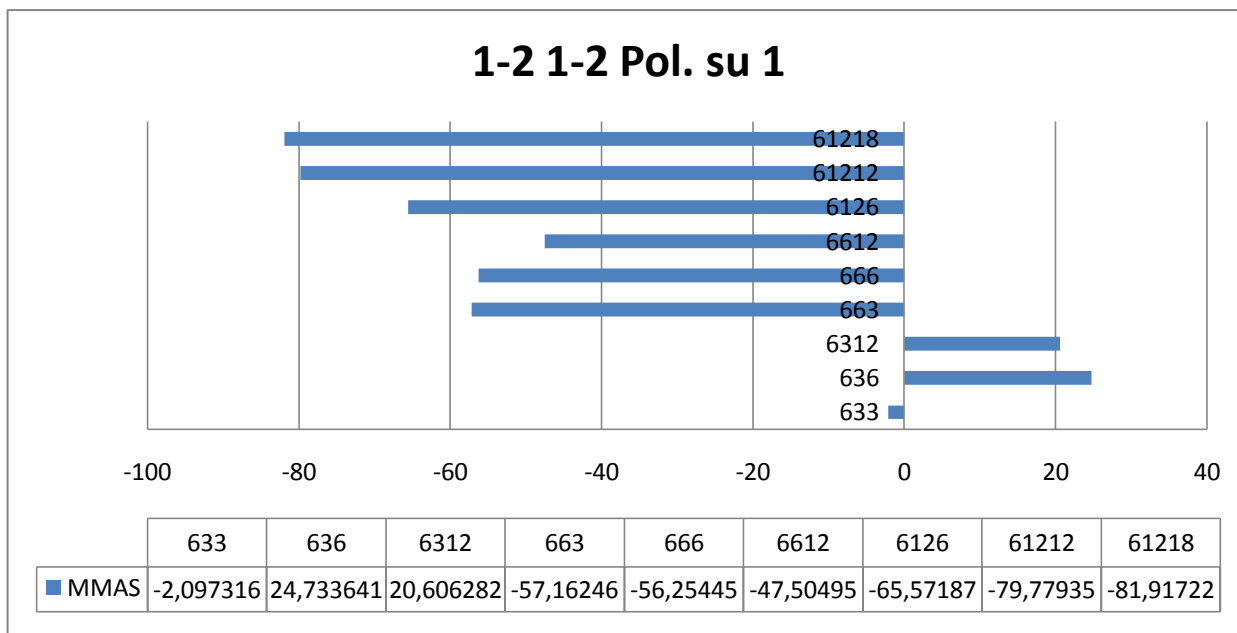


fig. 74

Anche in quest'ultimo caso 636 e 6312 sono gli unici casi in cui l'algorithmo MMAS non riesce a prevalere su ACO.

L'osservazione dei grafici riferiti al grado di comunanza 1-2 1-2 fa capire come vi siano delle condizioni per le quali MMAS ottiene risultati migliori di ACO sempre, mentre ve ne siano altre in cui alternativamente l'uno prevale sull'altro. Si può però notare come all'aumentare della difficoltà delle Dostinta Base aumenti il divario tra i risultati in relazione soprattutto della crescita della polarizzazione della domanda. Le tabelle presenti nei grafici figg.(68-70-72-74) mostrano il divario in percentuale tra i due algoritmi: i valori negativi indicano la percentuale di miglioramento apportata dall'algorithmo MMAS rispetto ad ACO, che è il valore di riferimento utilizzato per il calcolo delle differenze.

Comunanza 1-2 1-tutti:

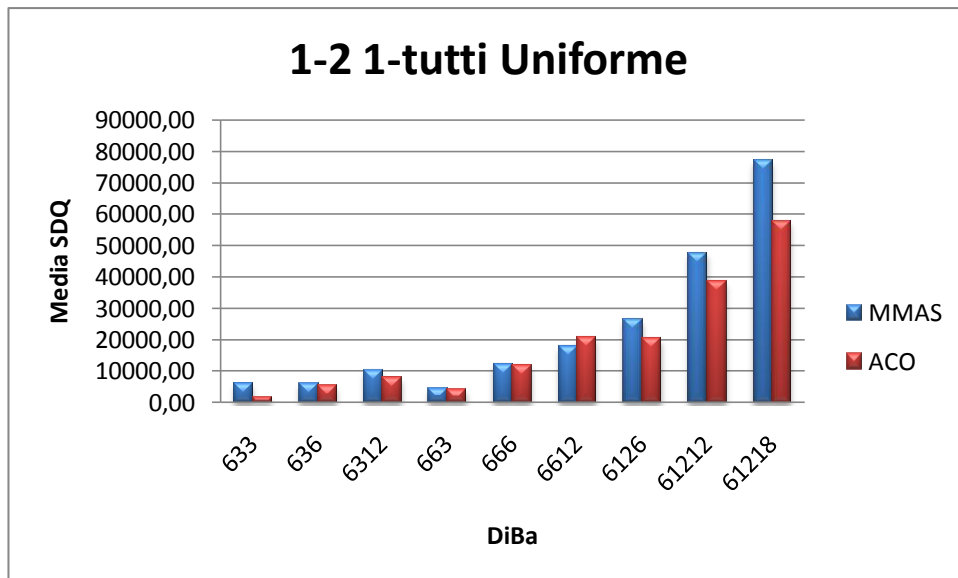


fig. 75

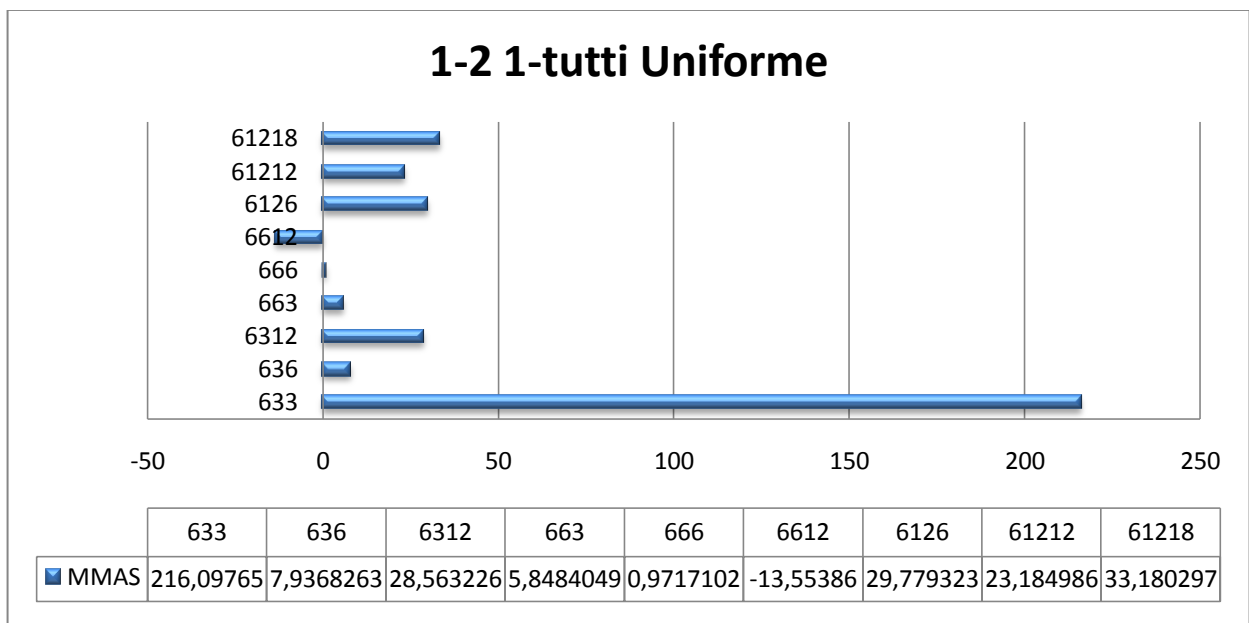


fig. 76

Solo nel caso della Distinta Base 6612 l’algoritmo trova una soluzione migliore rispetto ad ACO, sottolineando la bontà dell’algoritmo con cui ci si sta confrontando. La differenza di 633 molto elevata non trova facile spiegazione, ma si osserva come in presenza di pochi elementi tra i sottoassiemi e i componenti, l’algoritmo abbia con questa configurazione difficoltà a trovare una convergenza dei risultati.

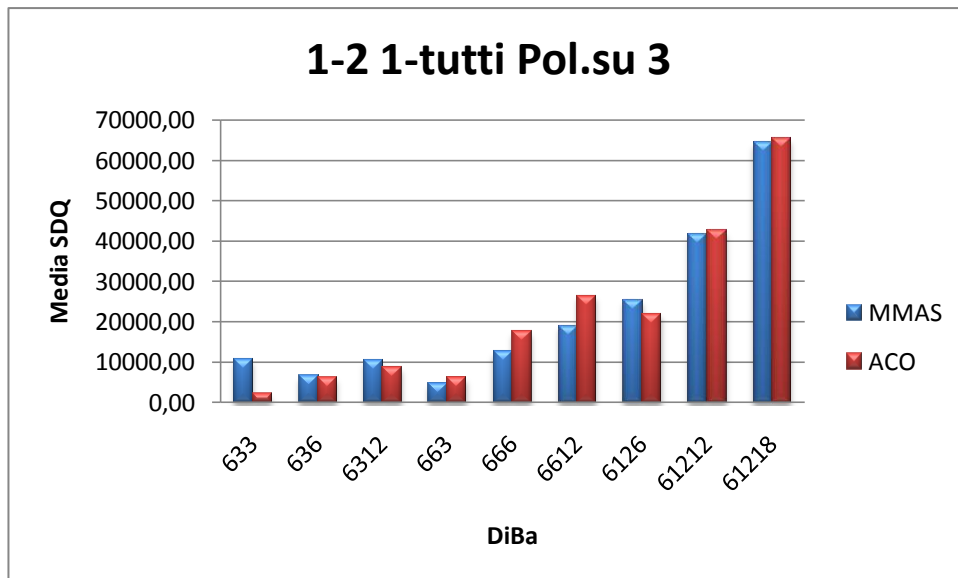


fig. 77

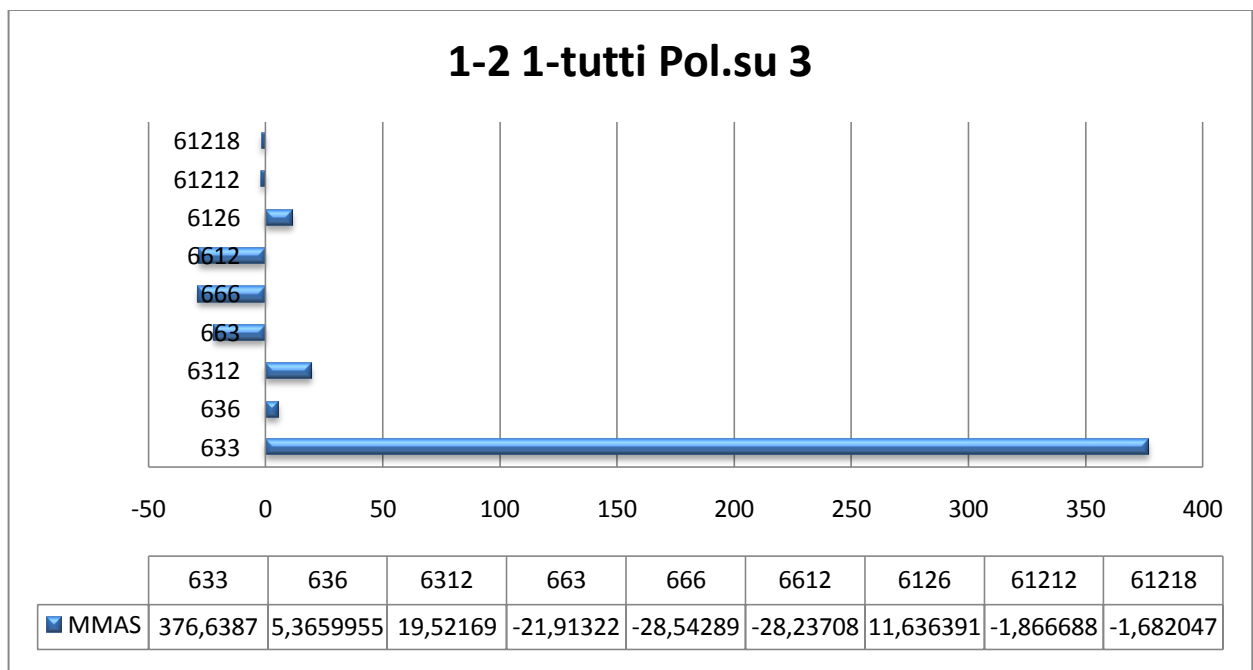


fig. 78

Con una domanda leggermente polarizzata si iniziano ad ottenere dei risultati a favore di MMAS, soprattutto per Distinte Base piuttosto complesse.

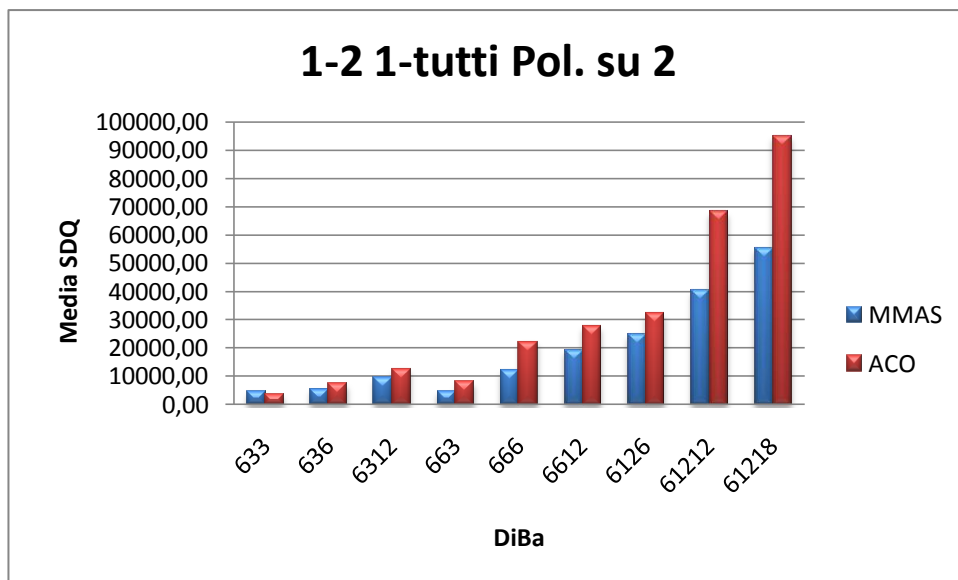


fig. 79

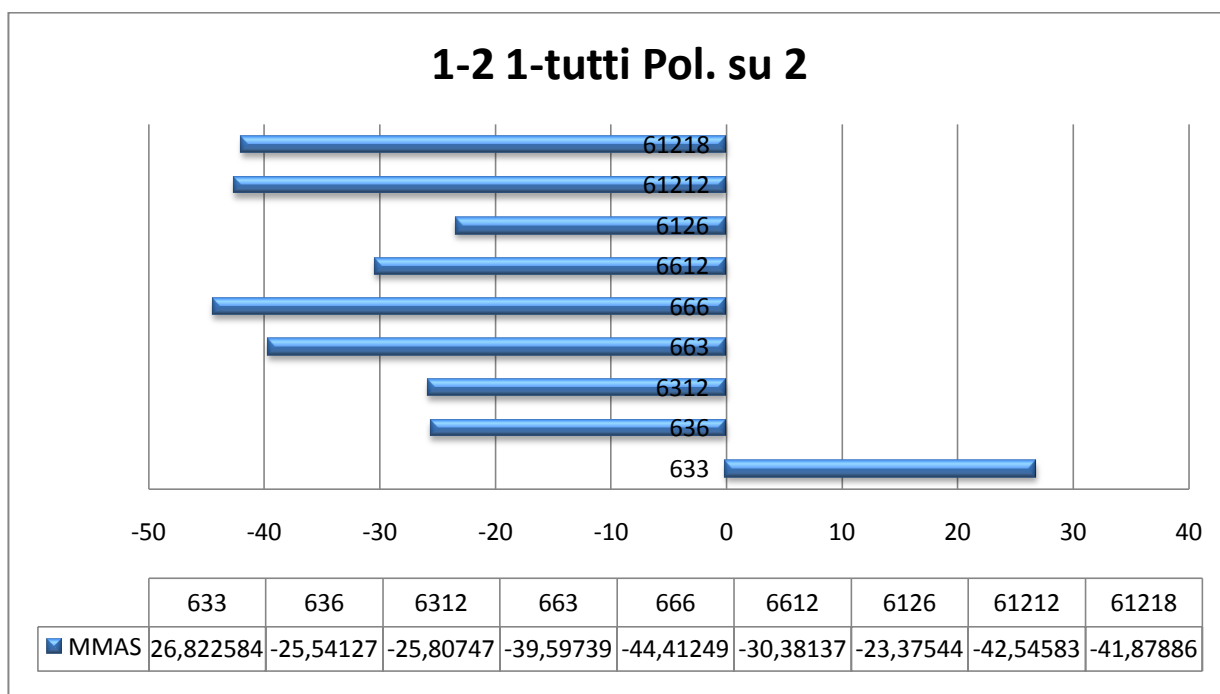


fig. 80

Aumentando il grado di polarizzazione si nota come l'algoritmo MMAS risponda meglio rispetto che a MMAS, e ne caso in esame ciò avviene per tutte le tipologie di distinta base ad eccezione che per 663.

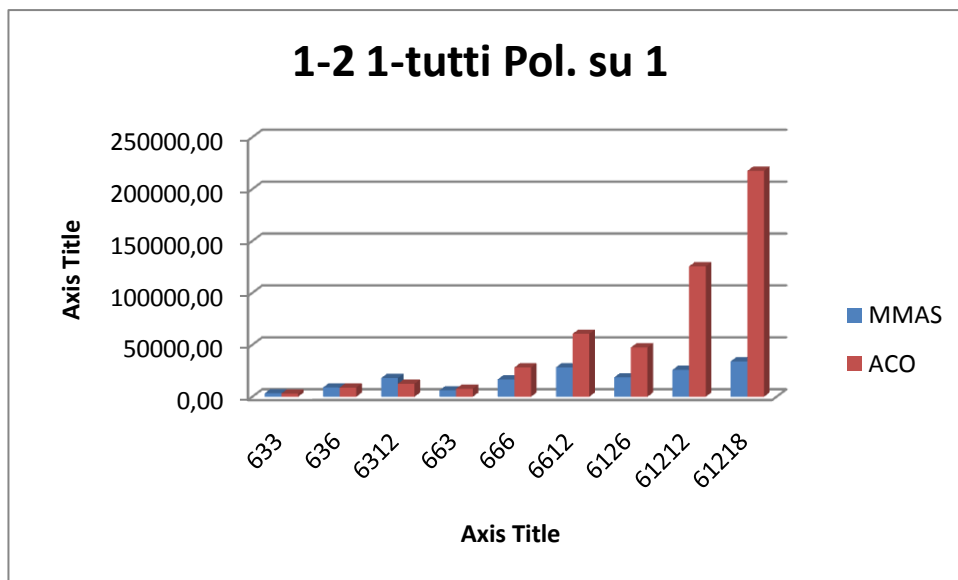


fig. 81

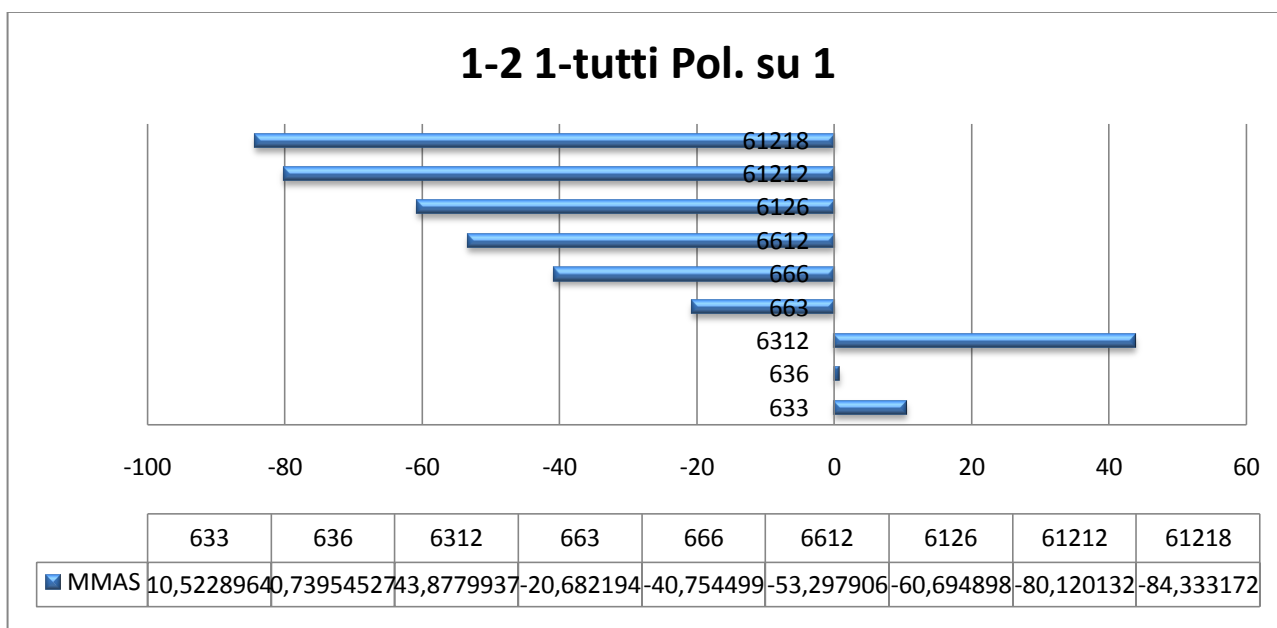


fig. 82

Con quest'ultima tipologia si nota come, sebbene il conteggio delle Distinte Base a favore dell'algoritmo MMAS sia inferiore rispetto che al grado di polarizzazione su 2 prodotti, i valori relativi alle differenze percentuali sono molto più elevati a confermare il trend dell'algoritmo a fornire risultati migliori al crescere della complessità del problema ma anche della polarizzazione.

Comunanza 1-tutti 1-2:

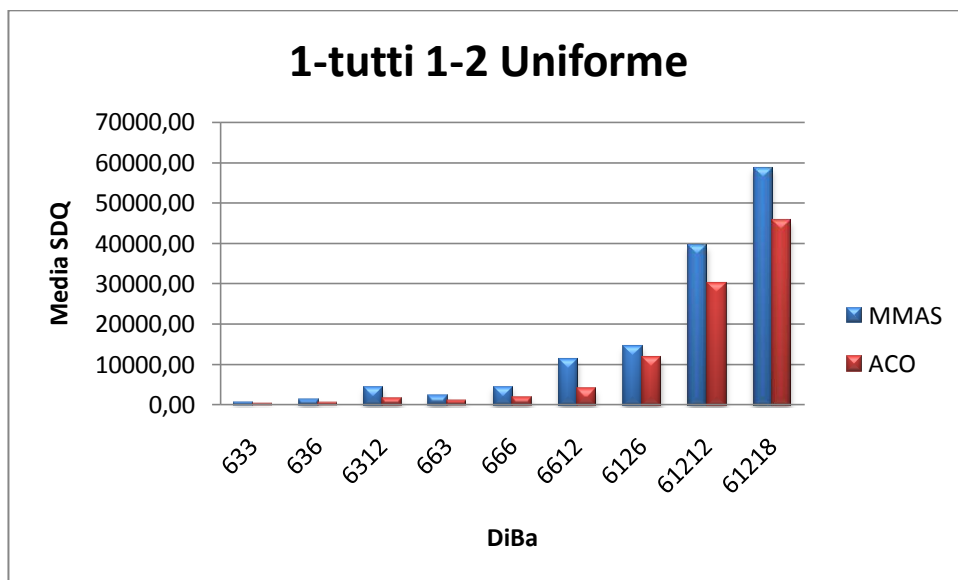


fig. 83

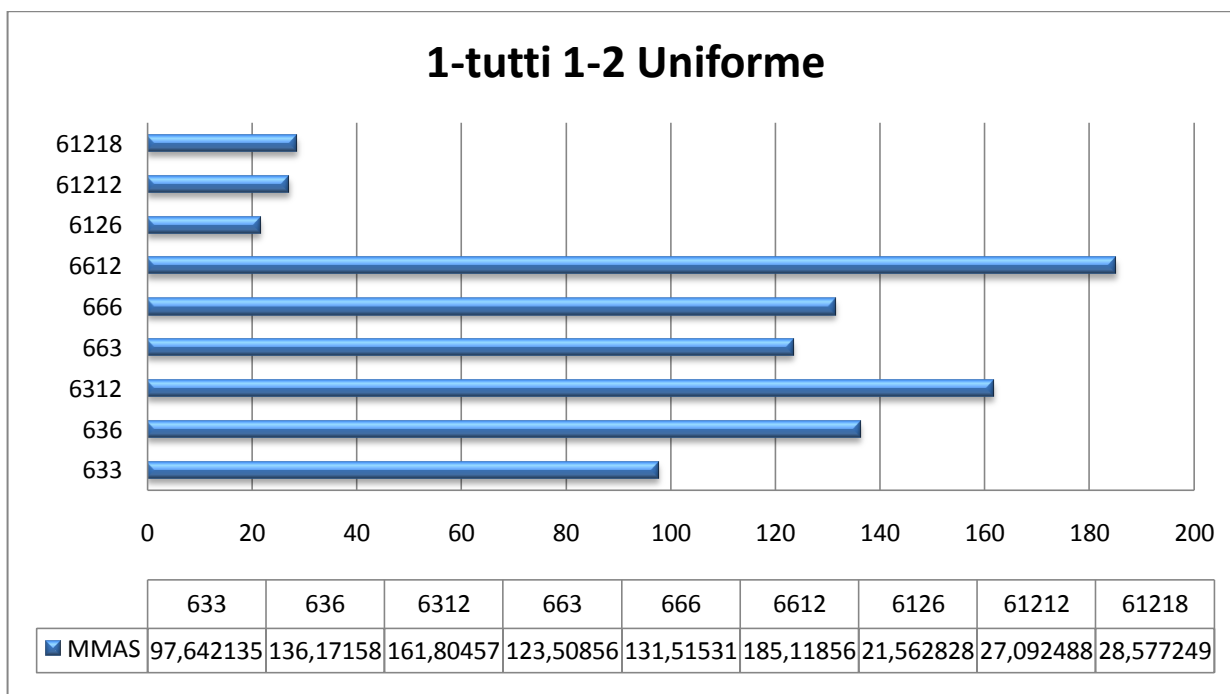


fig. 84

Risulta evidente come in questo caso l'uso di ACO risulti sempre migliore di MMAS.

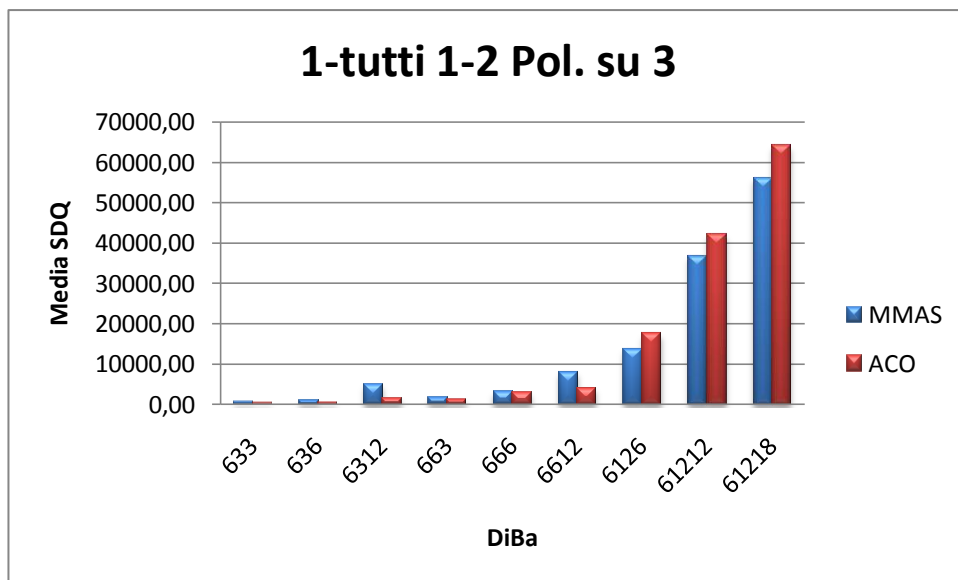


fig. 85

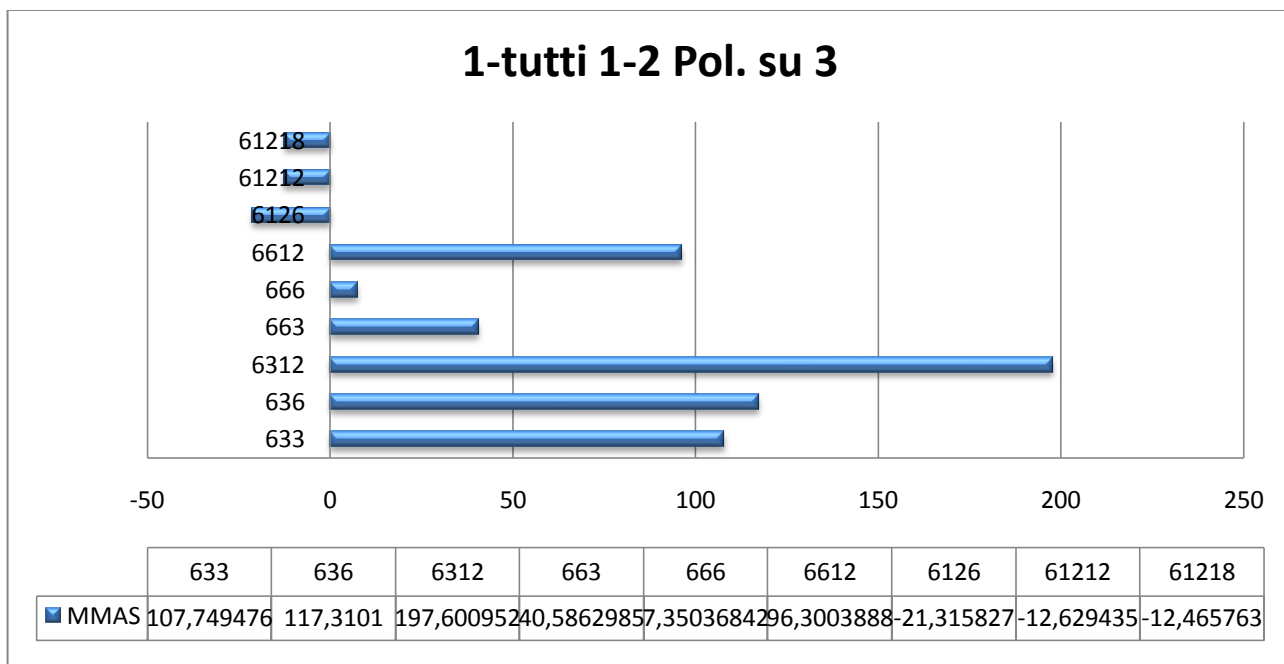


fig. 86

L'algoritmo MMAS riesce a fornire dei buoni risultati per le Distinte Base più complesse, situazioni nelle quali, come si può osservare dai risultati grafici posti in allegato, l'algoritmo riesca ad arrivare facilmente a convergenza.

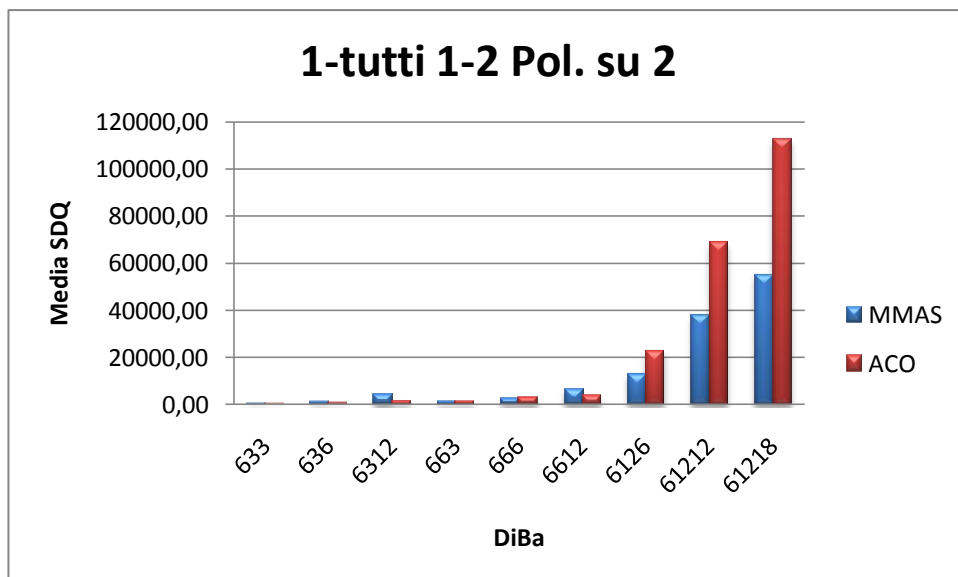


fig. 87

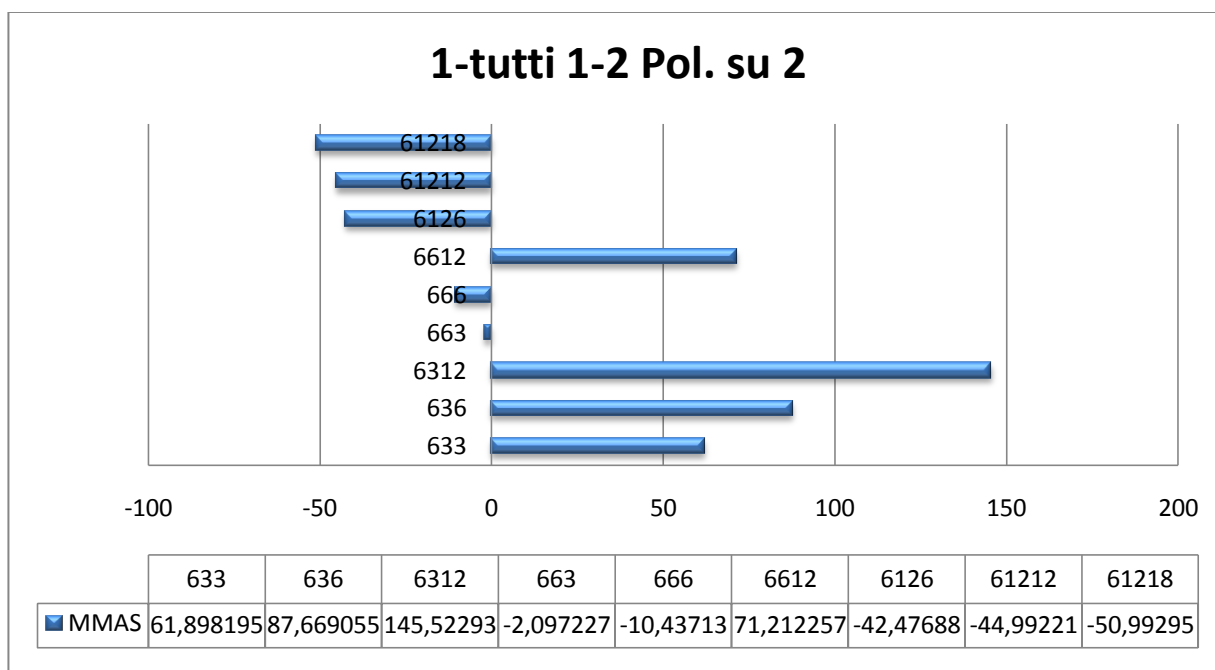


fig. 88

Ad eccezione che per 6612 si può notare come da un certo grado di complessità in poi l'algoritmo MMAS fornisca i risultati migliori, i quali crescono di numero all'aumentare della polarizzazione come sempre accaduto fino ad ora.

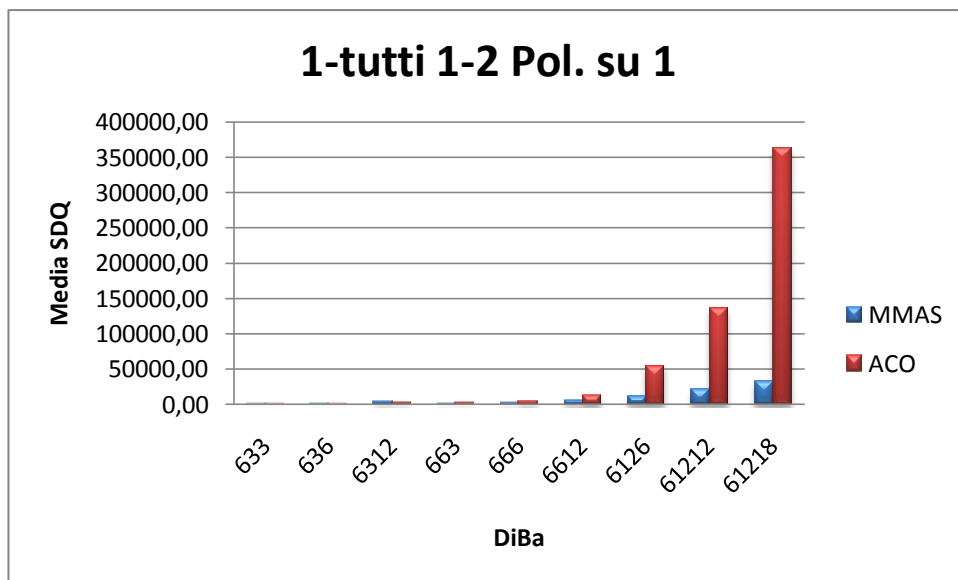


fig. 89

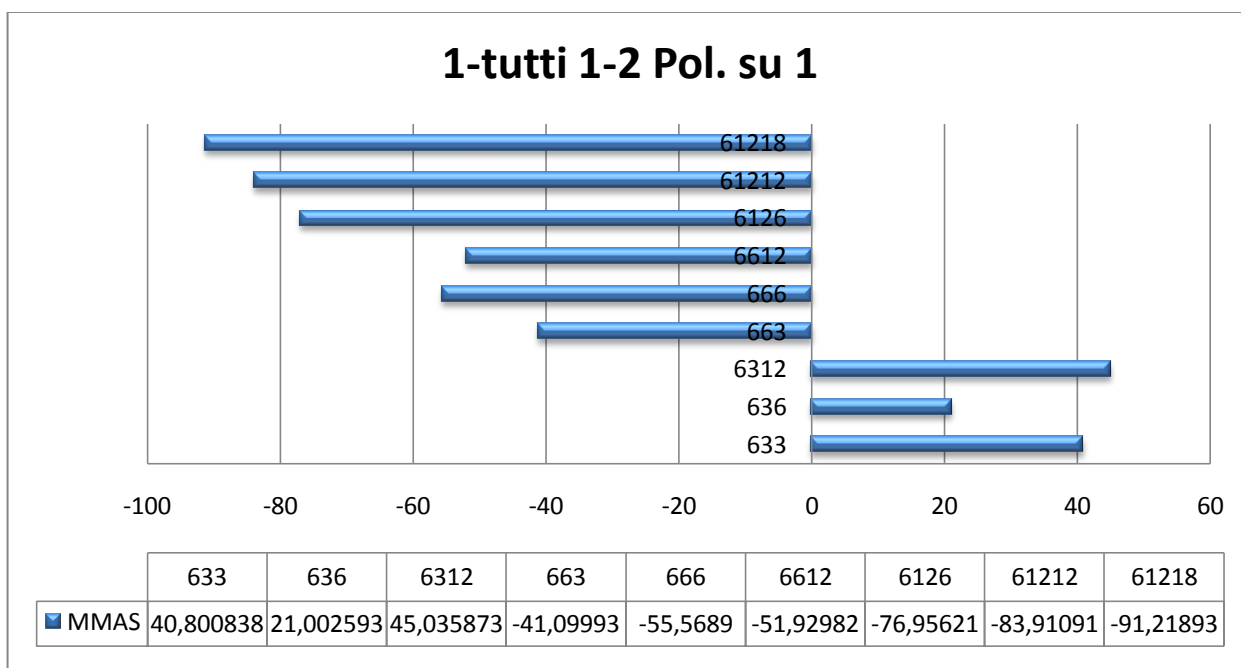


fig. 90

In questo caso la distinzione tra configurazioni favorevoli all’algoritmo MMAS o meno risulta netta, sottolineando ulteriormente come le configurazioni 66i siano poco adatte all’utilizzo di questo algoritmo. Dall’evoluzione delle soluzioni presentata nei grafici in allegato si evince come in quelle situazioni si arrivi difficilmente a convergenza.

Comunanza 1-tutti 1-tutti:

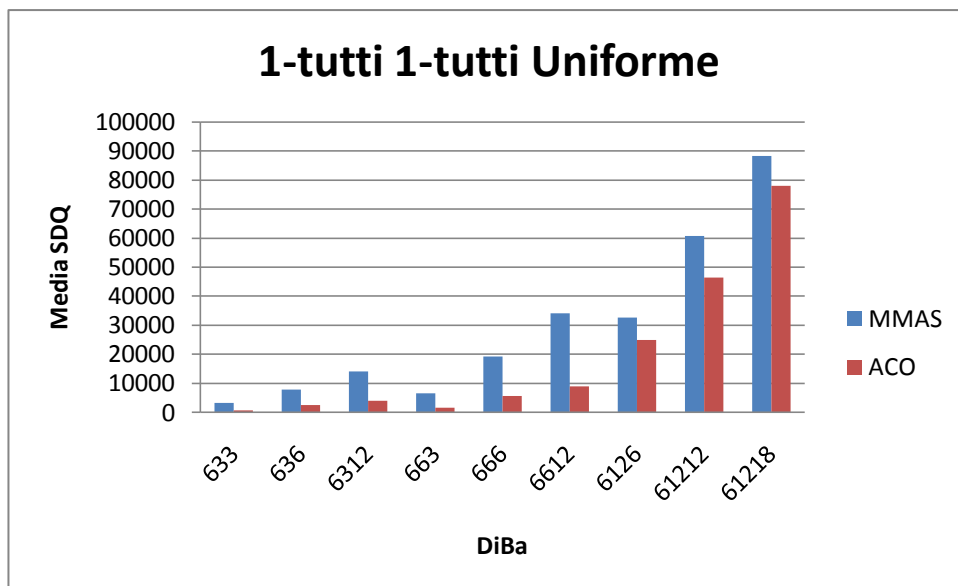


fig. 91

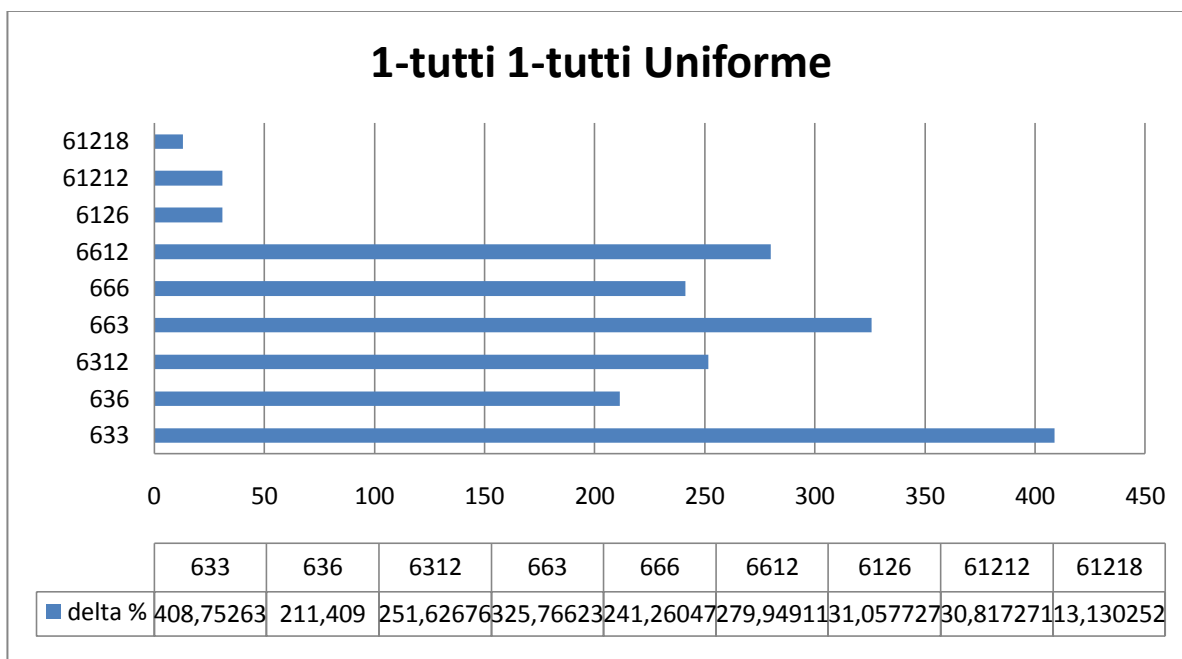


fig. 92

L'algoritmo MMAS non riesce mai in questa configurazione a migliorare i risultati di ACO. I risultati migliori si ottengono con valori di complessità elevati, pur ottenendo risultati peggiori del 13% .

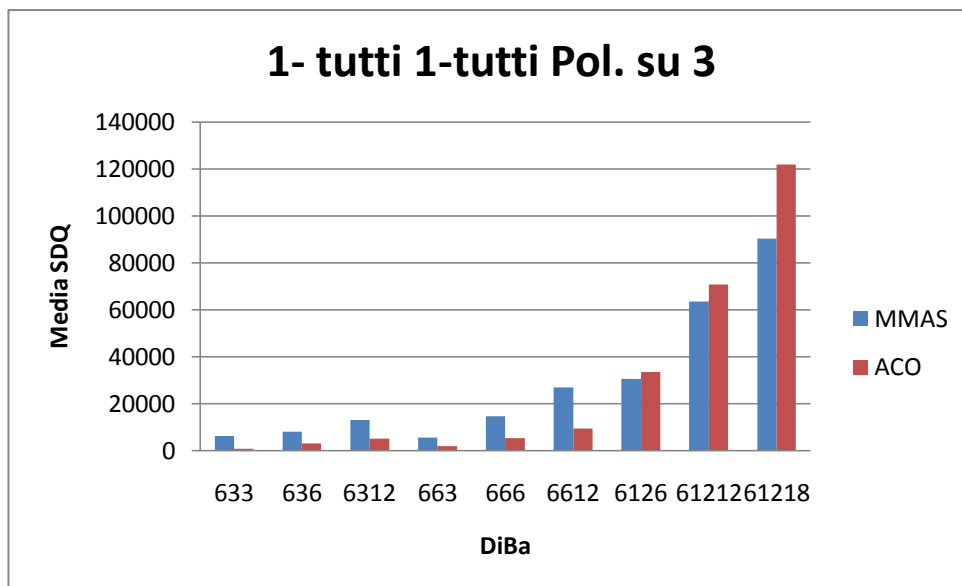


fig. 93

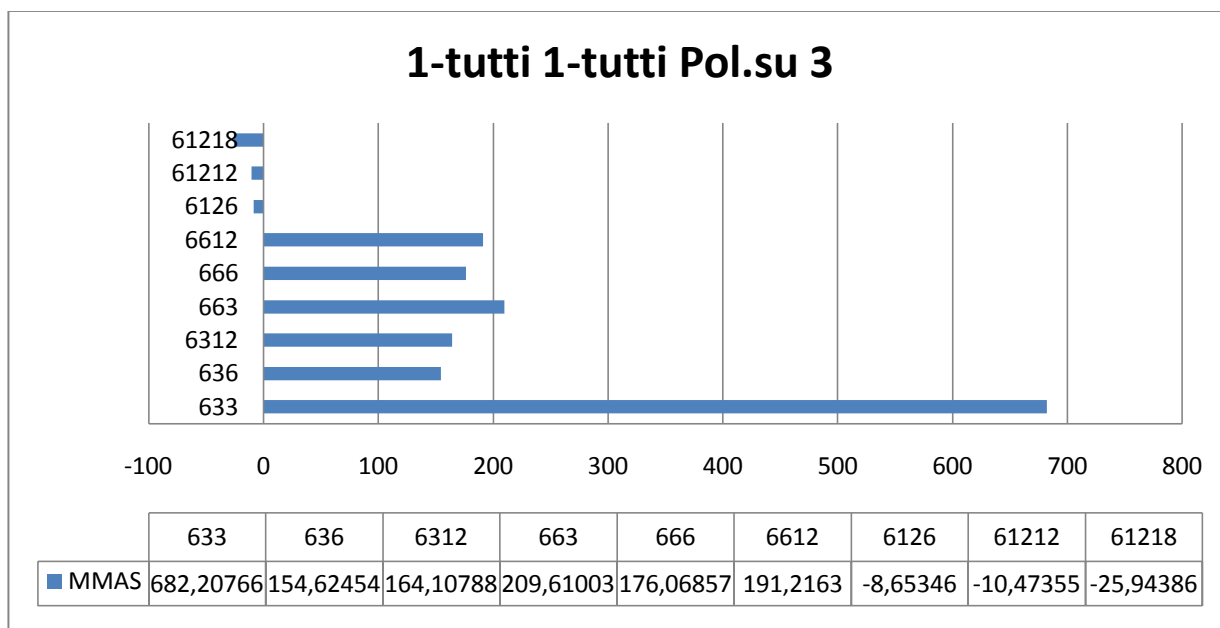


fig. 94

Anche nel caso dell'comunanza 1-tutti 1-tutti, l'aumento della polarizzazione aiuta l'algoritmo MMAS a migliorare i risultati di riferimento. Come risulta chiaro dai valori in tabella si hanno dei miglioramenti che oscillano tra l'8% e il 25%, se si considerano Distinte Base complesse.

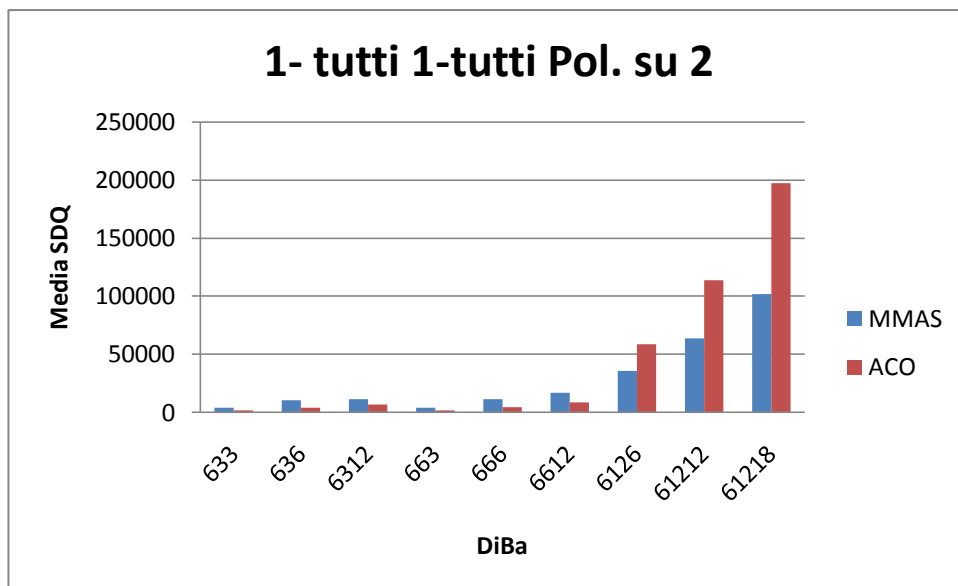


fig. 95

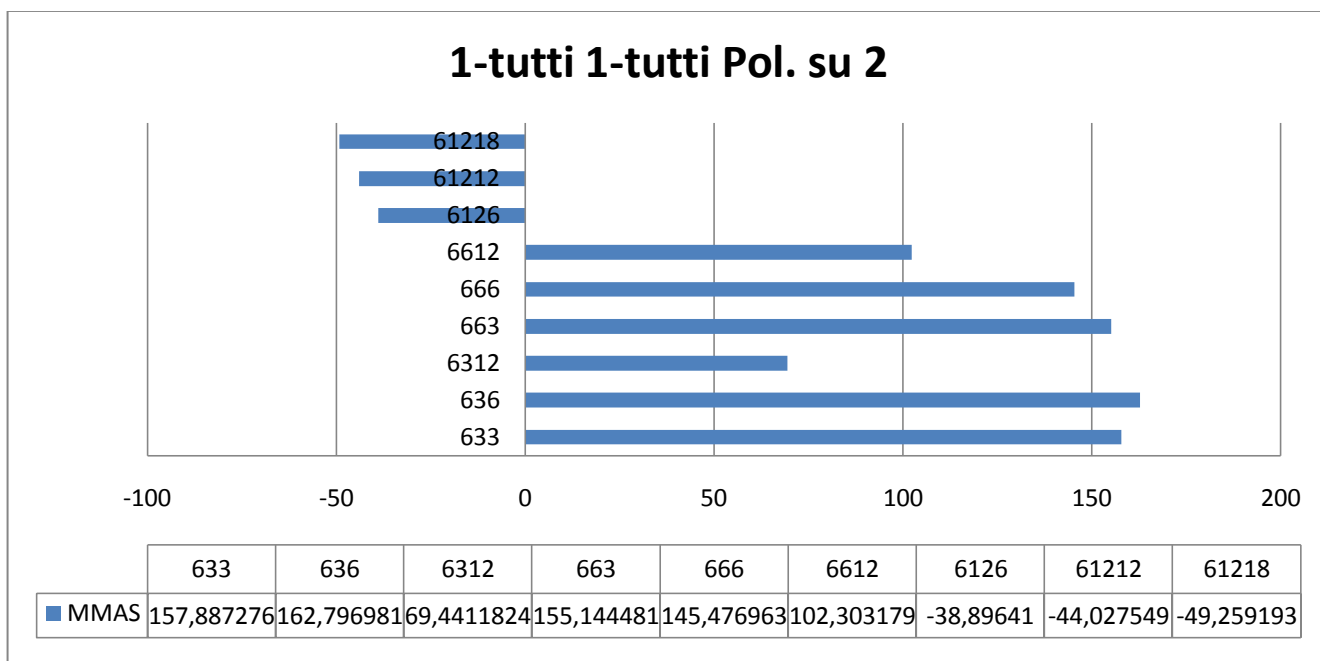


fig. 96

Anche in questa situazione solo i casi più complessi sono favorevoli per un applicazione dell' algoritmo MMAS, ma i benefici sono elevati, dal 38 al 49%.

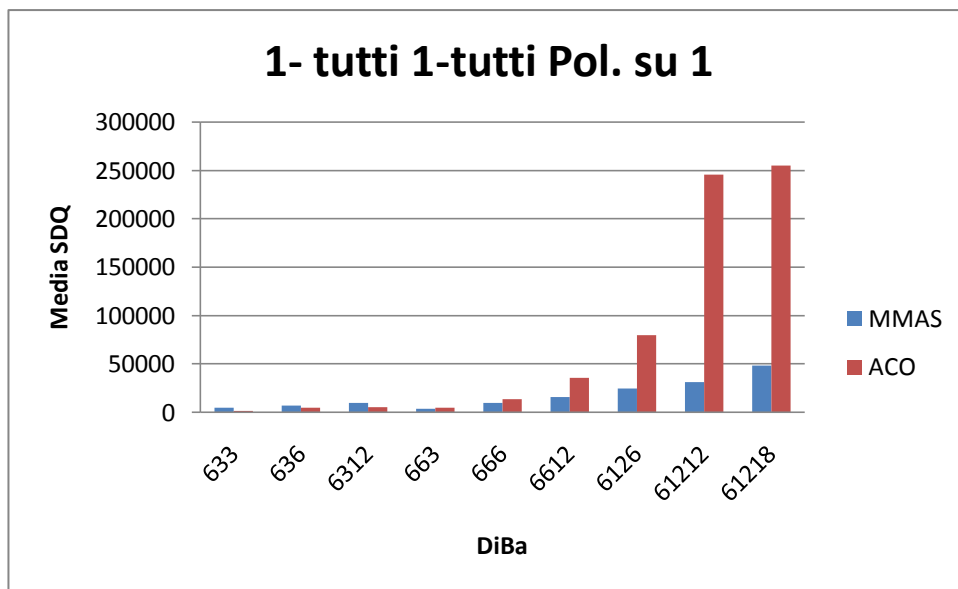


fig. 97

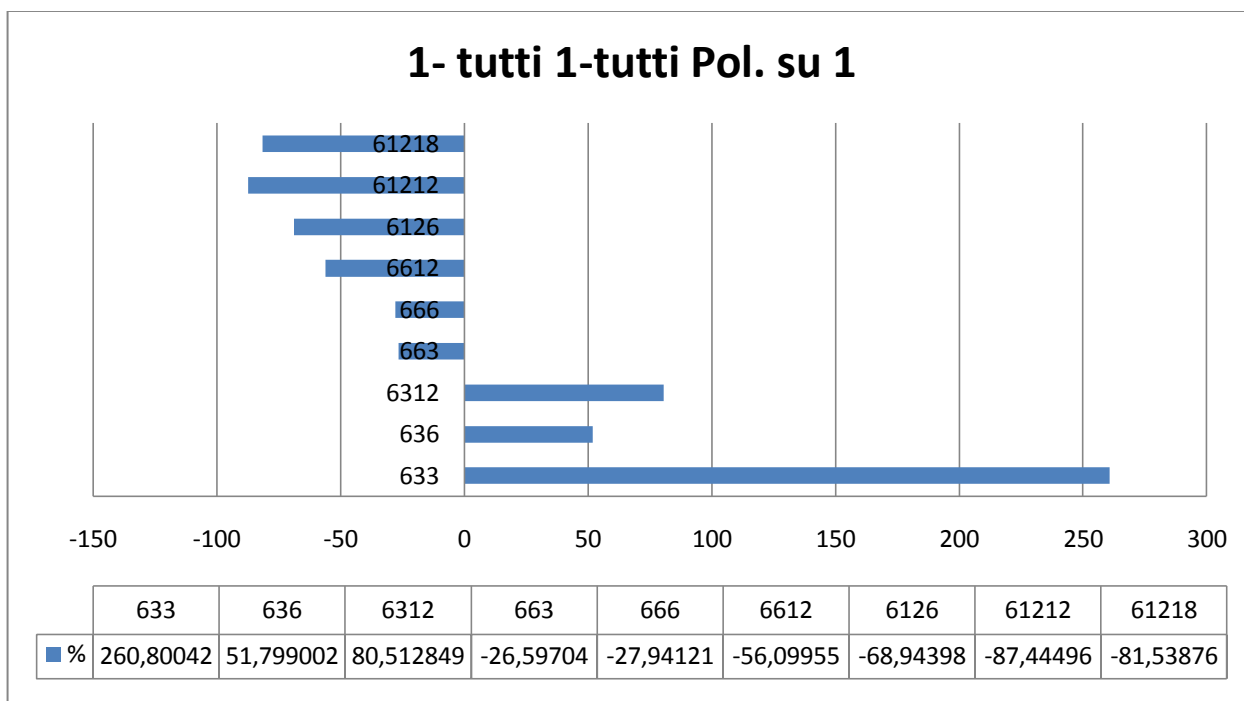


fig. 98

L'ultima configurazione, così come era capitato per altri gradi di comunanza mostra un comportamento nettamente differente tra i primi tre gradi di complessità e gli ultimi sei.

L'algoritmo risulta essere quindi da preferire per i più alti gradi di complessità come risulta evidente oltre che dalle immagini, dai valori riportati in tabella.

5.5 Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello di verificare il comportamento dell'algoritmo MMAS (Max Min Ant System) nei confronti dell'algoritmo ACO (Ant Colony Optimization), nella risoluzione del problema di sequenziamento delle linee di assemblaggio a modelli misti. L'algoritmo utilizzato sfrutta l'analogia con il mondo naturale riproducendo il comportamento delle formiche nella loro ricerca verso il cibo. Utilizzando un meccanismo di comunicazione identificato col termine "stigmergy" esse sono infatti in grado di trovare la via più breve per raggiungere la fonte di cibo. La comunicazione tra questi insetti avviene attraverso il rilascio sul terreno, da parte di ciascuno di essi, di una sostanza chimica, il feromone, da cui le formiche sono fortemente attratte. L'algoritmo riproduce questo meccanismo, simulando che ogni singolo insetto virtuale depositi sul terreno il feromone, generando un processo autorinforzante che retroagisce sul comportamento degli insetti virtuali cercando, ad ogni iterazione, di migliorare il risultato della funzione obiettivo; che nel caso del presente lavoro è costituita dalla regolazione dei consumi. La soluzione ottenuta rappresenta quindi uno dei possibili cammini percorribili, ovvero una possibile sequenza di assemblaggio dei vari prodotti, l'algoritmo ha infatti l'accortezza di fare in modo che nessun prodotto venga assemblato più di una volta. La sperimentazione ha evidenziato come i valori dei parametri scelti influenzino fortemente il valore della funzione obiettivo, e come per alcuni di essi l'algoritmo trovi difficoltà a trovare una soluzione convergente. La difficoltà nel raggiungimento di valori convergenti deriva dalle caratteristiche stesse dell'algoritmo MMAS, la cui costruzione ha come scopo quello di evitare premature convergenze, e quindi di fornire come risultati ottimali, valori rappresentanti dei limiti inferiori locali. I risultati migliori sono stati rilevati ponendo $\beta=2$ e differenti valori di ρ in funzione della comunanza delle distinta base e della polarizzazione. Nella tabella riassuntiva finale (tabella 2), vengono indicati i valori di ρ da utilizzare per ogni situazione analizzata, in accordo con i risultati presentati nel capitolo 5.3, sono state inoltre evidenziate in verde le situazioni in cui l'algoritmo MMAS è da preferire rispetto all'ACO. L'algoritmo si dimostra competitivo soprattutto all'aumentare della polarità, luogo in cui

l'algoritmo ACO presentava delle difficoltà. Nel presente lavoro sono state utilizzate 9 diverse tipologie di distinta base evidenziando come, al crescere della complessità della stessa, l'MMAS dimostri di essere in grado di trovare soluzioni buone, dimostrando la sua capacità di ricerca della soluzione ottimale, non soffermandosi su premature convergenze o minimi locali.

Lo sviluppo di questo algoritmo credo possa avere differenti vie:

- I diversi fattori sono stati testati su un massimo di 3 livelli, e sarebbe quindi interessante provare ad esaminare più a fondo l'impatto di ciascuno dei fattori per ottimizzare il comportamento dell'algoritmo nelle diverse soluzioni.
- L'ampilamento dei livelli di Distinta Base potrebbe essere utile a capire se il trend evidenziato prosegue per complessità maggiori.
- In questo lavoro non sono state effettuate analisi per identificare un numero massimo iterazioni oltre alle quali risulta inefficace spingersi, e un'analisi di questo tipo porterebbe sicuramente ad un alleggerimento del "costo" temporale della sperimentazione favorendo lo sviluppo in altre direzioni.

1-2 1-2	633	636	6312	663	666	6612	6126	61212	61218
Uniforme	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
Pol. Su 3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
Pol. Su 2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7
Pol. Su 1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1-2 1-tutti	633	636	6312	663	666	6612	6126	61212	61218
Uniforme	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Pol. Su 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Pol. Su 2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Pol. Su 1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1-tutti 1-2	633	636	6312	663	666	6612	6126	61212	61218
Uniforme	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Pol. Su 3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8
Pol. Su 2	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Pol. Su 1	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1-tutti 1-tutti	633	636	6312	663	666	6612	6126	61212	61218
Uniforme	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7
Pol. Su 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Pol. Su 2	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Pol. Su 1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7

Bibliografia

Battini D., Faccio M., Persona A., Sgarbossa F., (2009), *Balancing-sequencing procedure for a mixed model assembly system in case of finite buffer capacity*, International Journal Adv Manufactor Technology Vol. No. 44, pp. 345-359.

Berney B., (1997), *Software Agents- A review*, Manchester Metropolitan University, <http://www.doc.mmu.ac.uk/staff/B.Berney/research/ag-rev.htm>.

Boysen N., Flidner M., Scholl A., (2007), *Sequencing mixed-model assembly lines:Survey, clasification and model critique*, European Journal of Operational Research, Vol. No. 192, pp.349-373.

Bullnheimer B., Hartl R.F., Strauss C., (1997), *A new rank based version of the ant system- a computational study*,Central European Journal for Operations Research and Economics, Vol.No. 7, pp.25-38.

Bussmann S., Muller J., (1992) *A negotiation framework for cooperating agents*,*Proceedings of CKBS-SIG*, Dake Centre, University of Keele, pp.1-17

Caridi M., Sianesi A., (2000) *Multi-agent Systems in production planning control: An application to the scheduling of mixed-model assembly lines*, International Journal Production Economics vol.No.68 pp.29-42

Choi G., (2009), *A goal programming mixed-modelline balancing for processing time and physical workload*, Computer & Industrial Engineering, Vol.No. 57, pp. 395-400.

Dorigo M., Bonabeau E., Theraulaz G.,(2000) *Ant algorithms and stigmergy*. Future generation computer system, Vol.No. 16 pp.851-871

Franklin S., Graesser A.,(1996) *Is it an agent, or just a program?:A taxonomy for autonomous agents*, Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages, Springer, Berlin.

Graham R.L., Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., (1979), *Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling:a survey*, Annals of Discrete Mathematics, Vol.No.5, pp.287-326.

Grassé P.P.,(1956) *La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez bellicositermes natalensis et cubitermes sp. La théorie de la stigmergie: essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs*. Insectes Sociaux Vol No. 6, pp. 41–81.

Green S., Hurst L., Brenda N., Somers F., Evans R.,(1997) *Software agents: A review*, Intelligent Agents Group Report. <http://www.cs.tcd.ie/research/groups/aig/iag/pubreview.zip>.

Hölldobler B., Wilson E.O.,(1994) *Journey to the Ants: A Story of Scientific Exploration*. Harvard University Press, Cambridge, MA .

Jin M, Wu S.D.,(2002),*A new heuristic method for mixed model assembly line balancing problem*, Computers & Industrial Engineering Vol.No.44 pp. 159-169.

Massè M., (1998), *Il sequenziamento di linee di assemblaggio a modelli misti: implementazione e sperimentazione di un algoritmo ad agenti autonomi costruito sul paradigma dell'Ant System*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.

McMullen P.R., Tarasewich P.,(2005), *A Beam search heuristic method for mixed-model scheduling with setups*, International Journal Production Economics,Vol. No 96, pp. 273-283.

Monden Y. ,(1983), *Toyota Production System*, Institute of Industrial Engineers Press, Necross, Georgia.

Montgomery D.C., *Progettazione e analisi degli esperimenti*, Mc-Graw Hill

Mullen R.J., Monekosso D., Barman S., Remagnino P.,(2009), *A review of ant algorithms*, Expert System with Applications, Vol.No. 36, pp. 9608-9617.

O'Hare G., Jennings N. (Eds.),(1996) *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, Wiley, New York.

Steels L.,(1995) *When are robots intelligent autonomous agents?*Research paper. Vrije Universiteit Brussel.

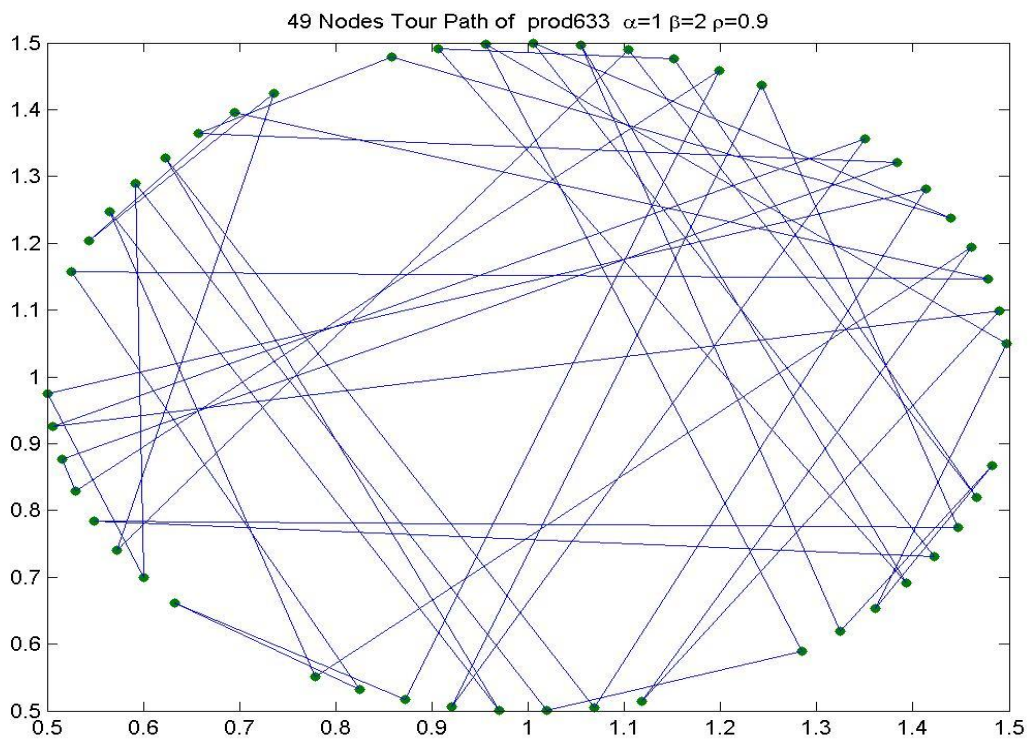
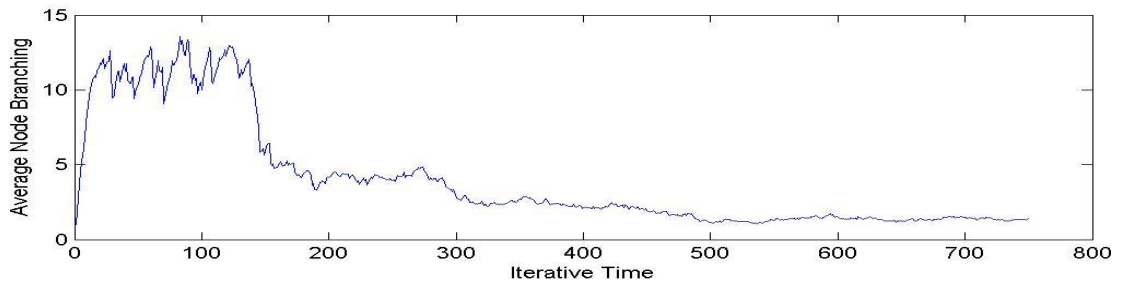
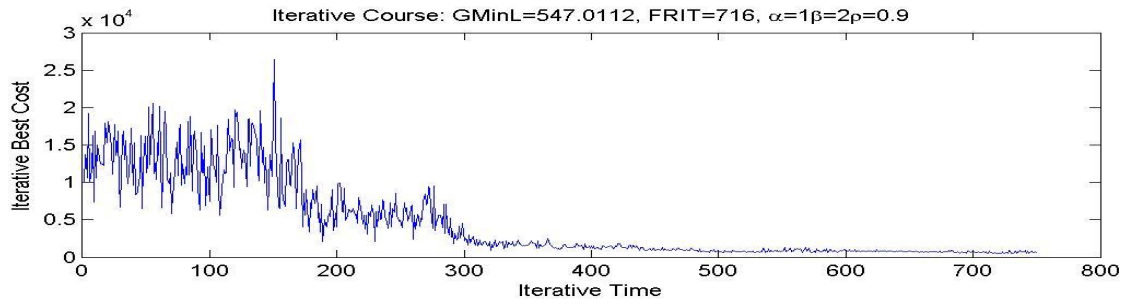
Stützle T., Hoos H.H.,(2000),*MAX-MIN Ant System*, Future Generation Computer System, Vol.No. 16, pp. 889-914.

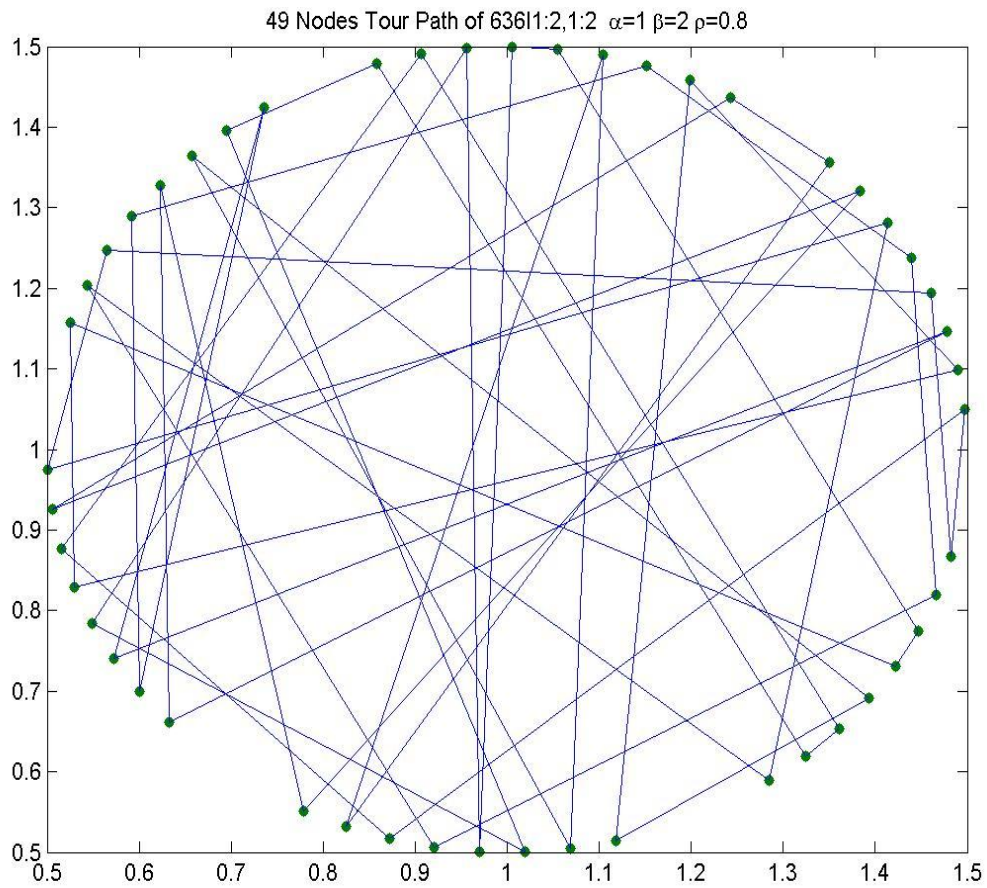
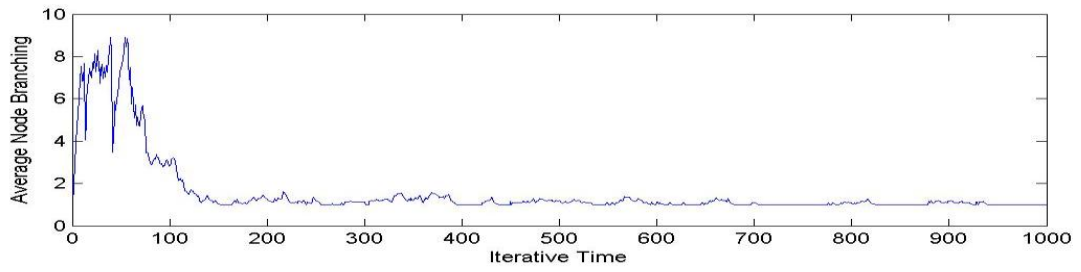
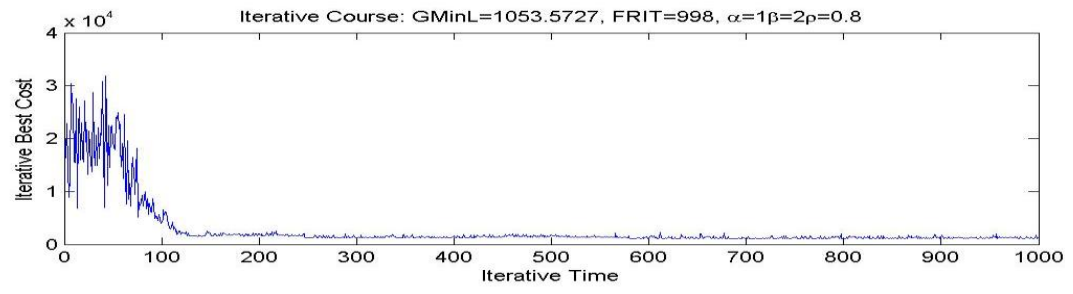
Vilarinho P.M., Simaria A., (2006), *ANTBAL: an ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations*, International Journal of Production Research, Vol.No.44, pp. 291-303.

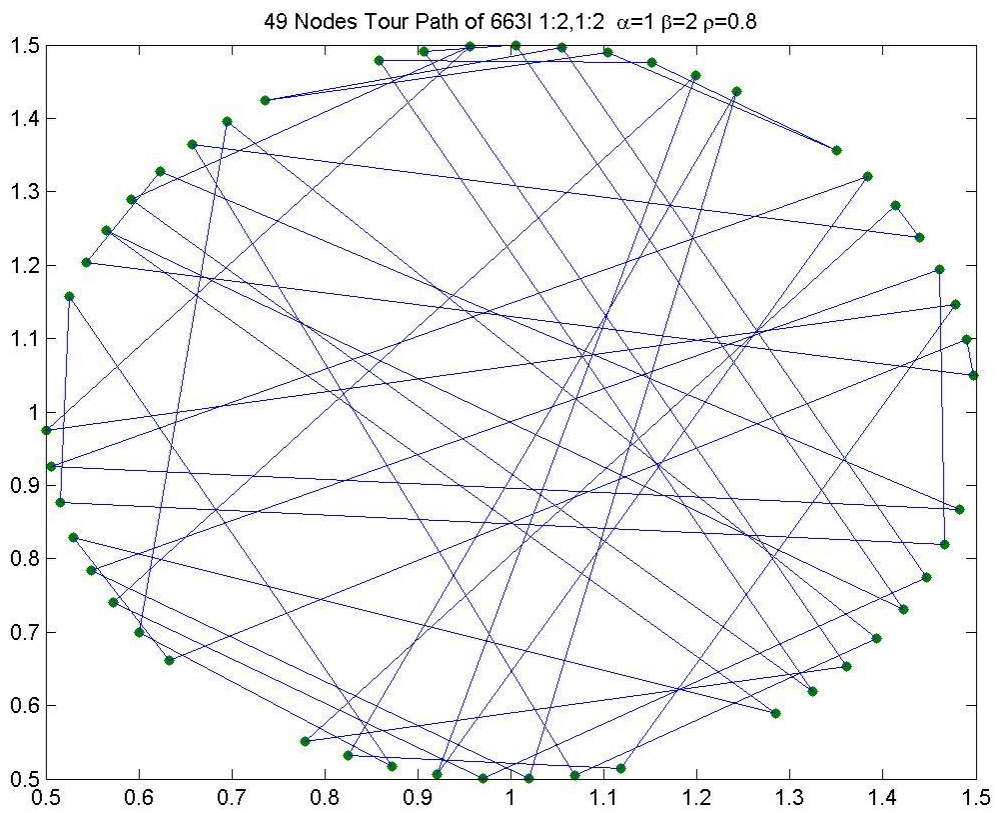
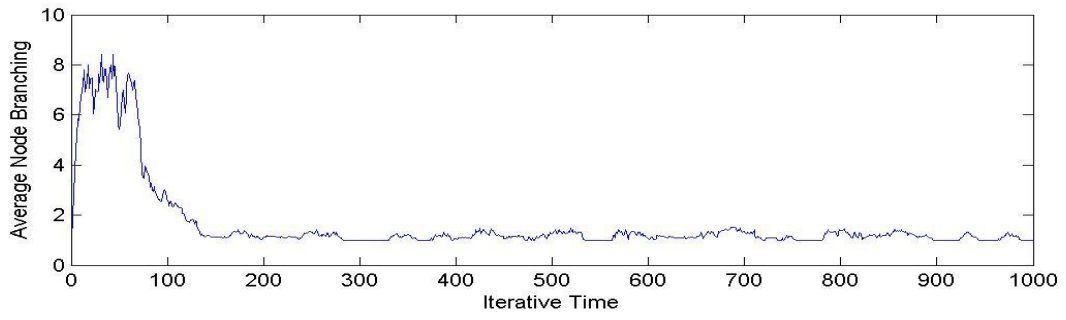
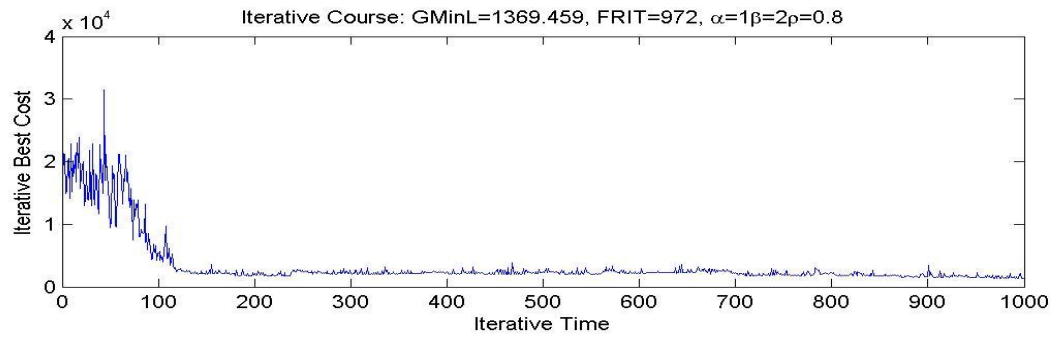
Zhu X., Wilhelm E., (2009), *Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup:A litteraturereview*, IIE Transactions, Vol.No. 38:11, pp.987-1007.

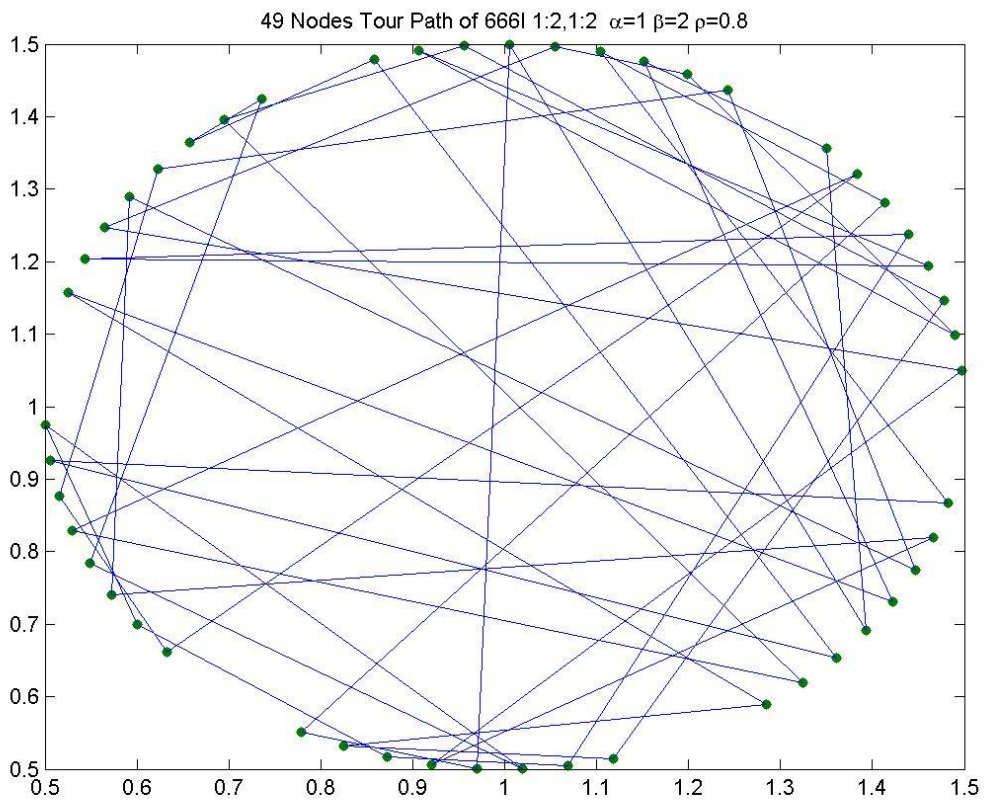
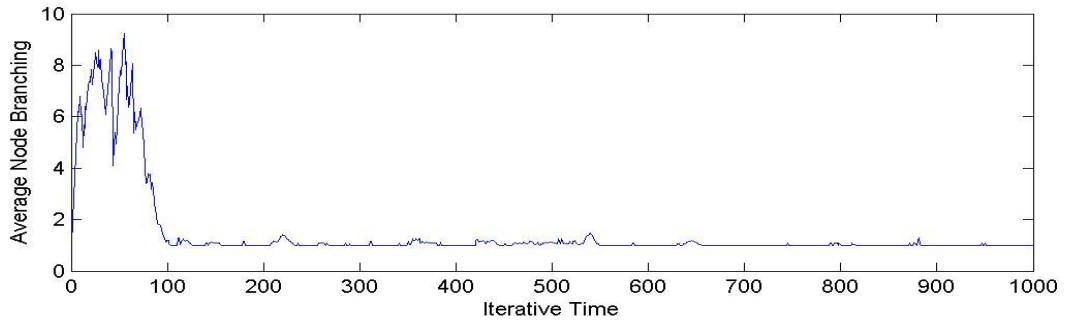
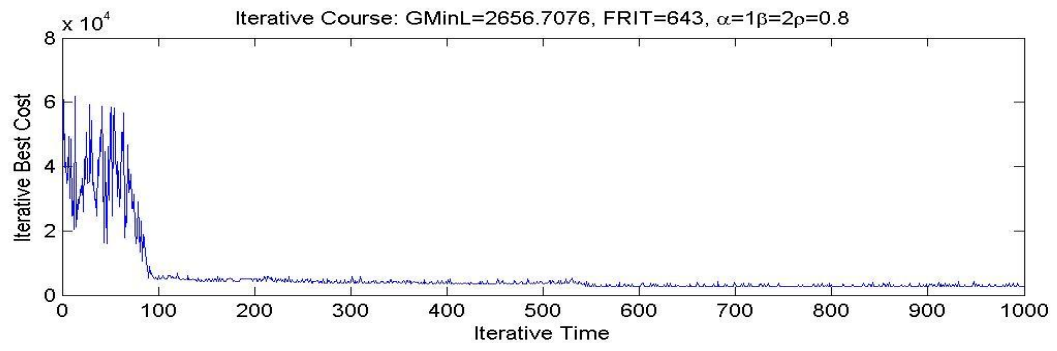
ALLEGATI

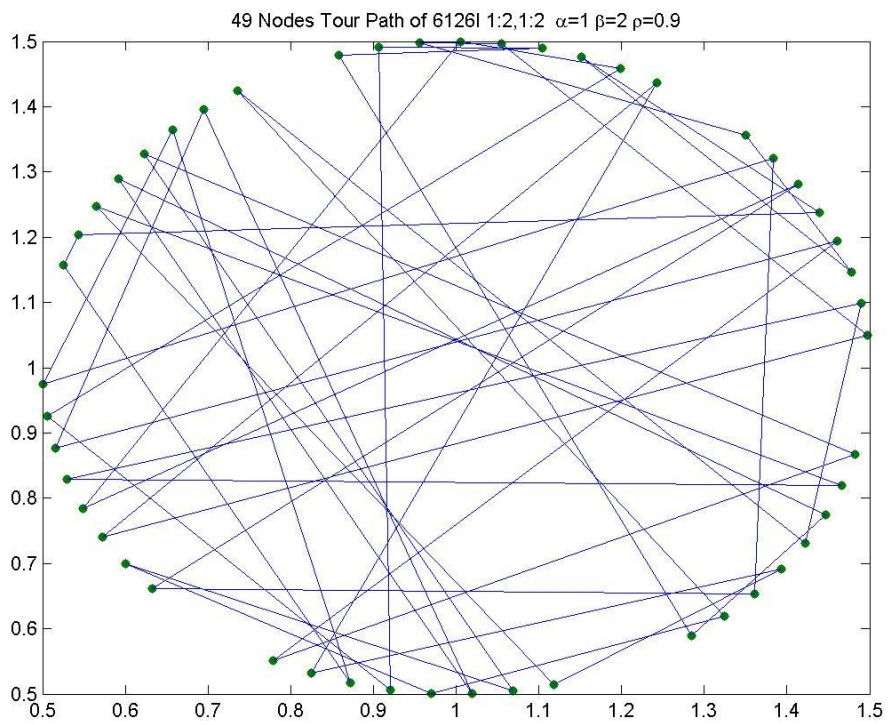
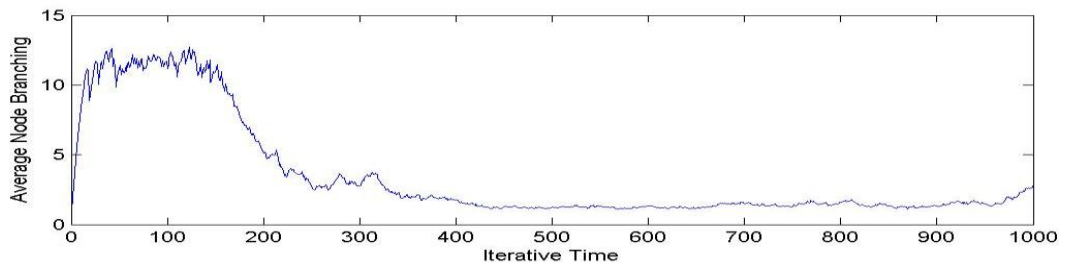
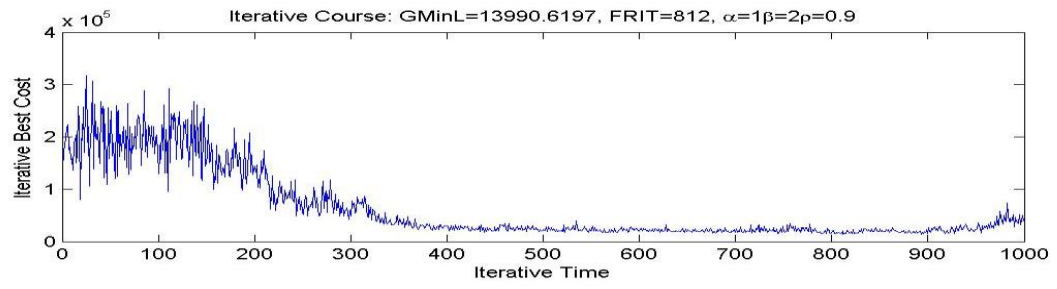
Domanda Uniforme

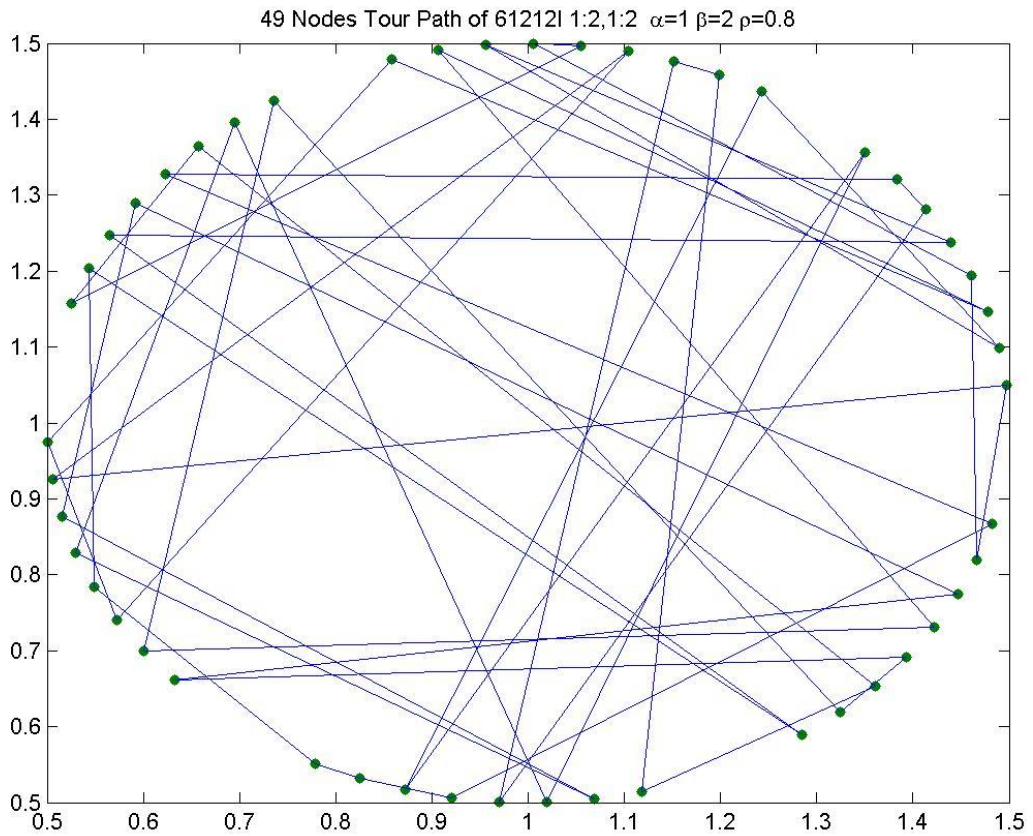
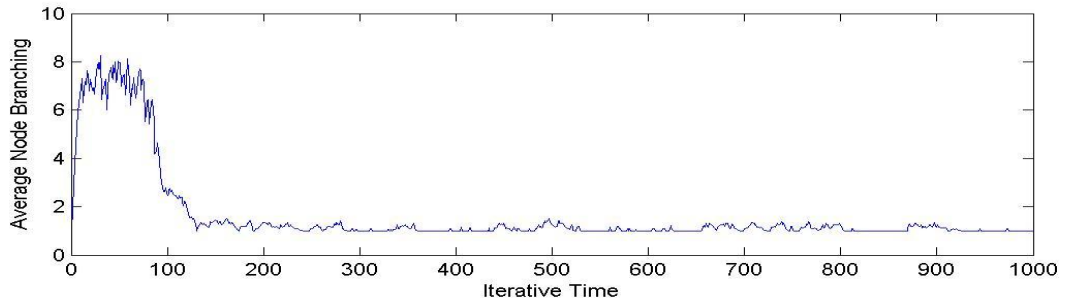
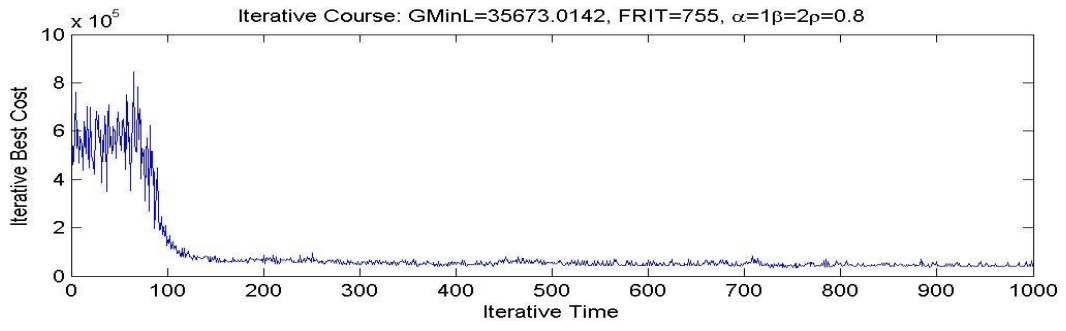


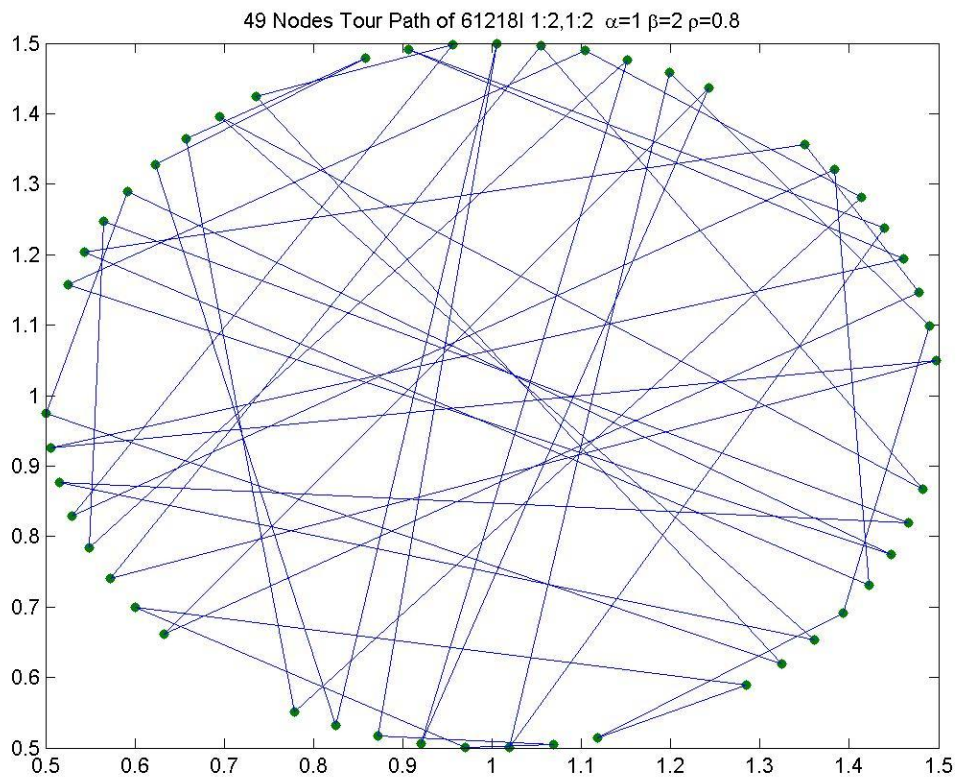
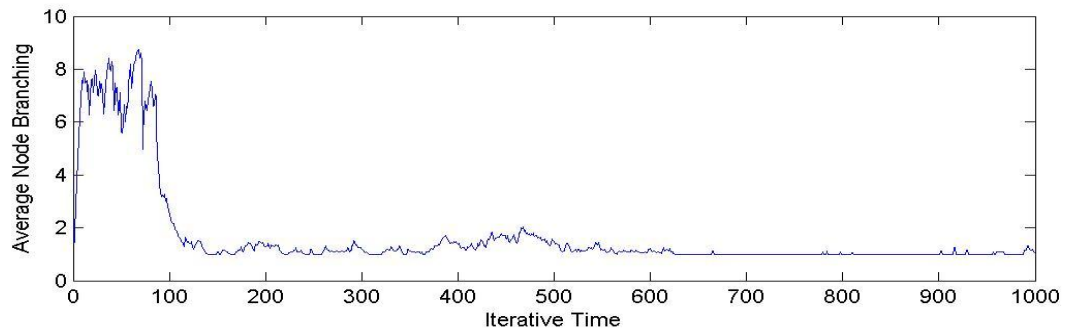
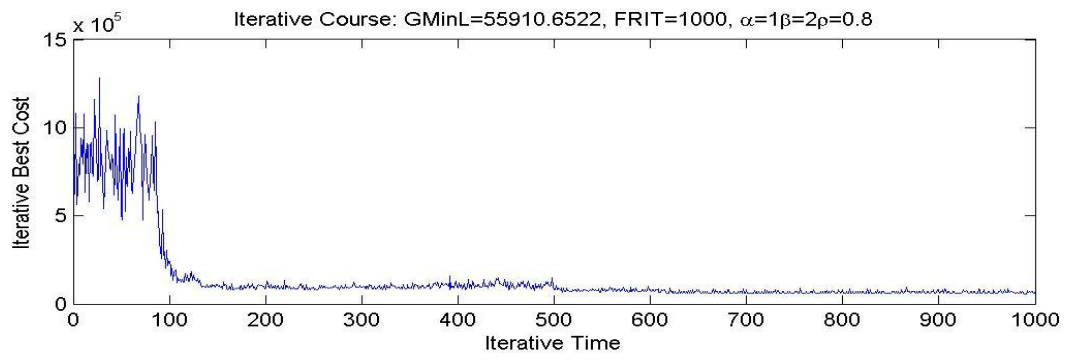




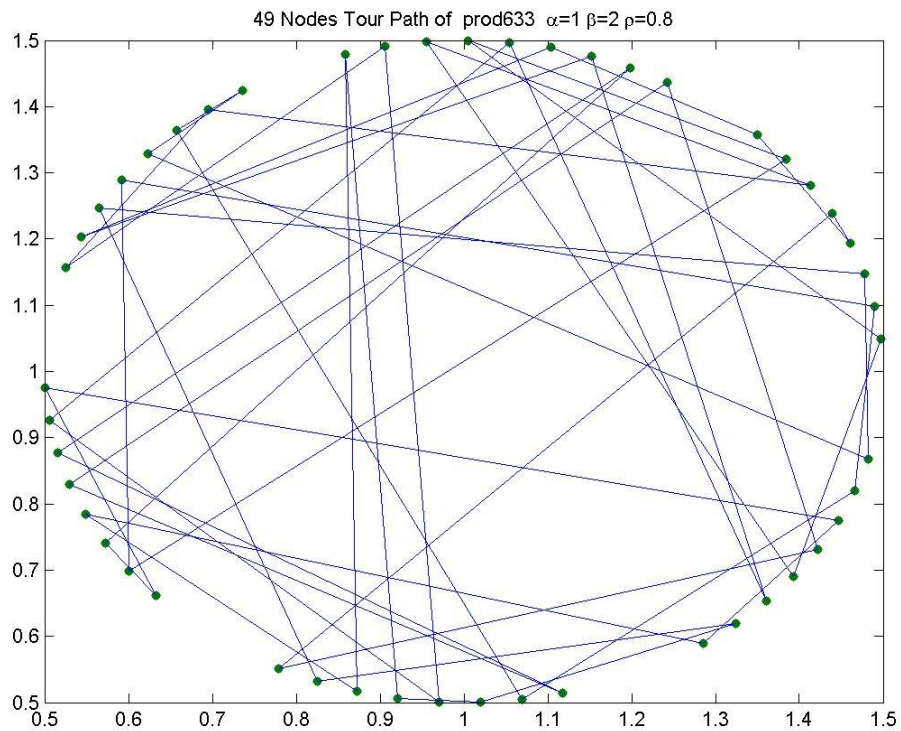
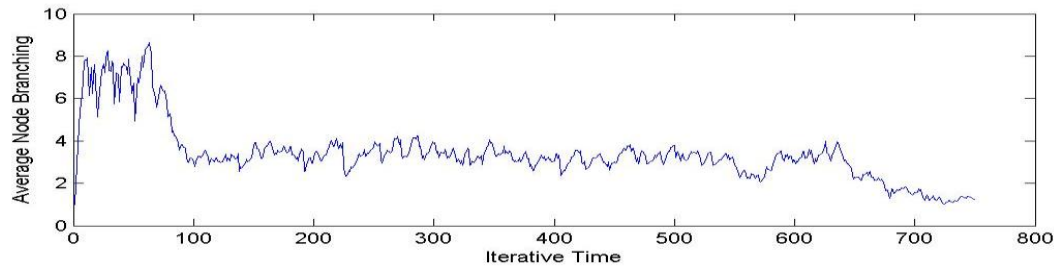
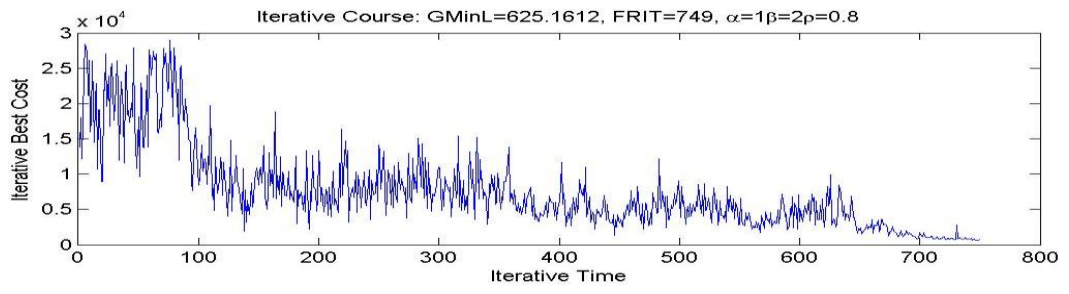


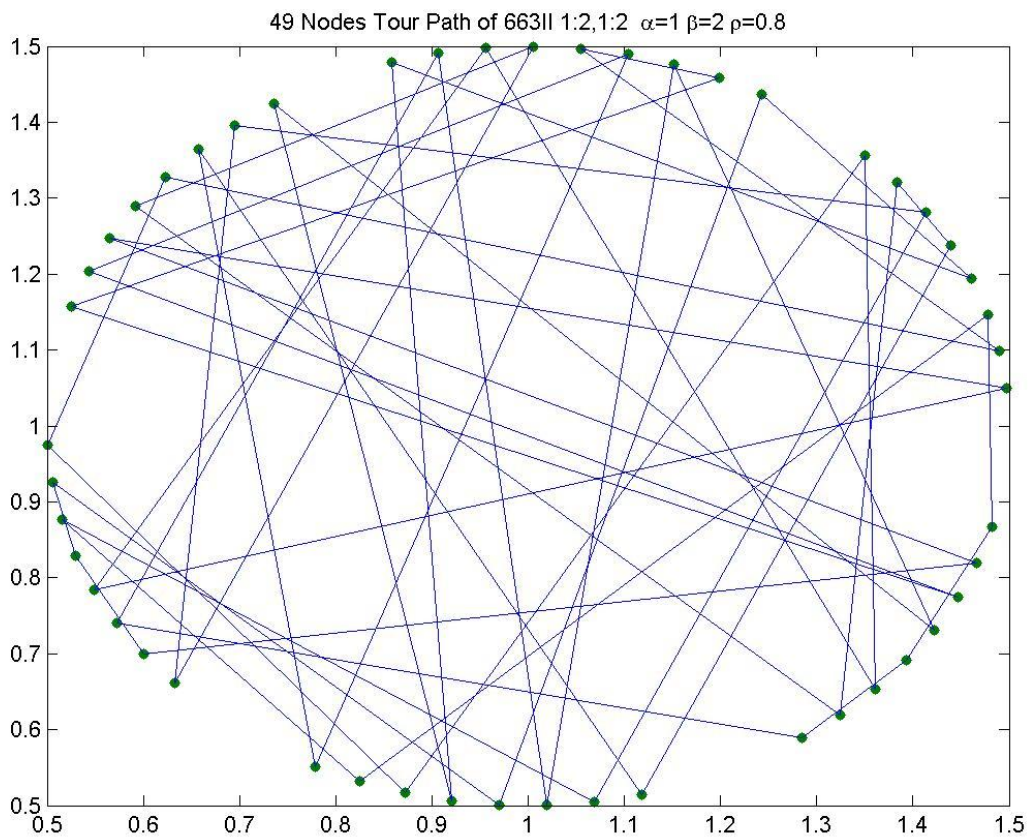
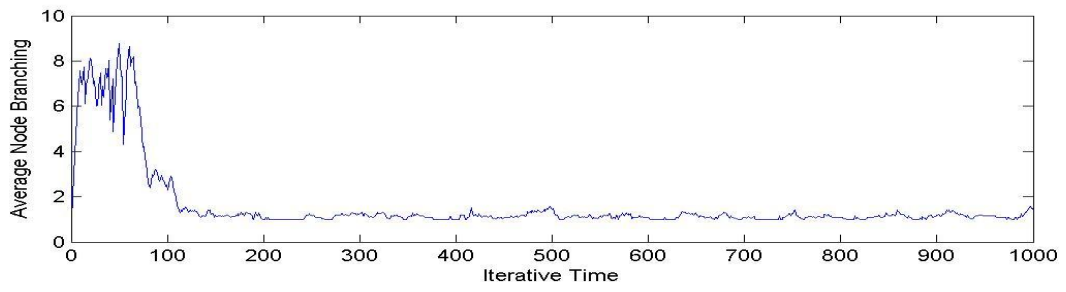
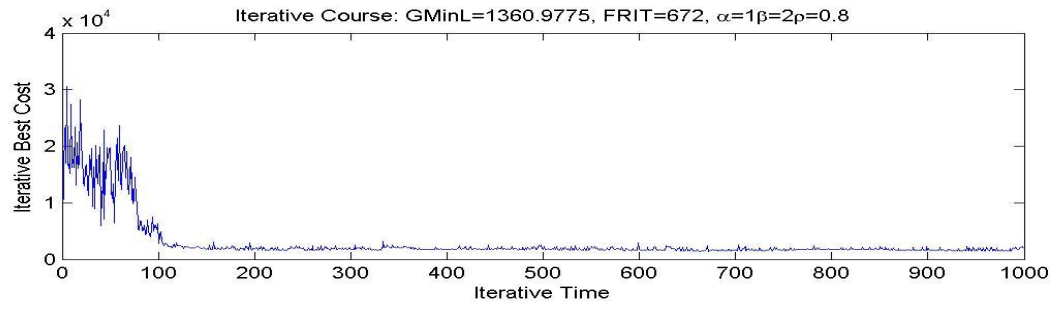


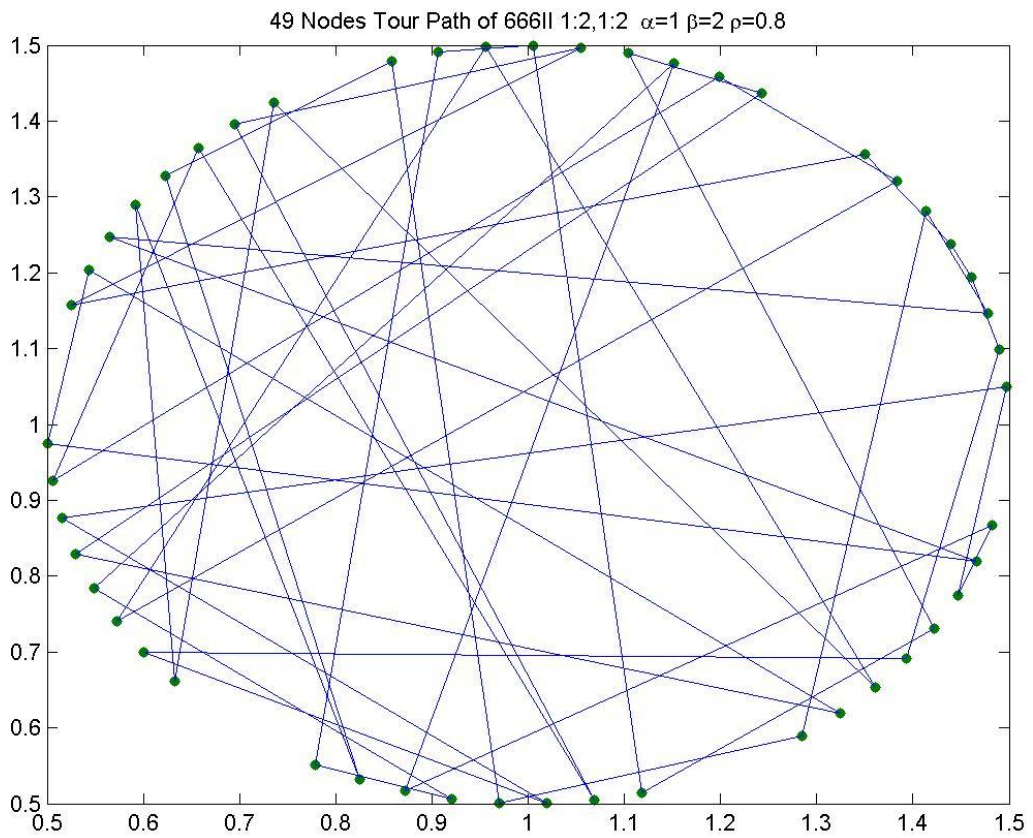
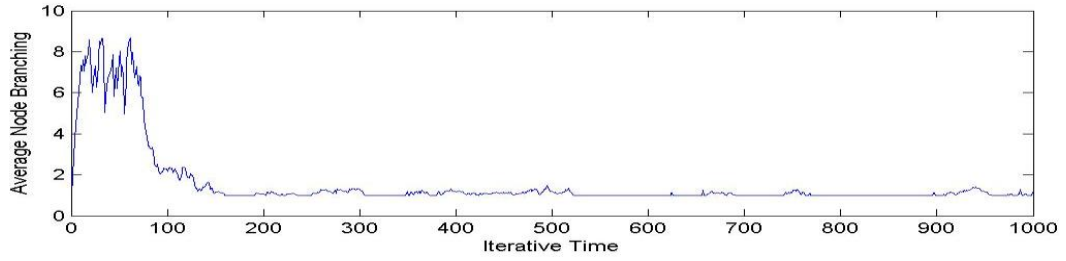
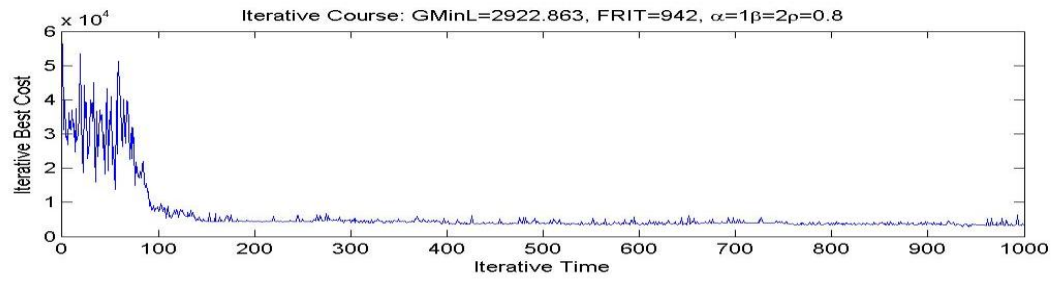


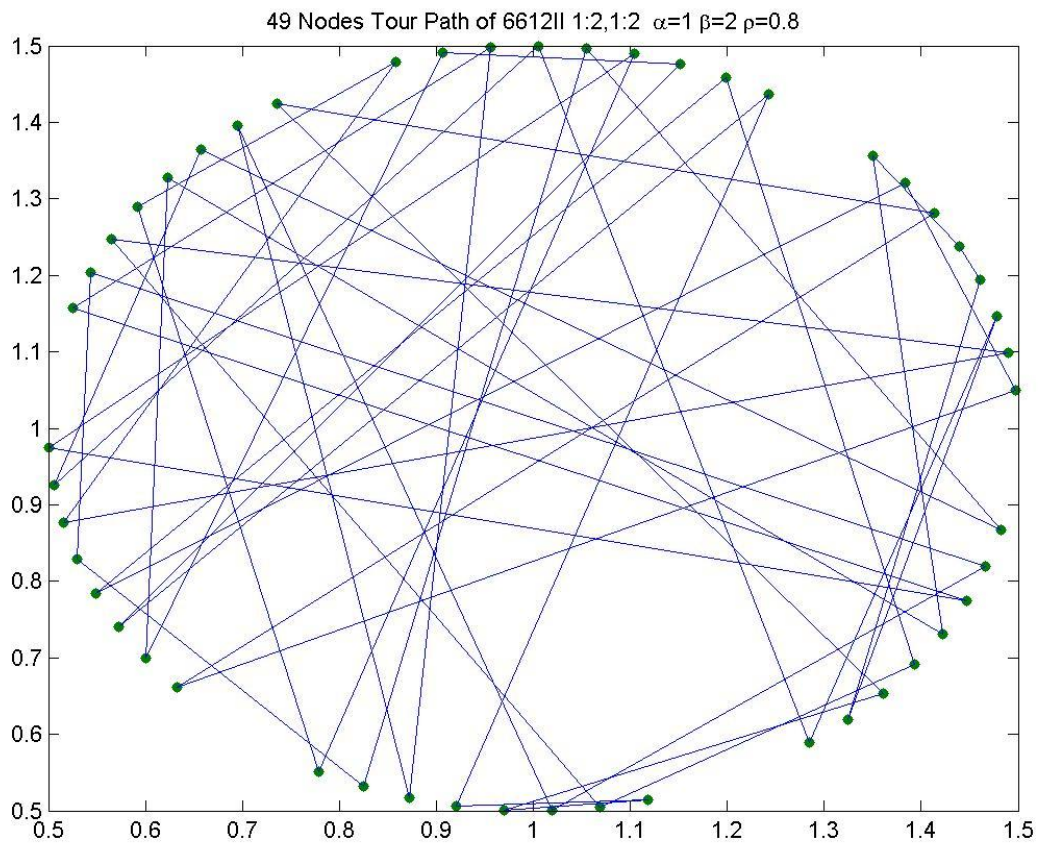
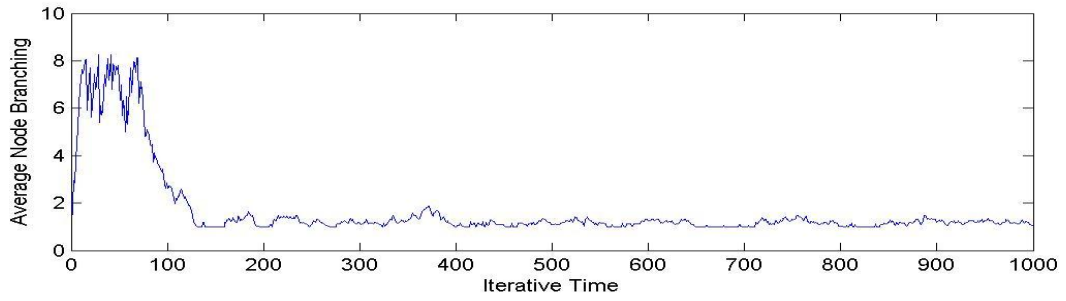
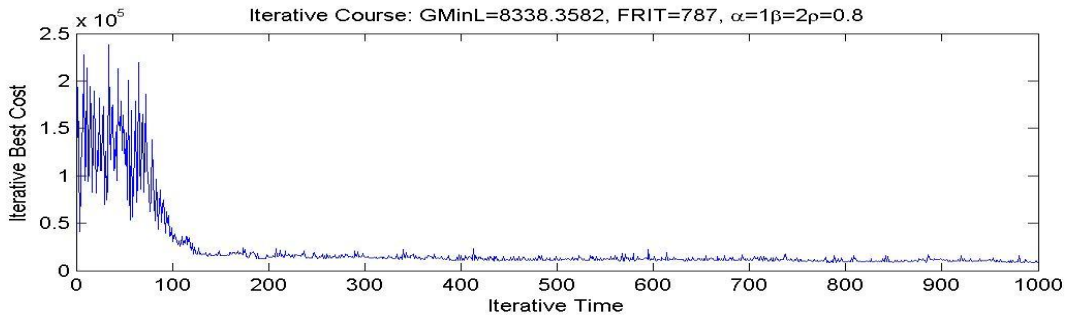


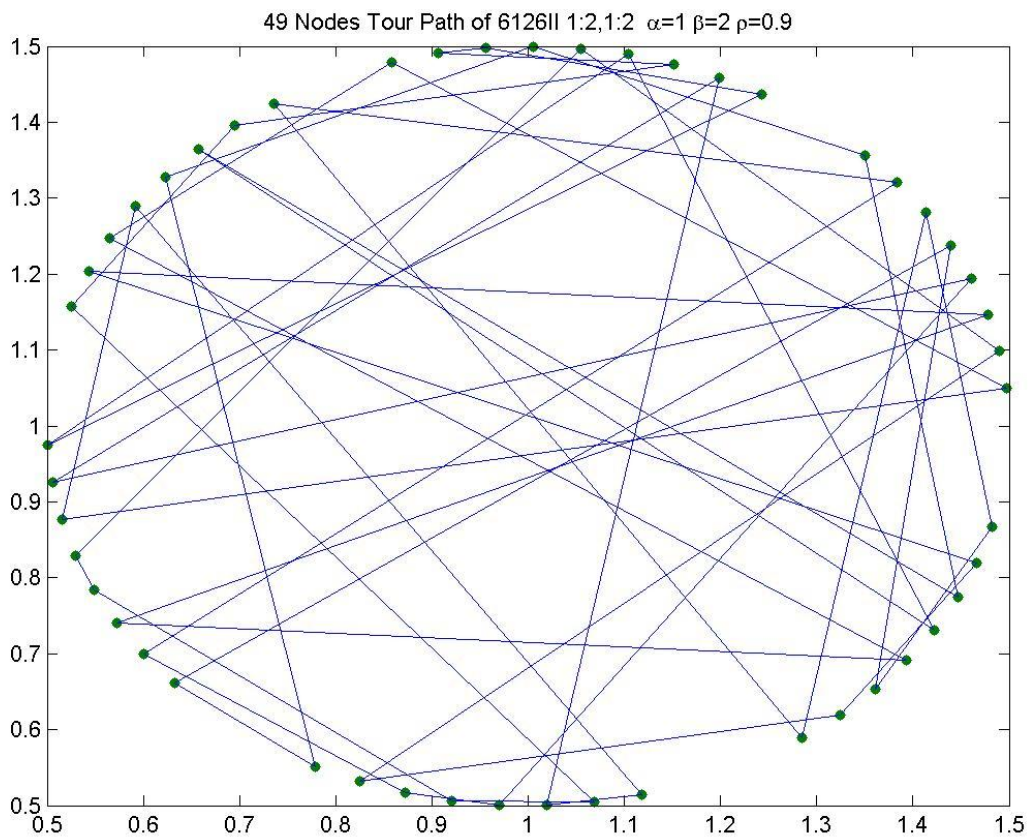
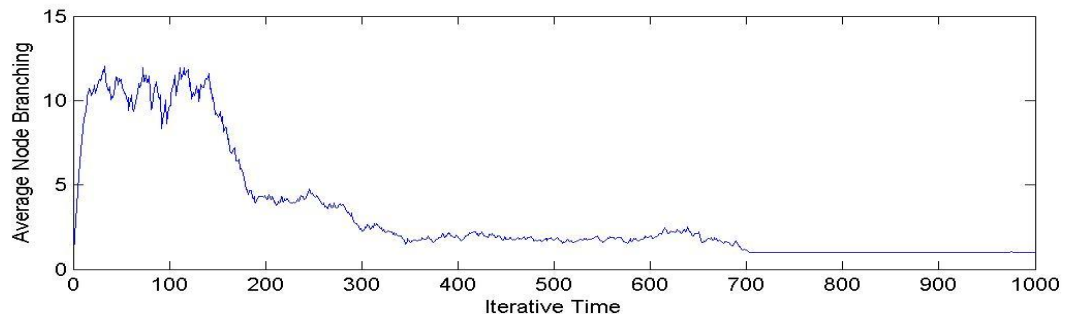
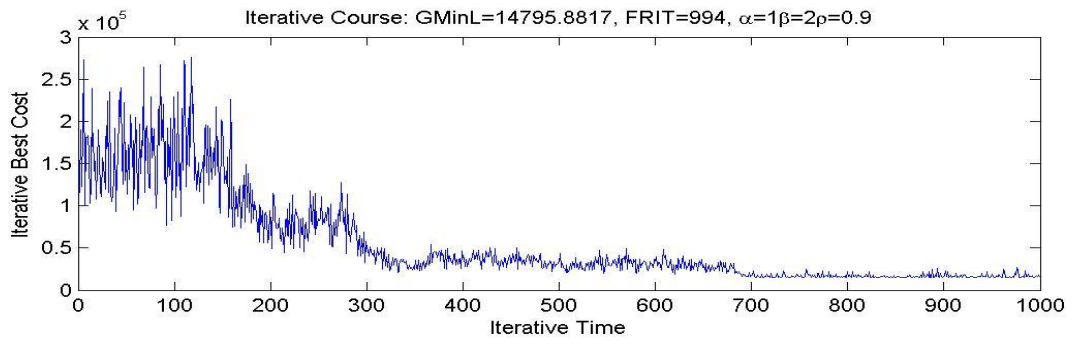
Domanda polarizzata su 3 prodotti

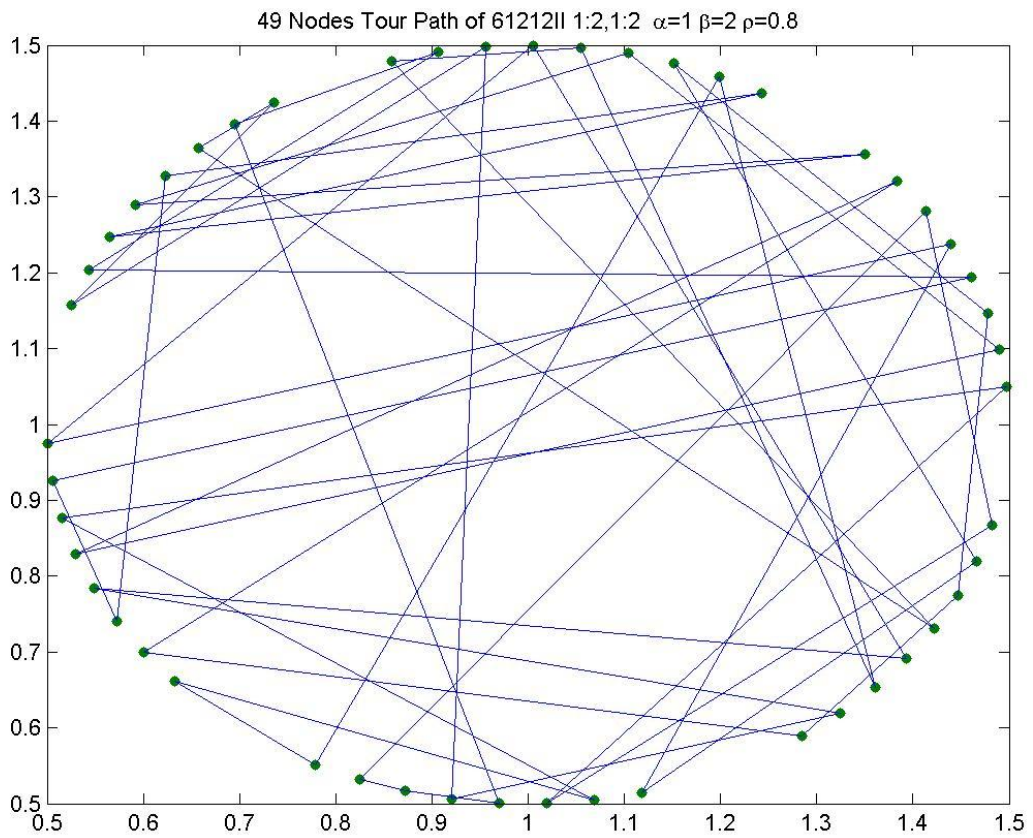
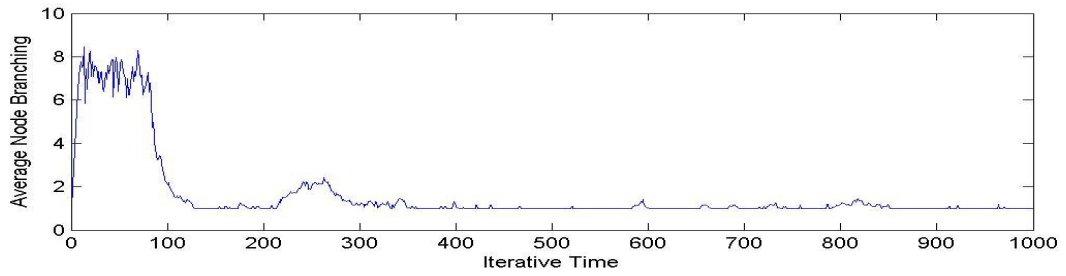
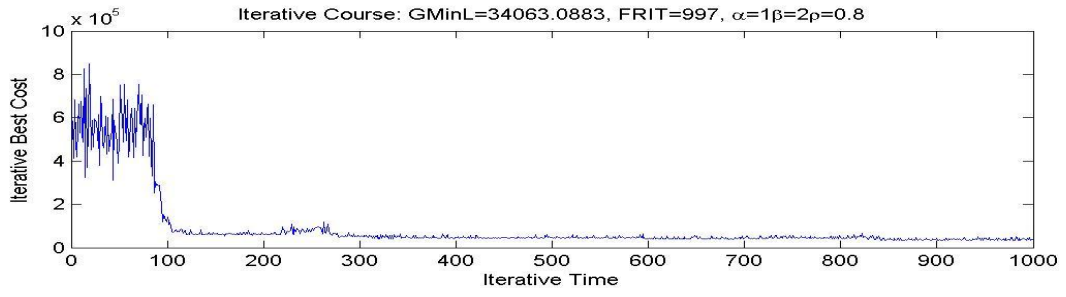


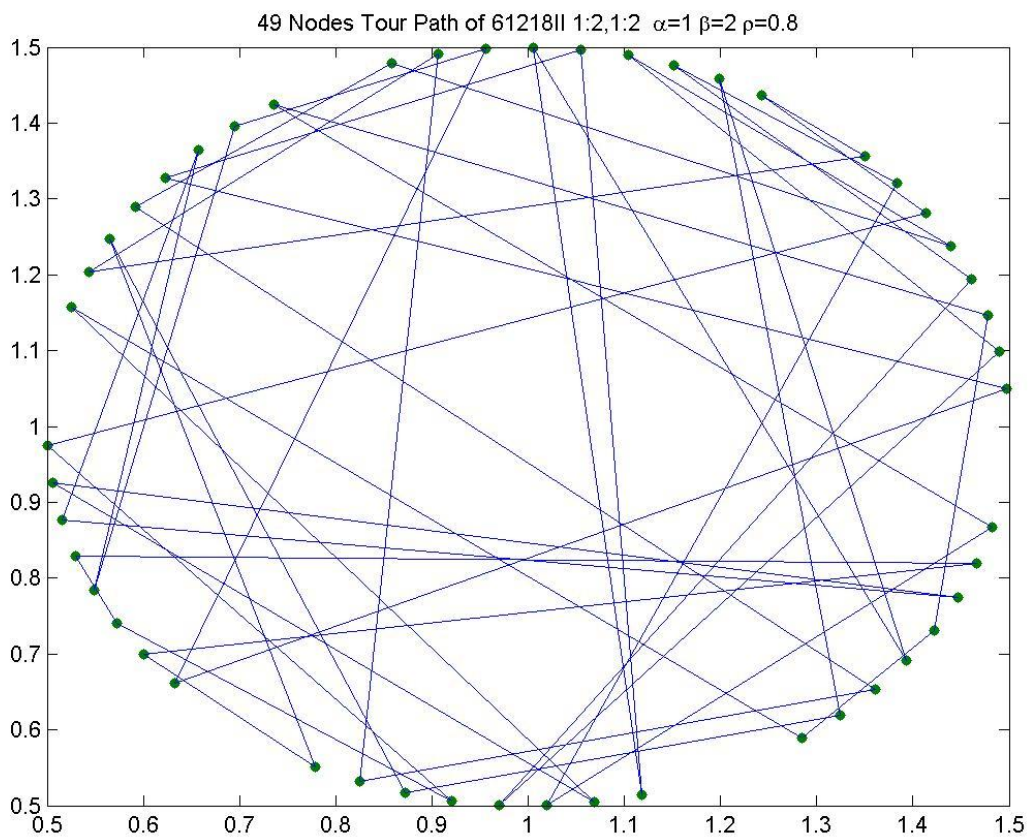
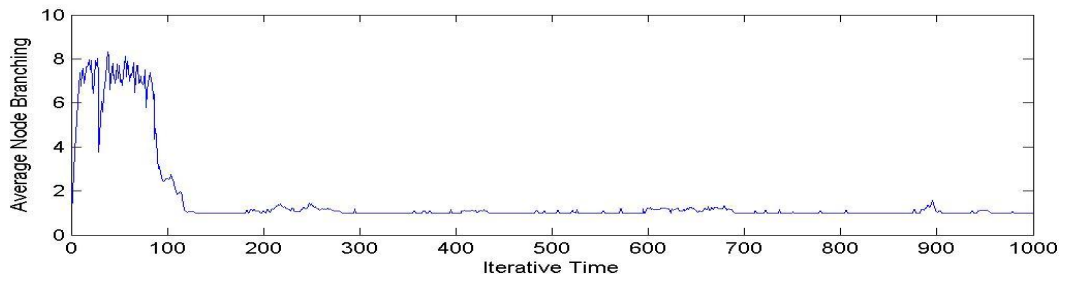
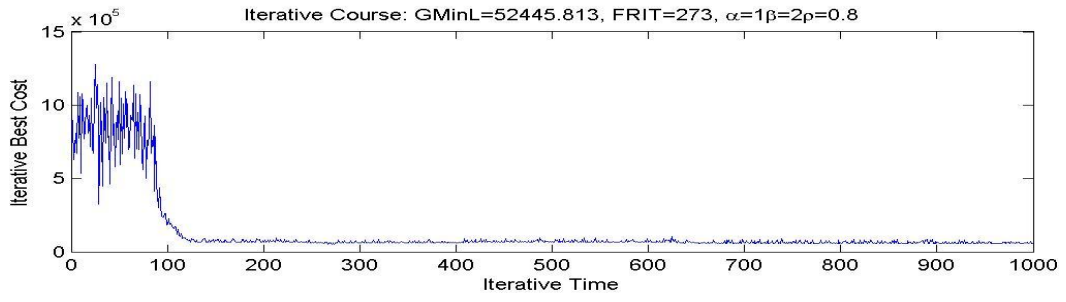




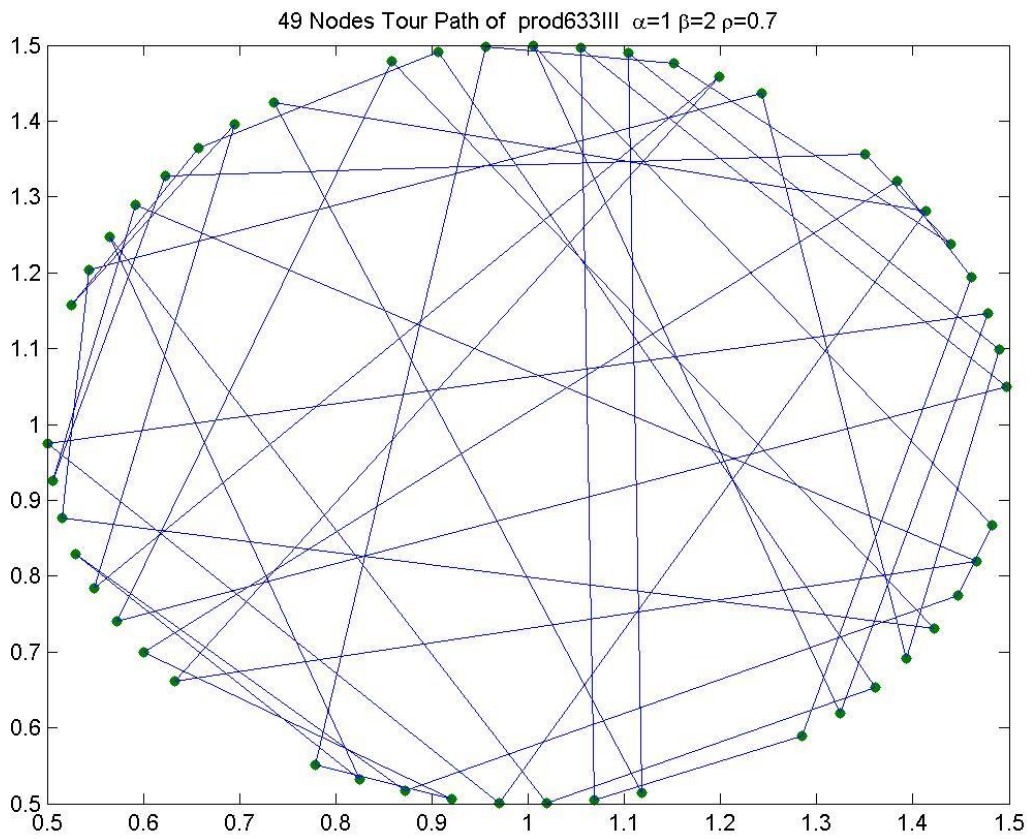
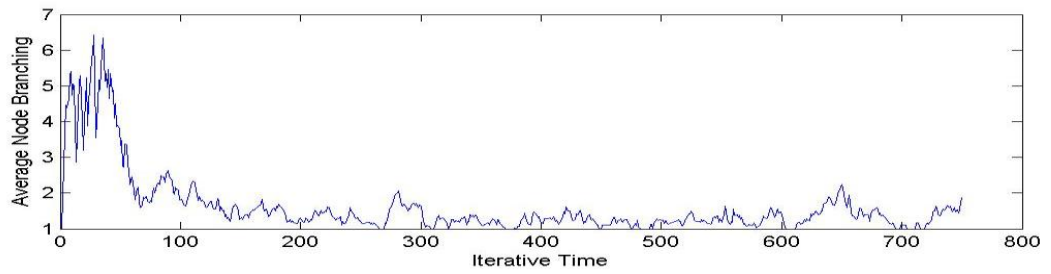
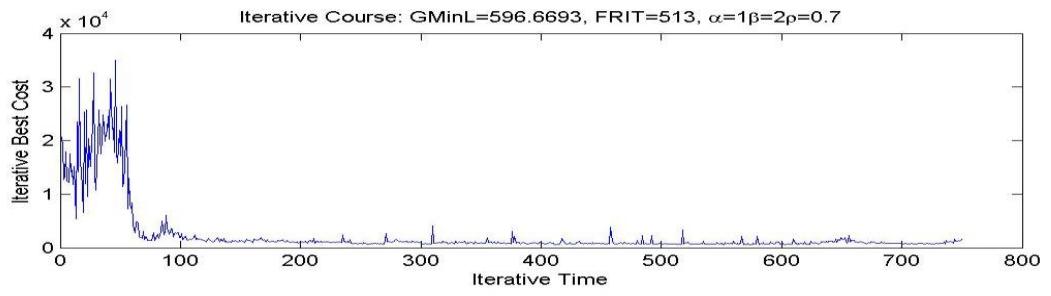


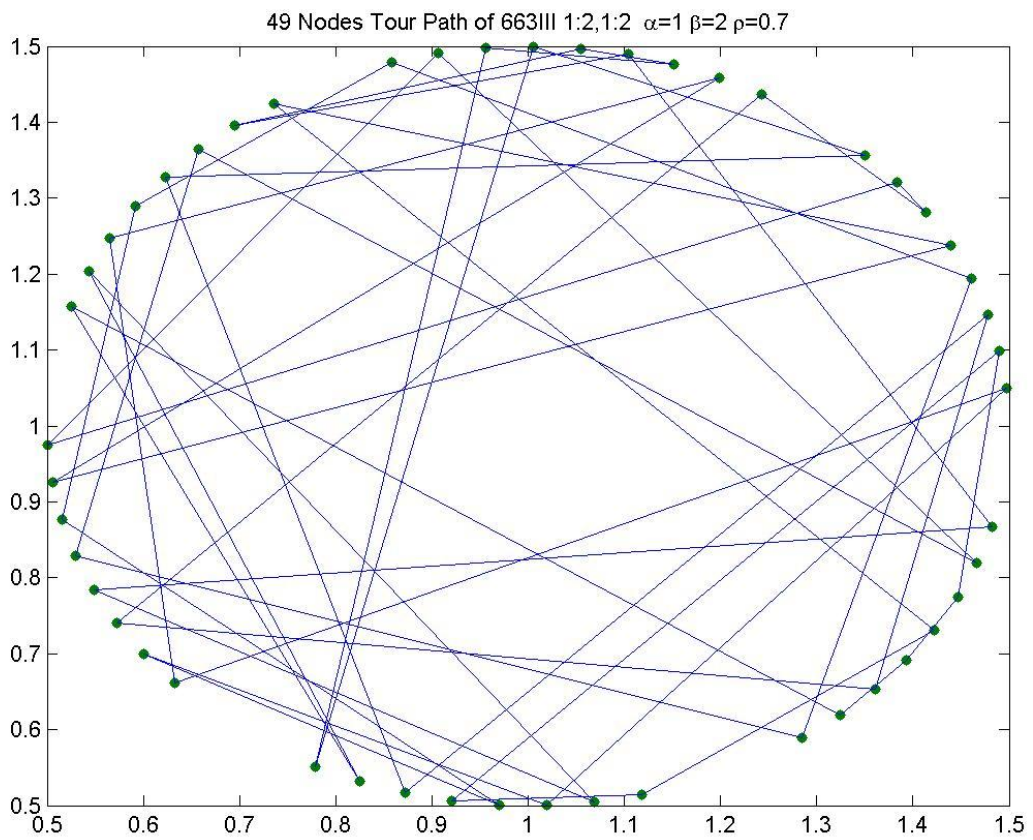
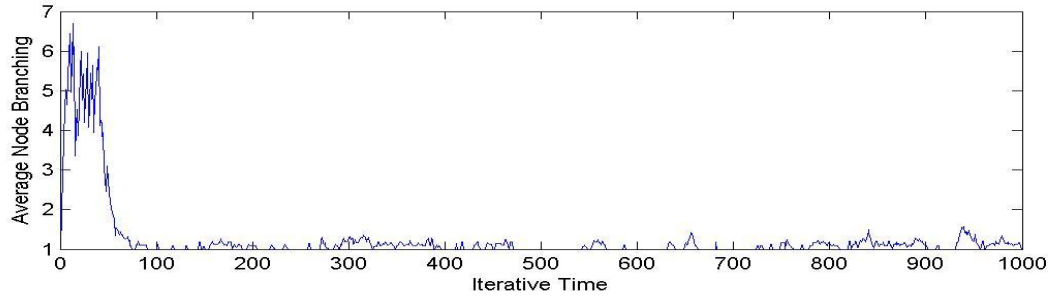
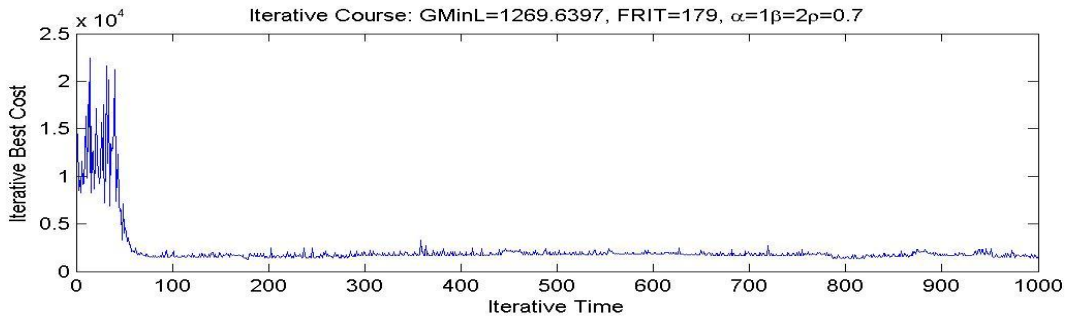


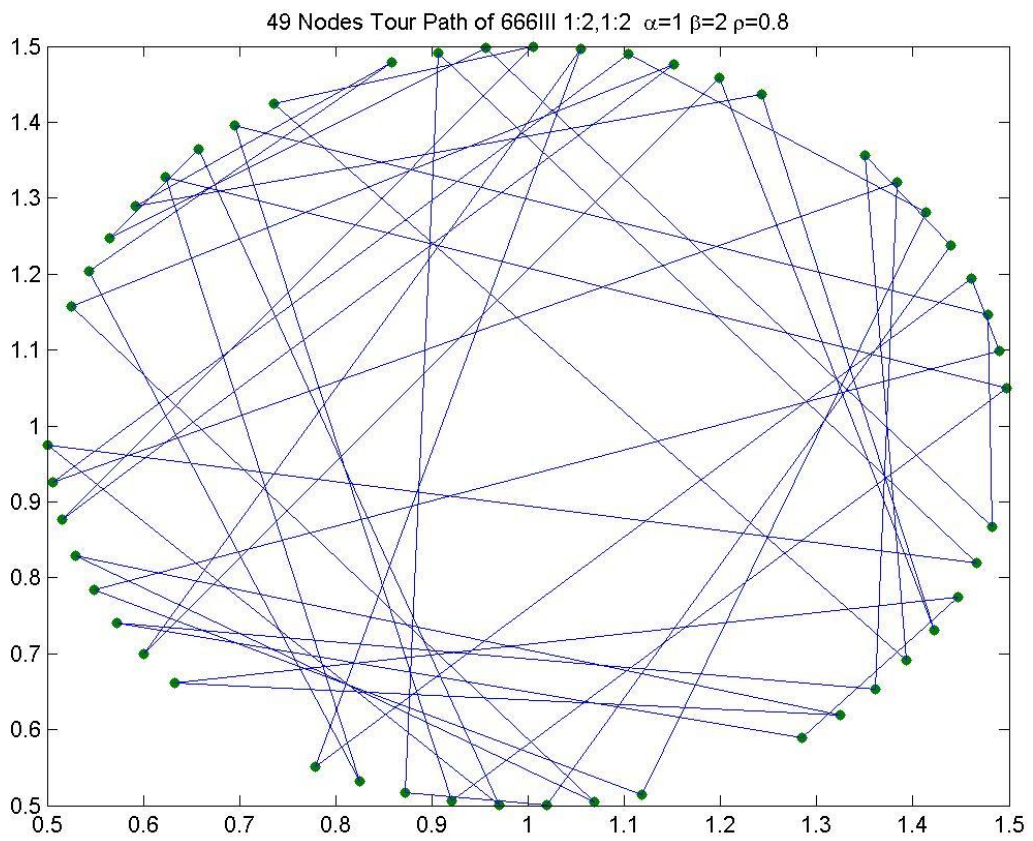
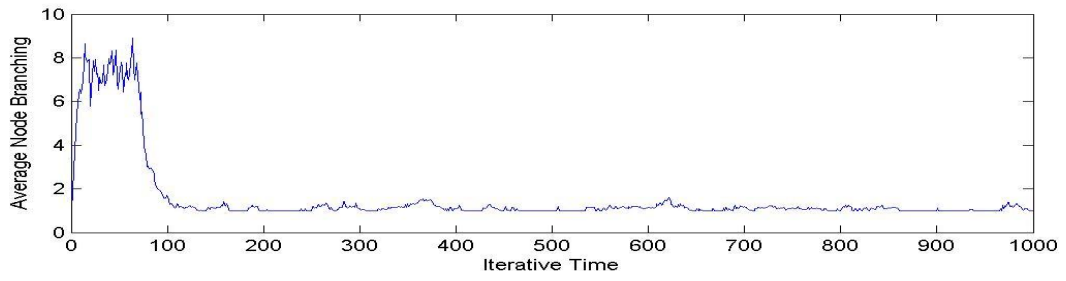
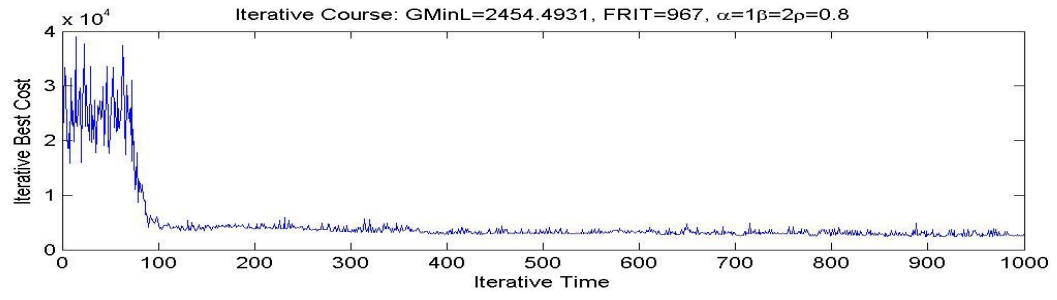


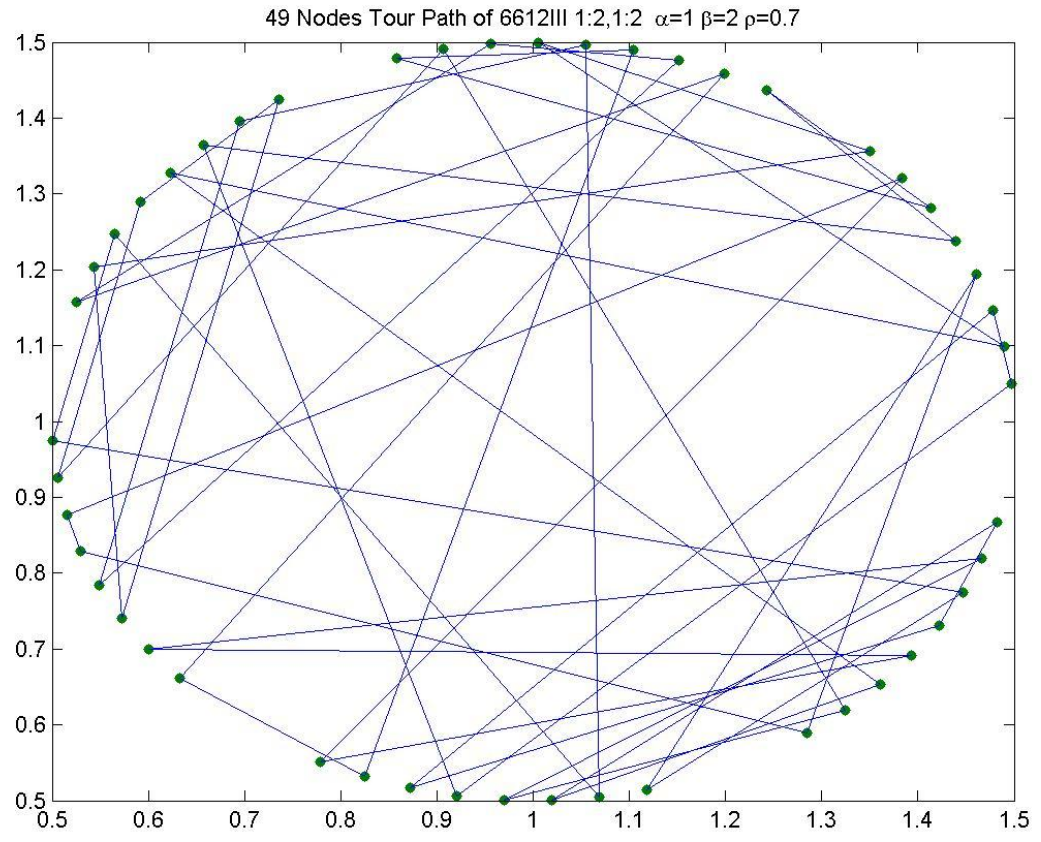
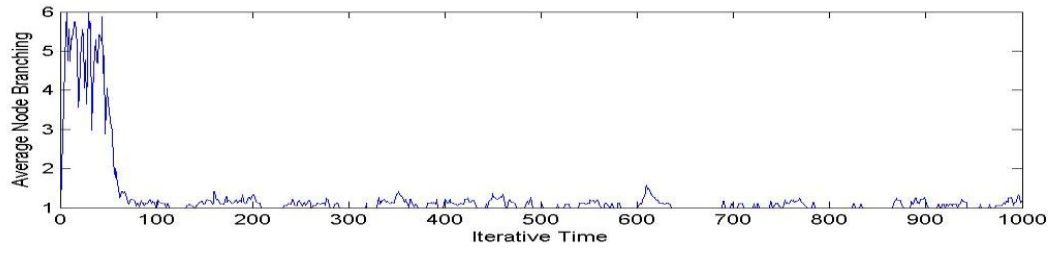
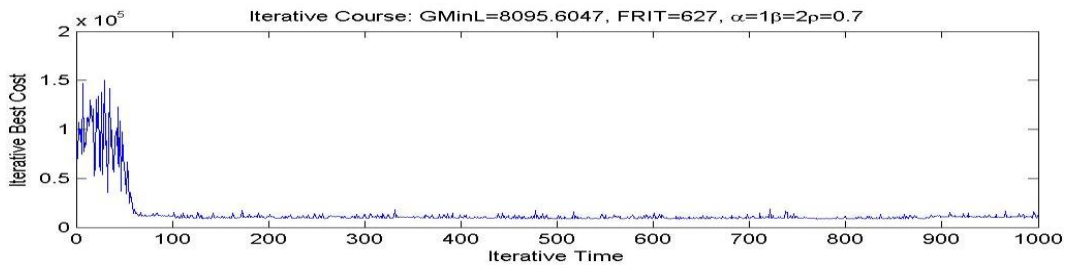


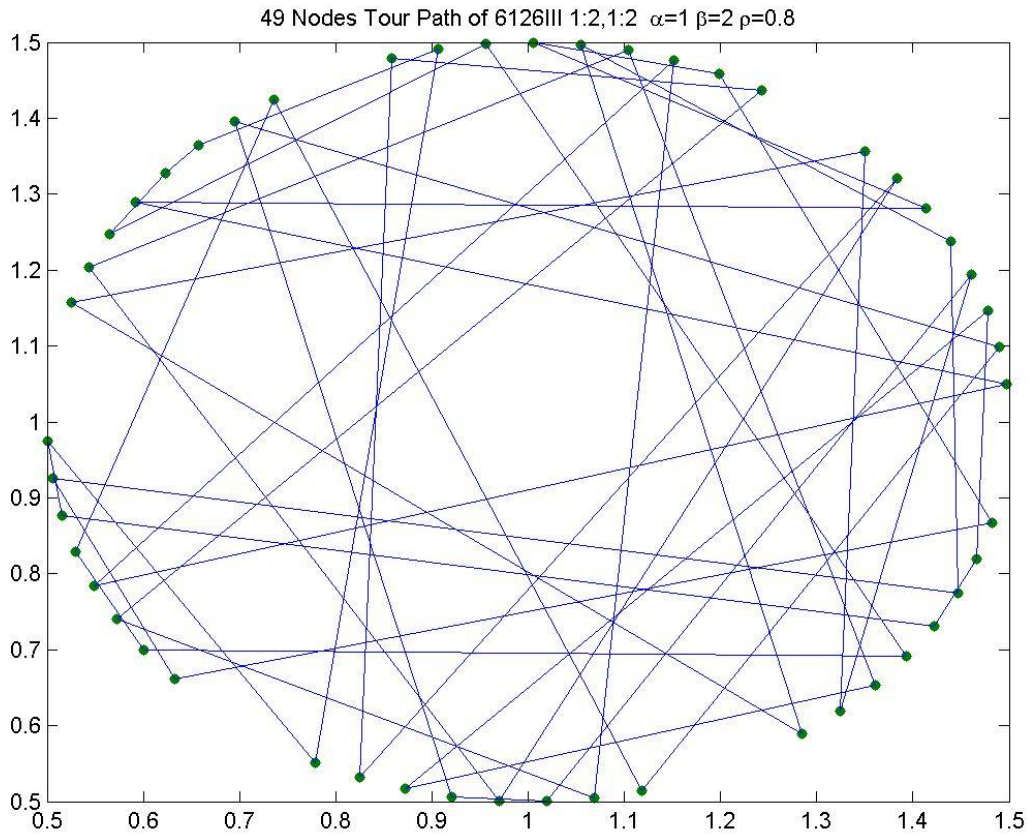
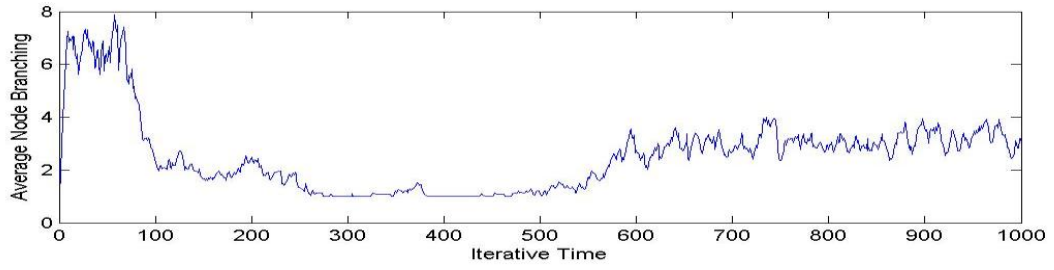
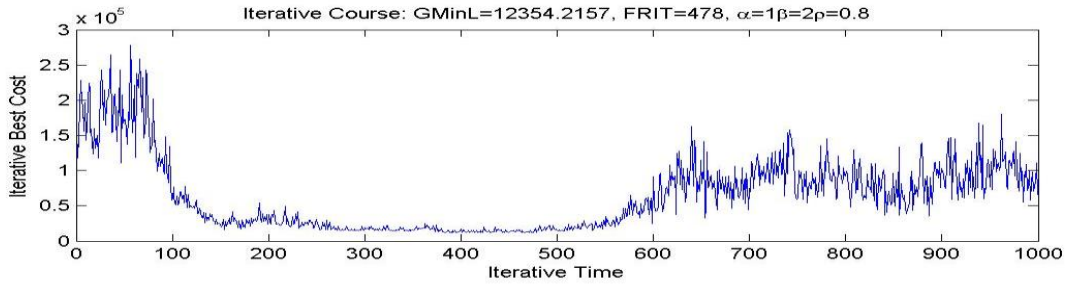
Domanda polarizzata su 2 prodotti

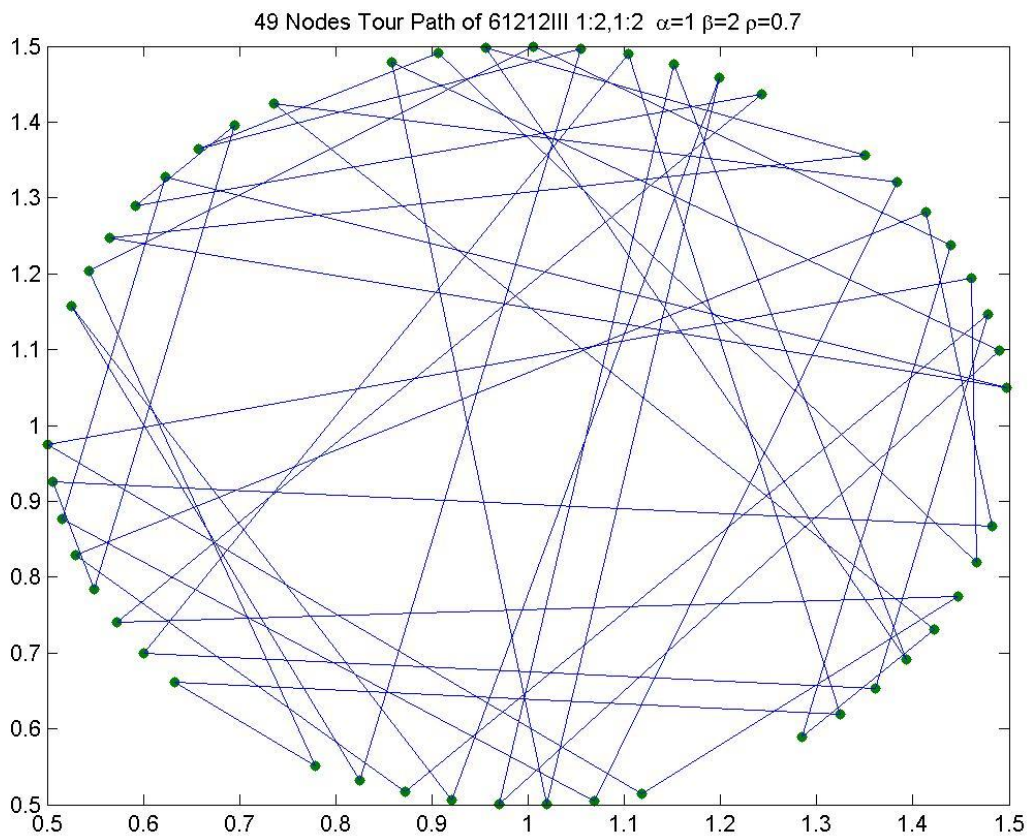
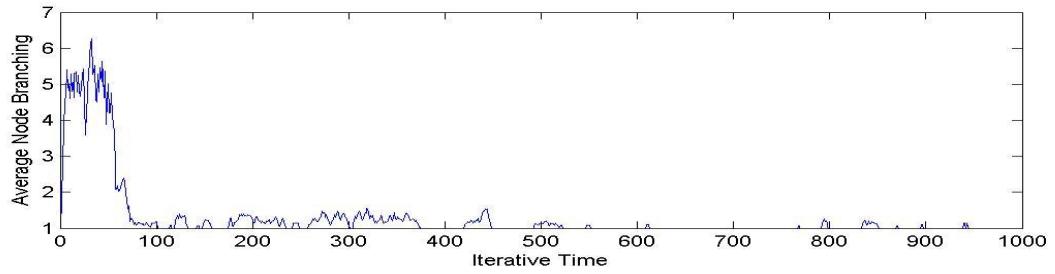
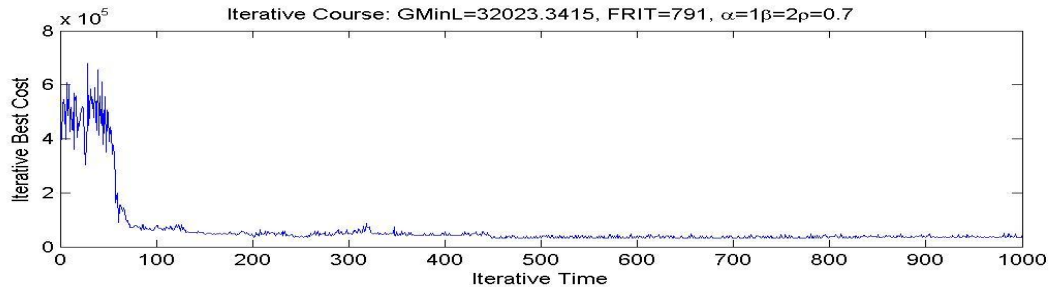


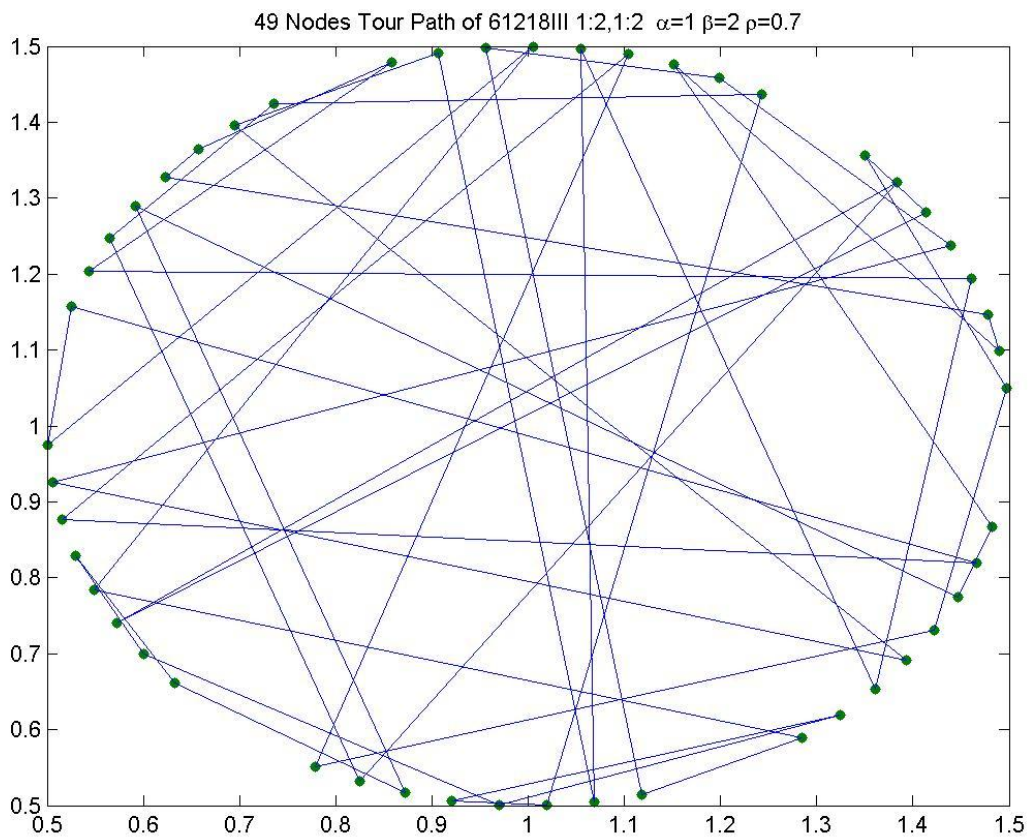
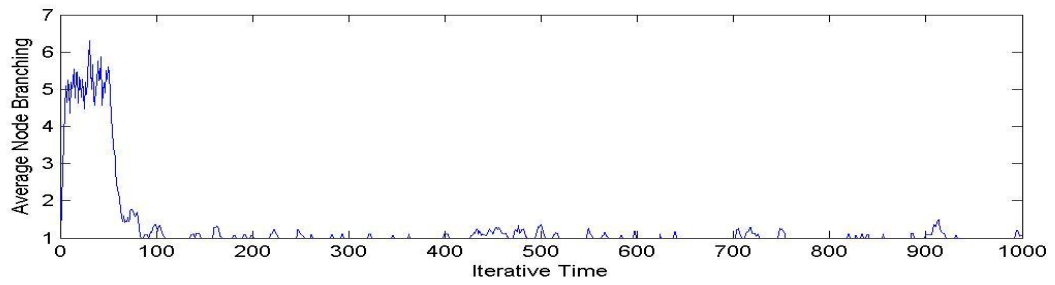
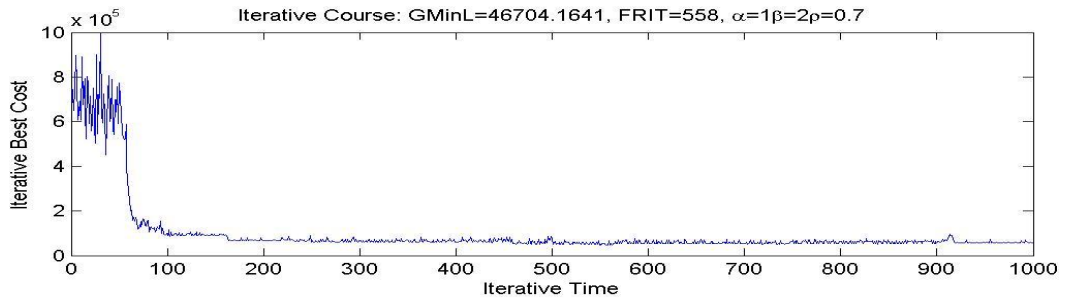




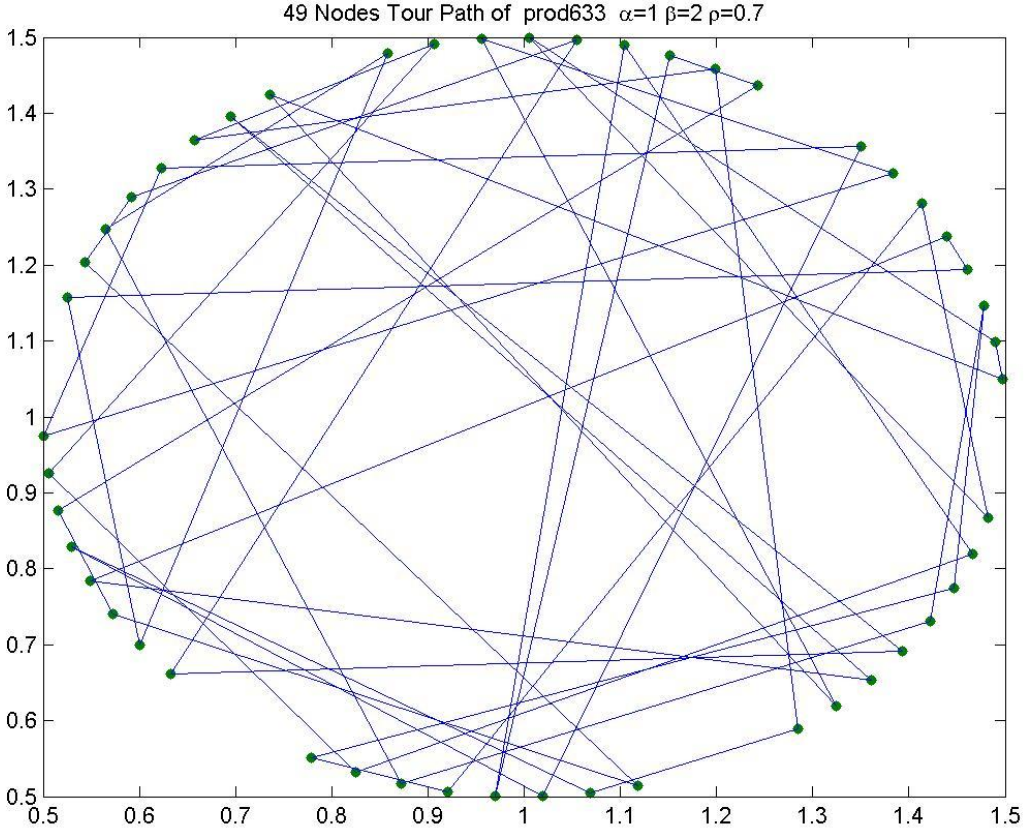
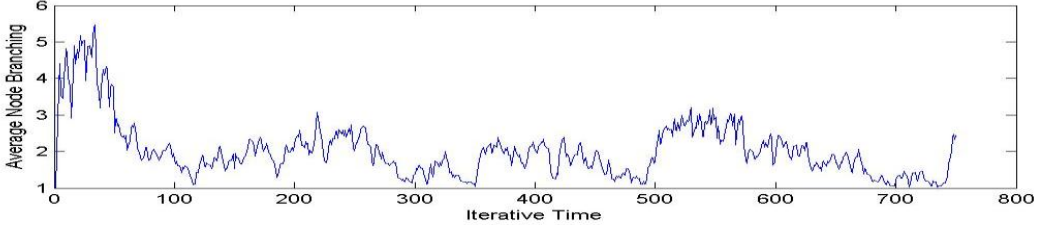
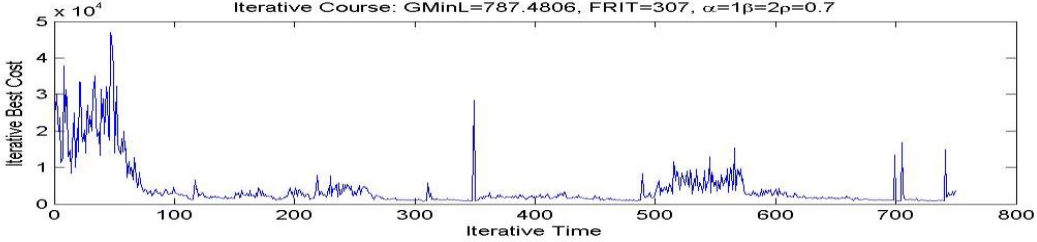


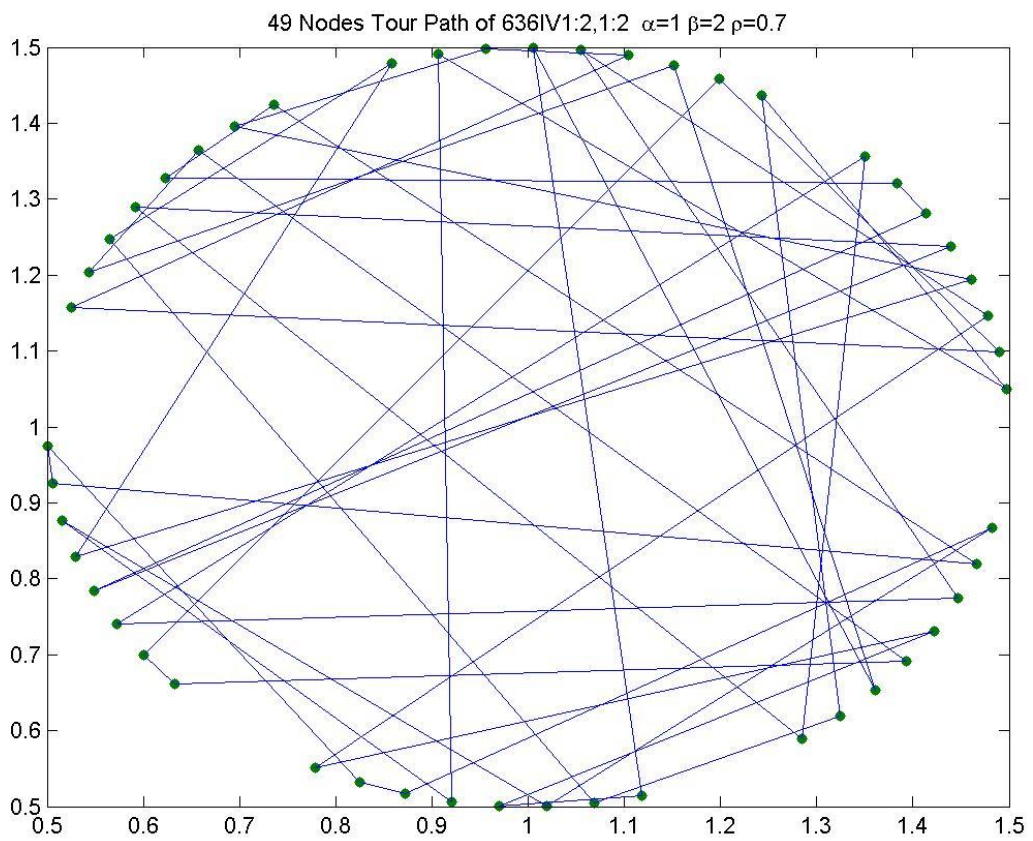
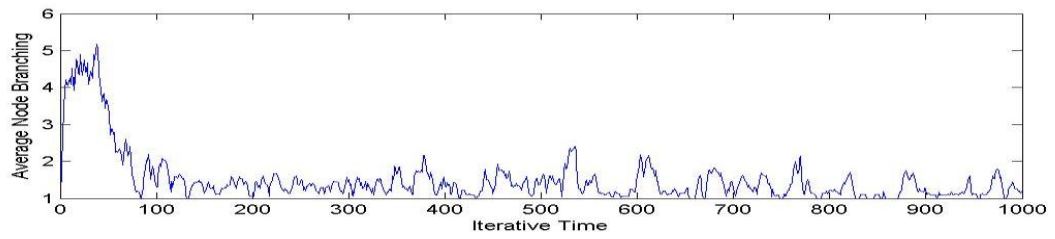
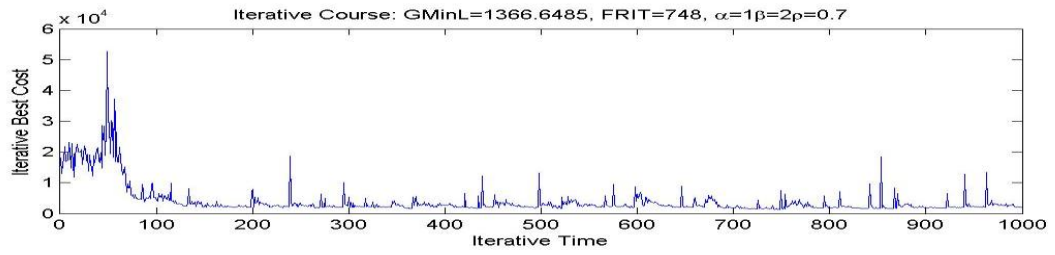


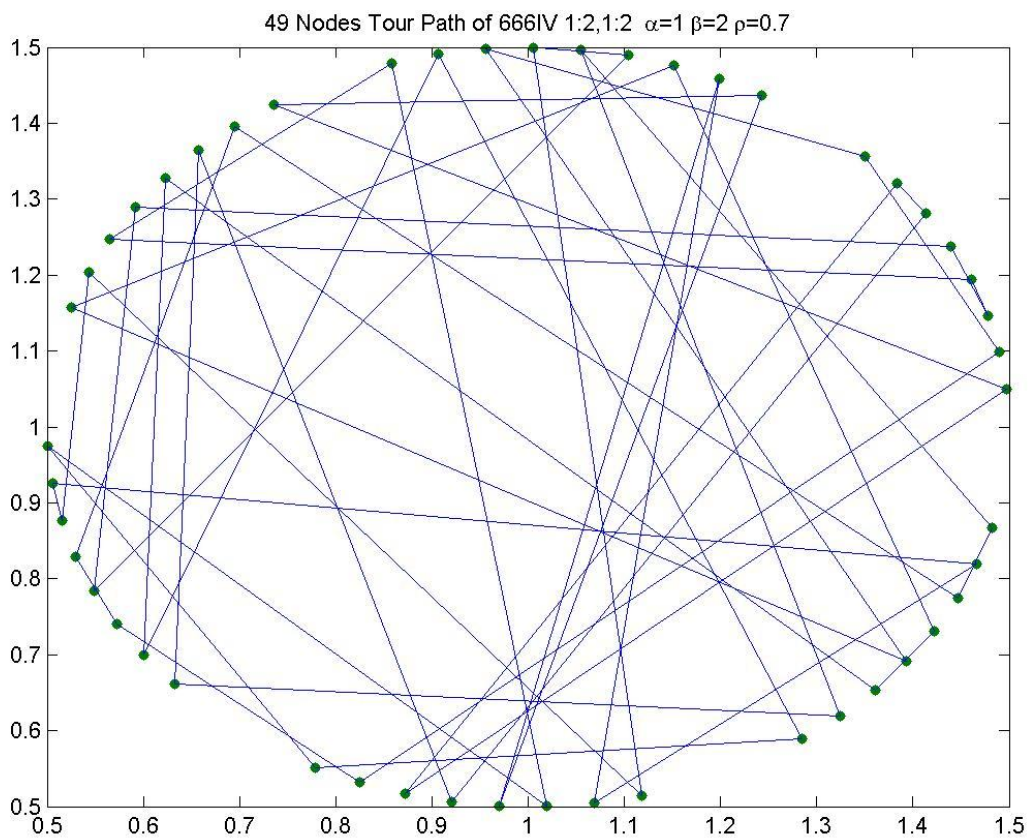
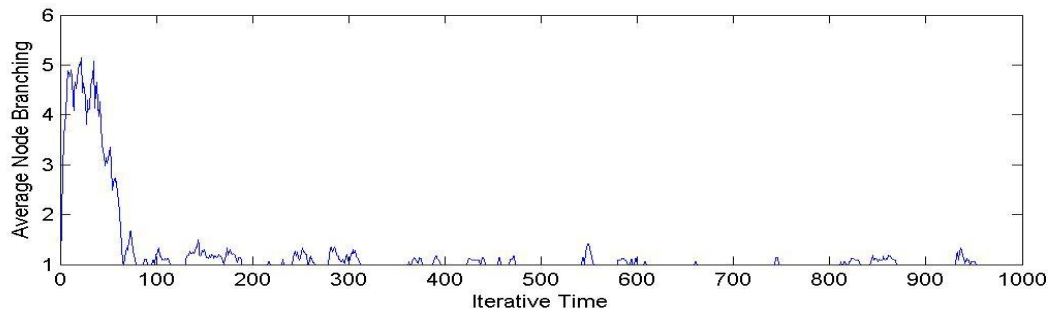
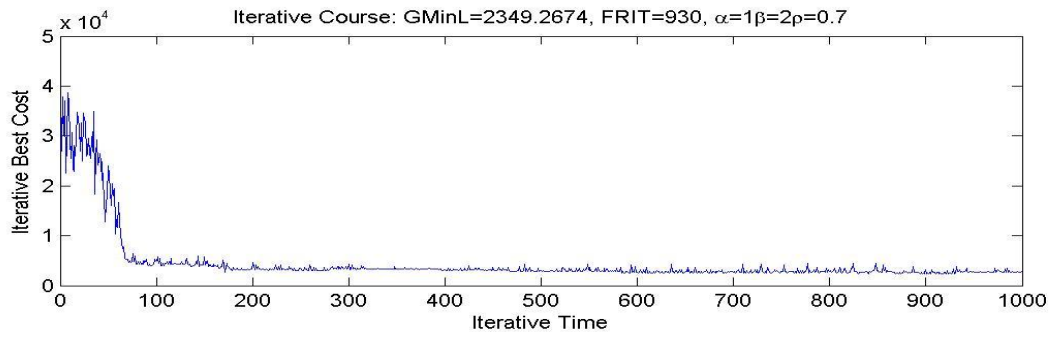


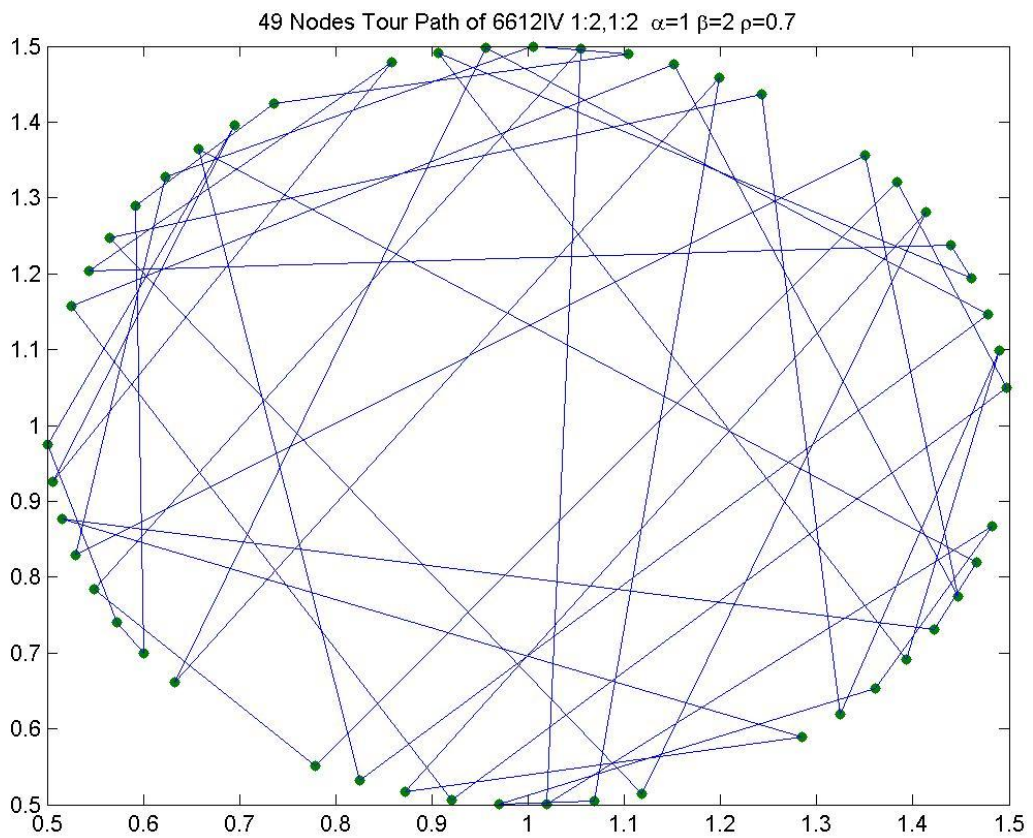
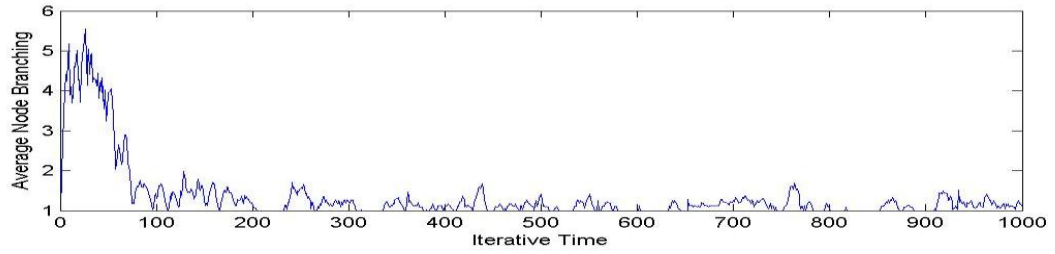
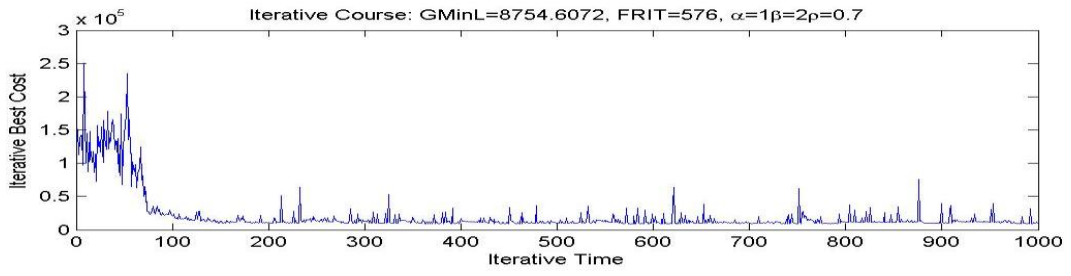


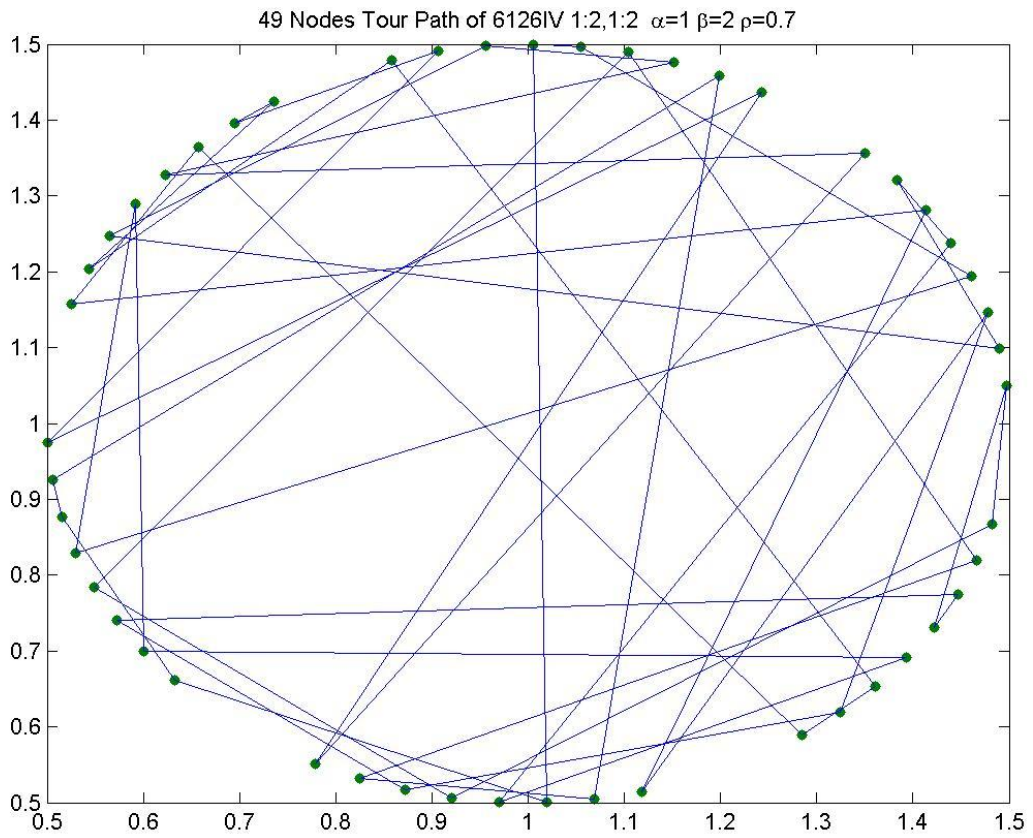
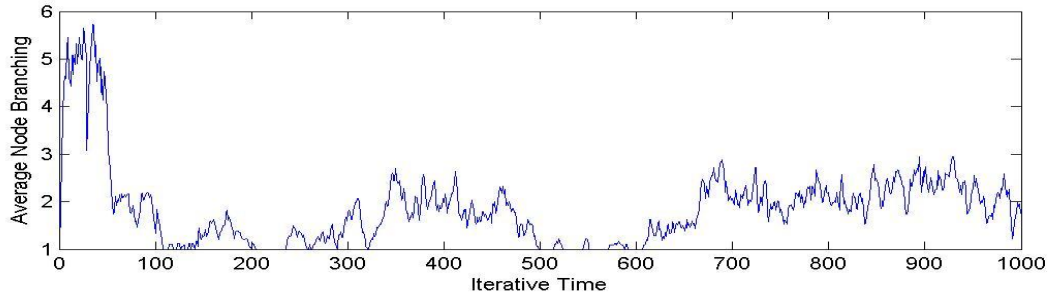
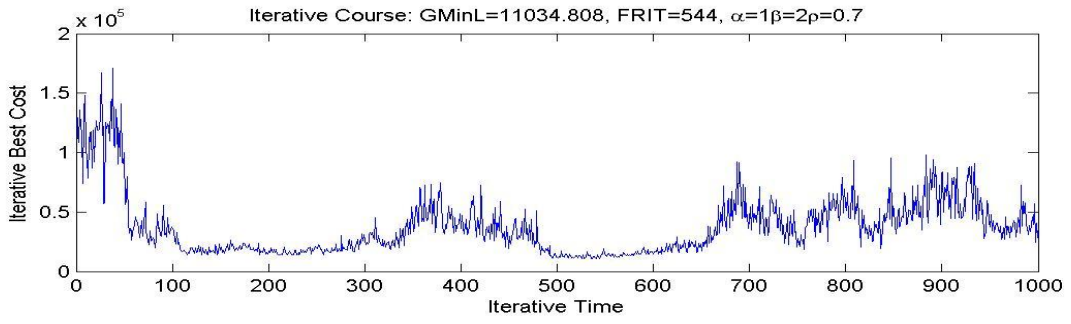
Domanda polarizzata su 1 prodotto

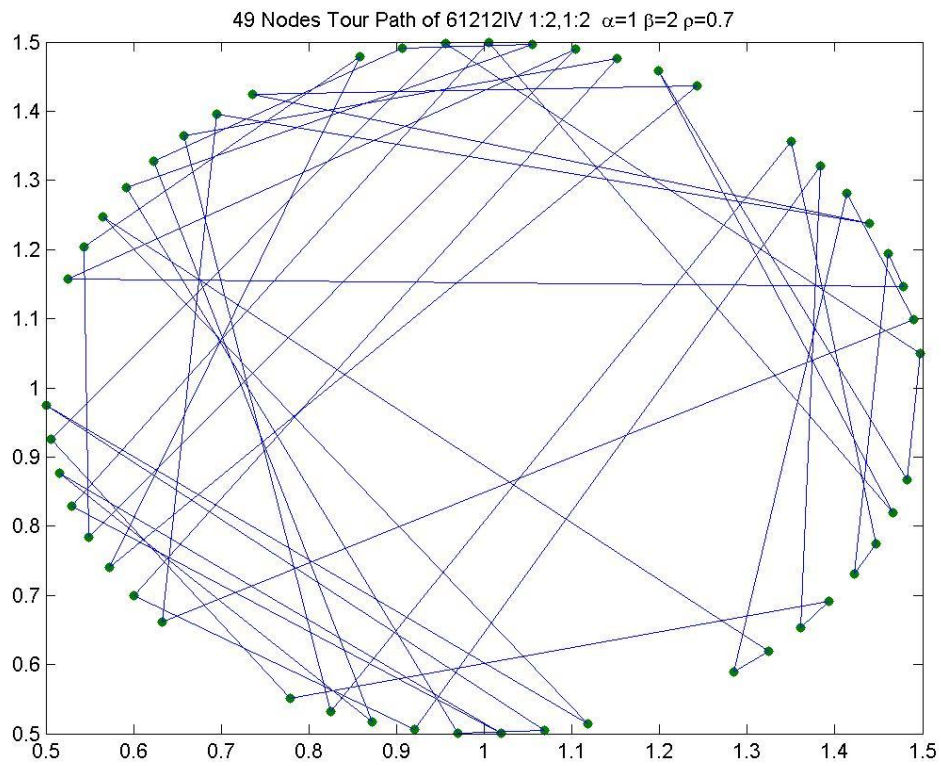
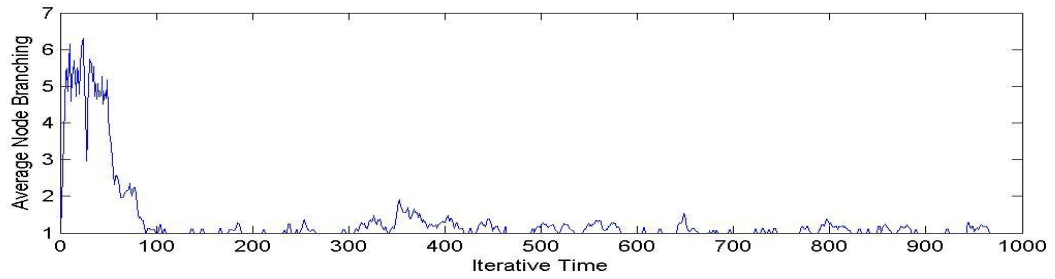
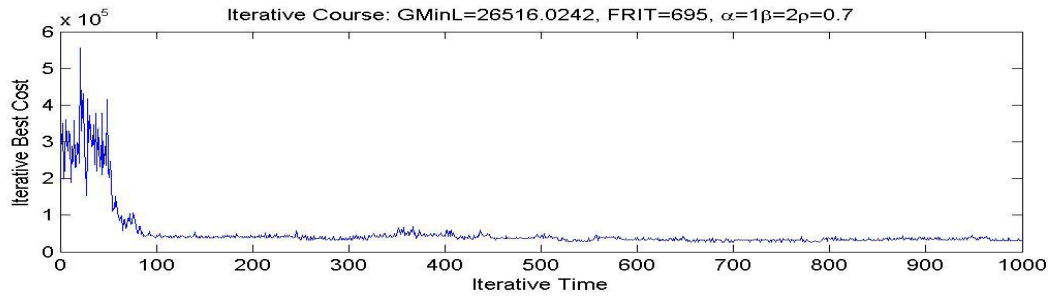


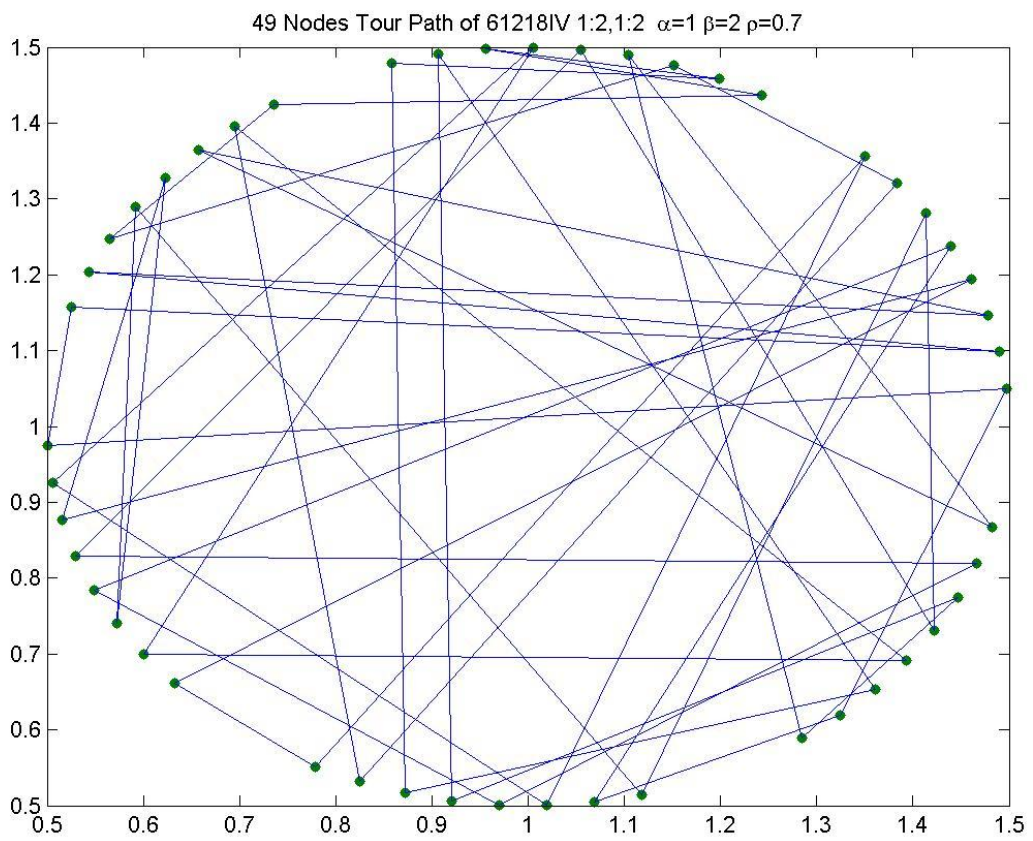
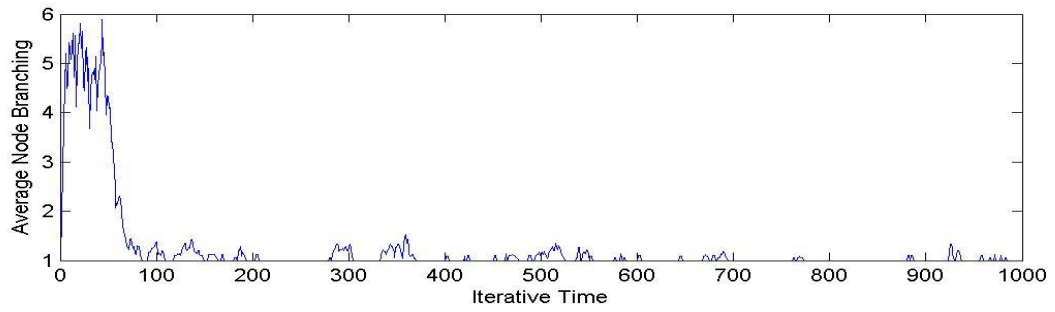
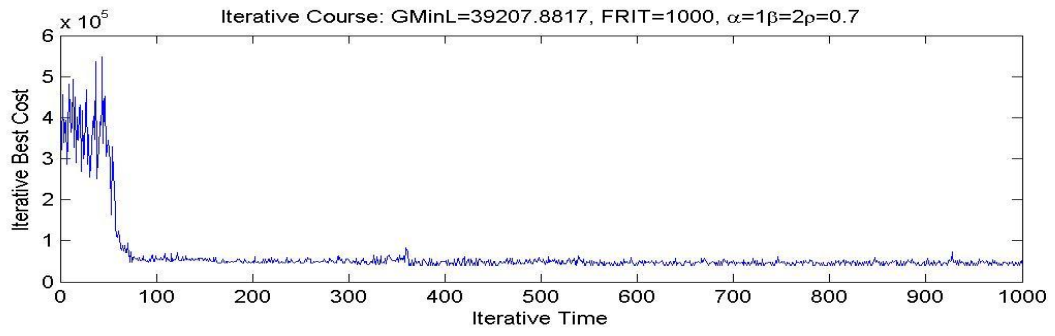




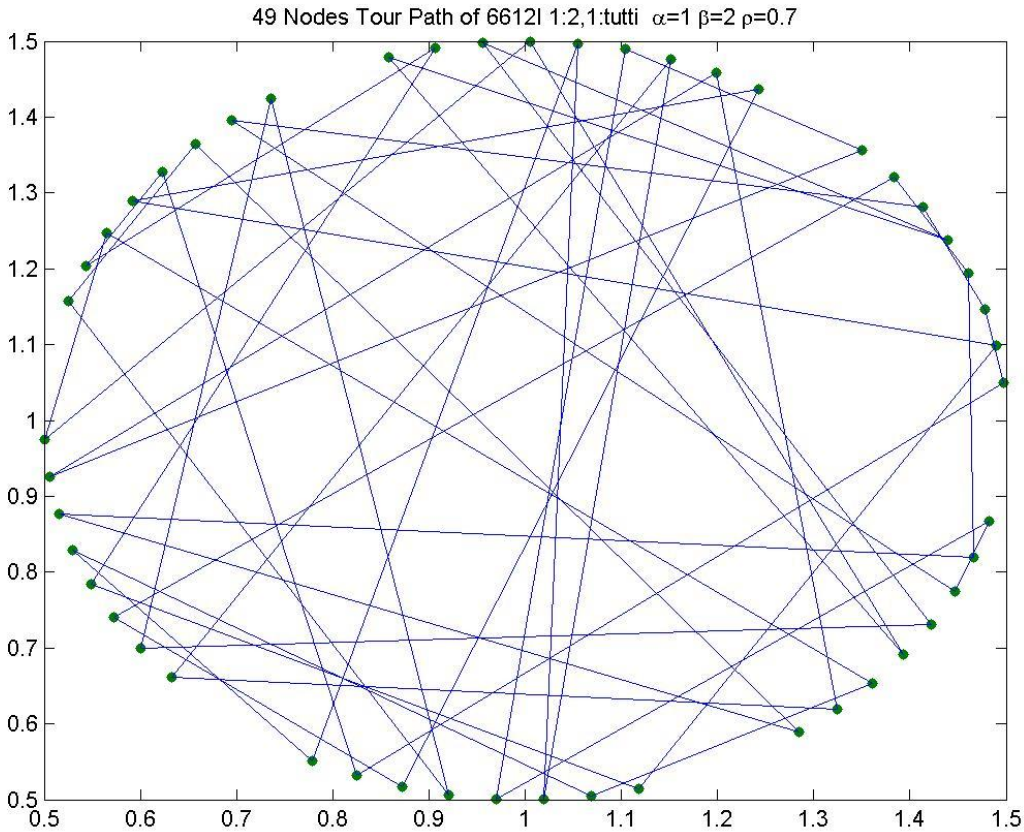
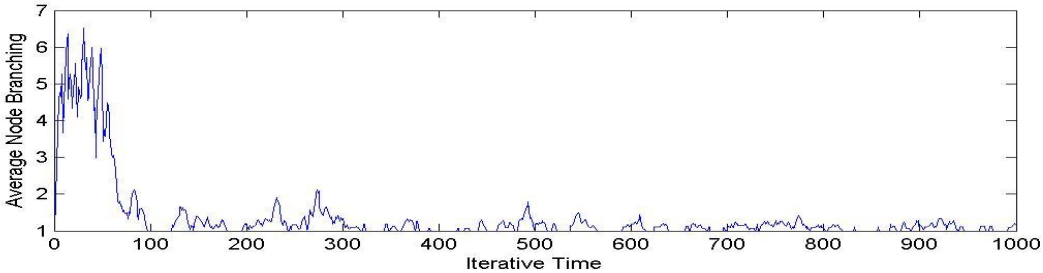
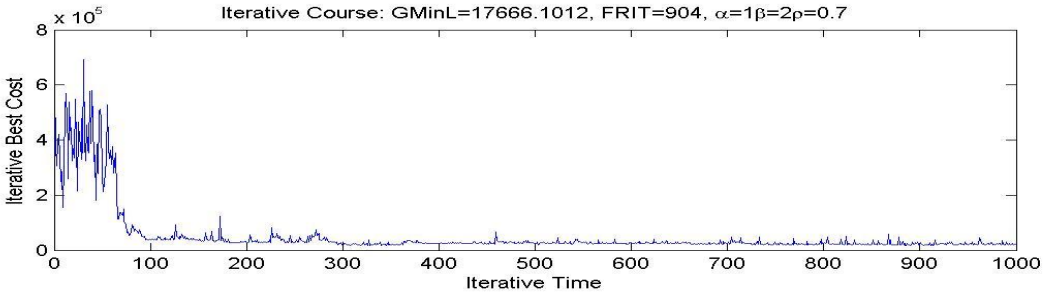


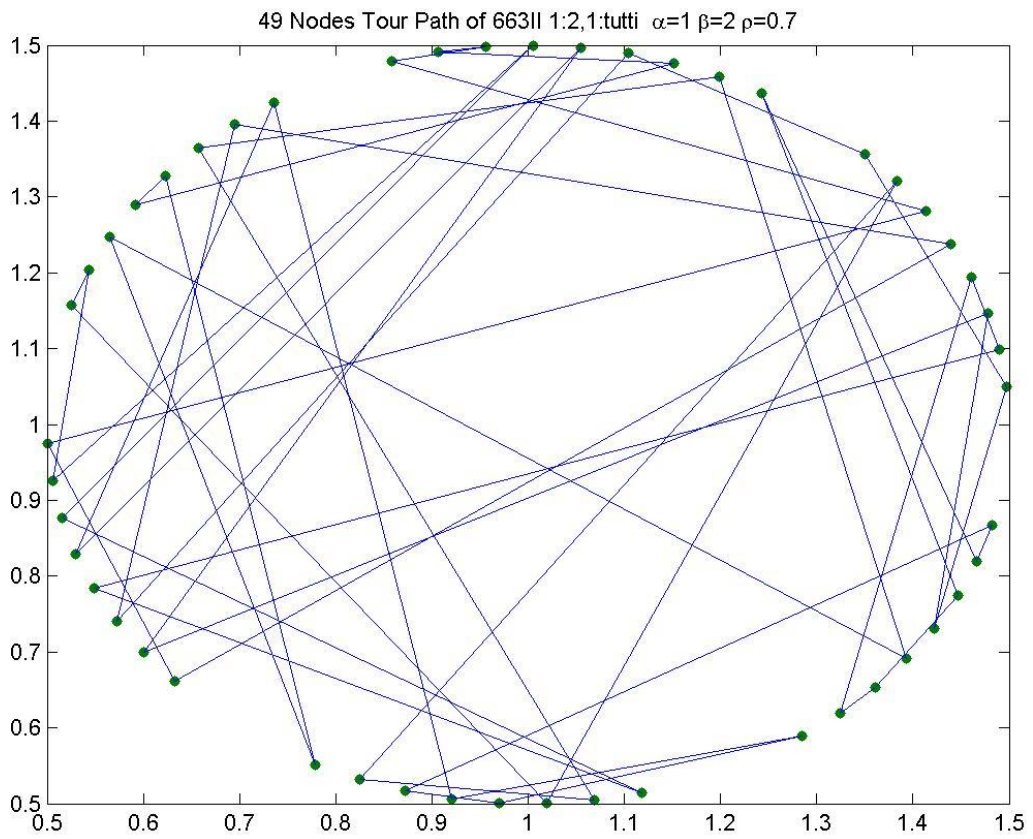
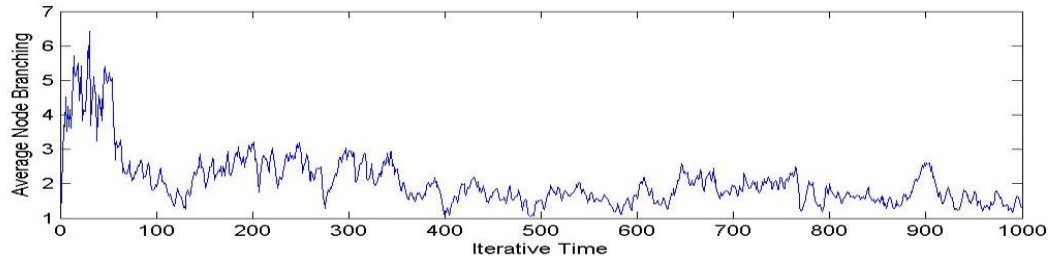
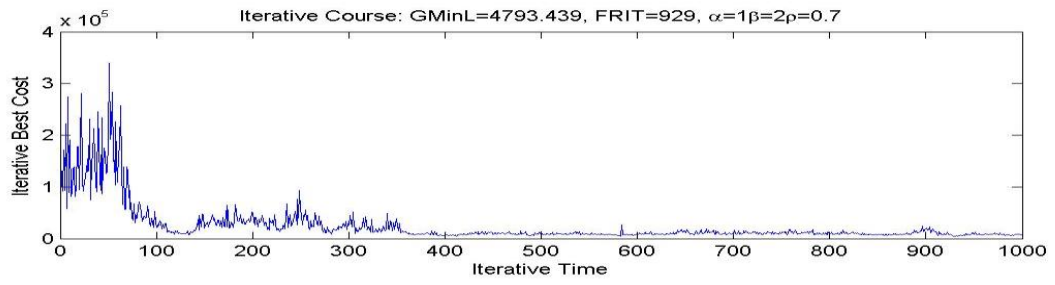


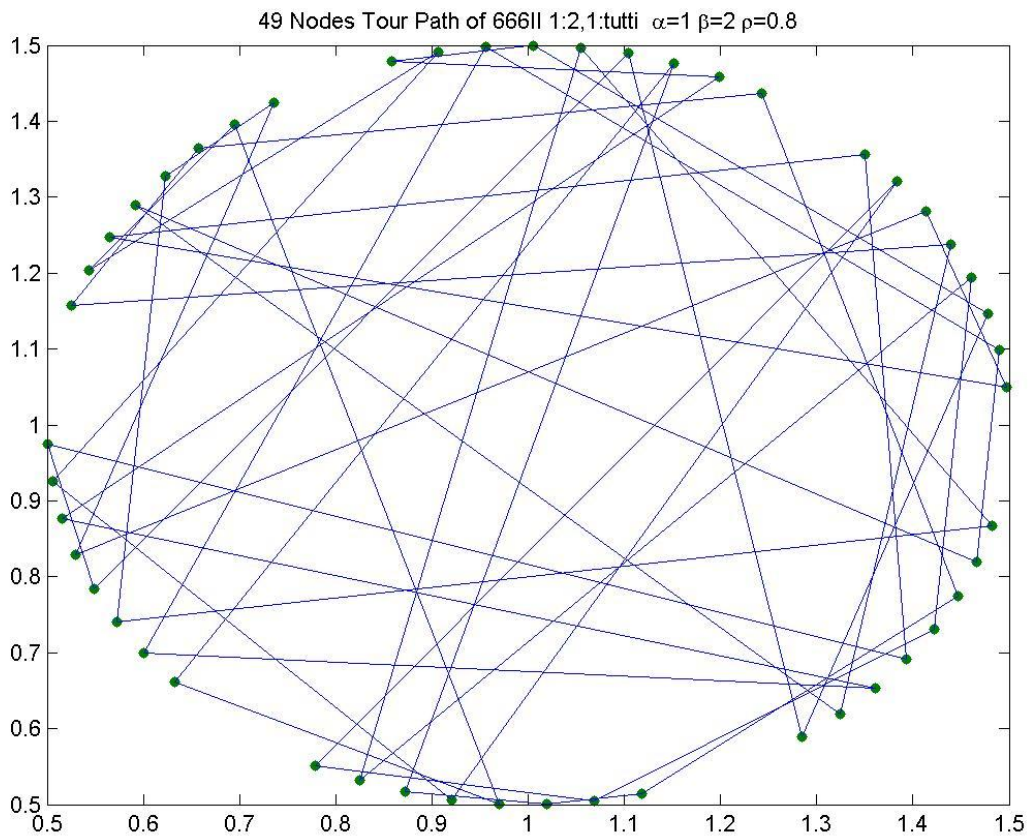
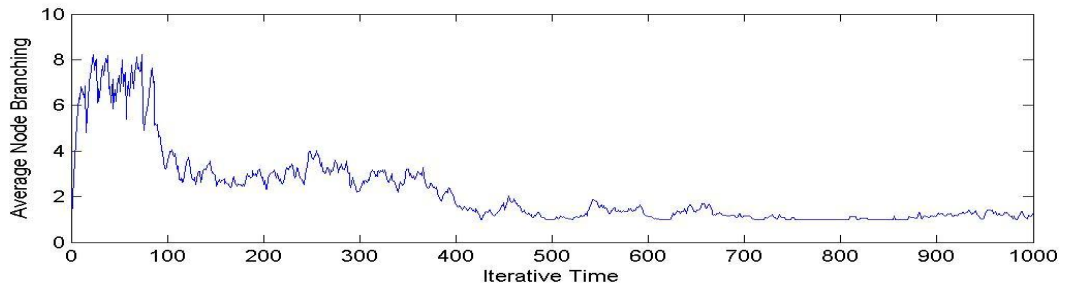
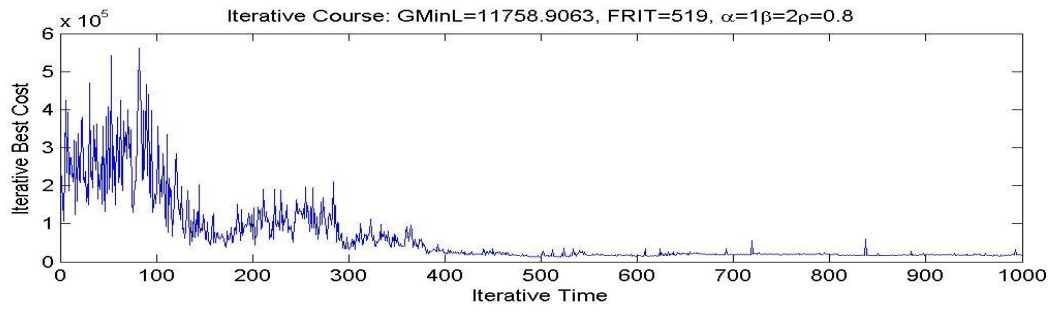


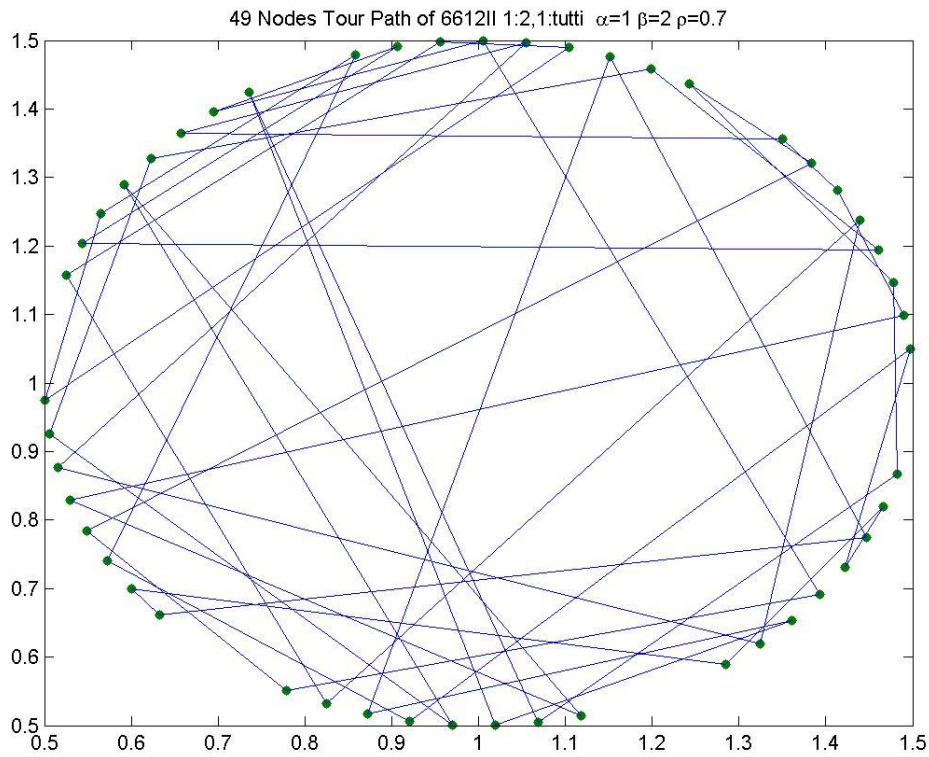
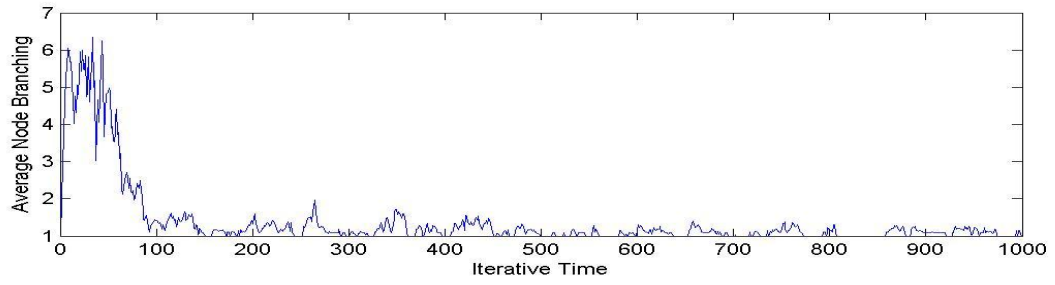
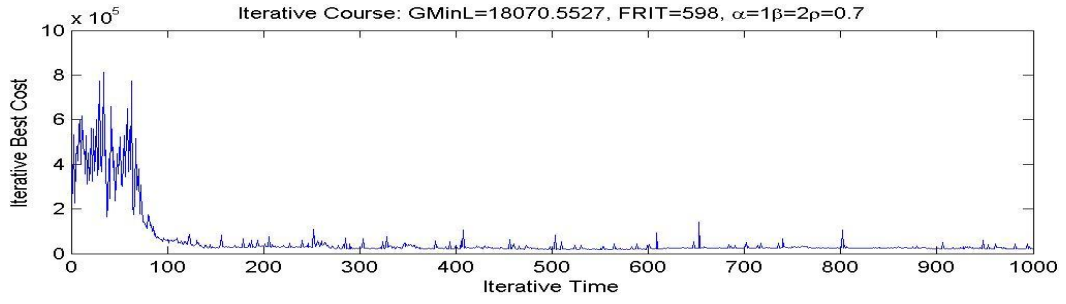


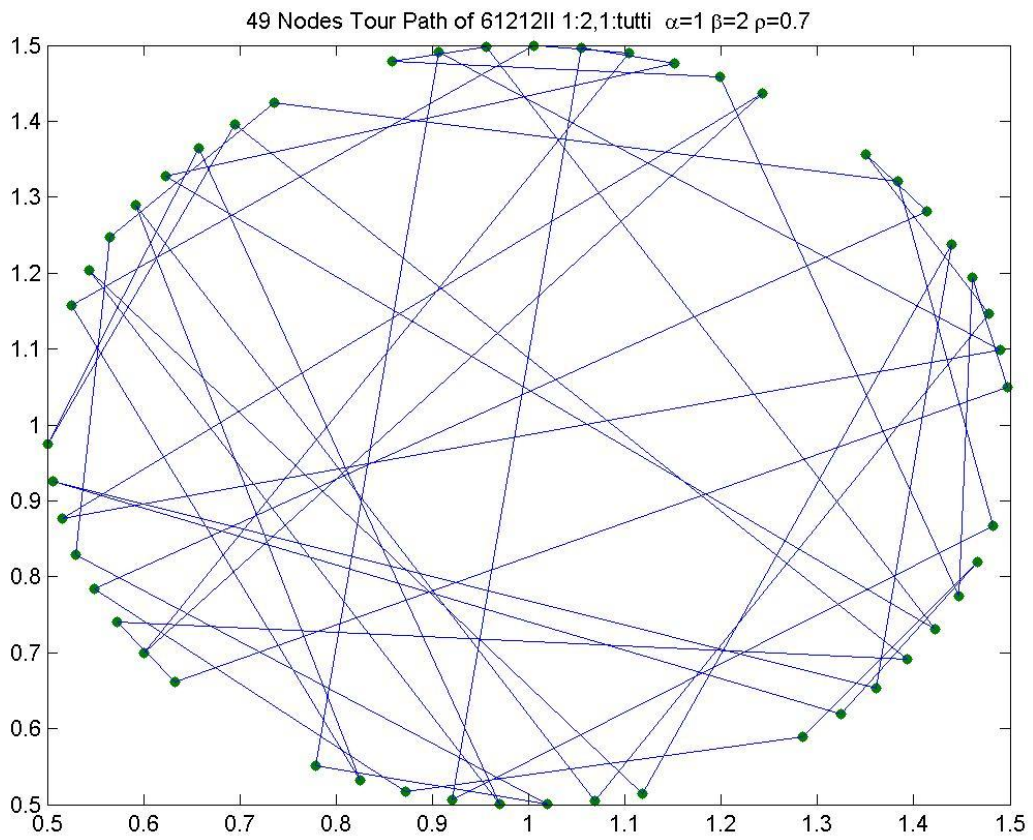
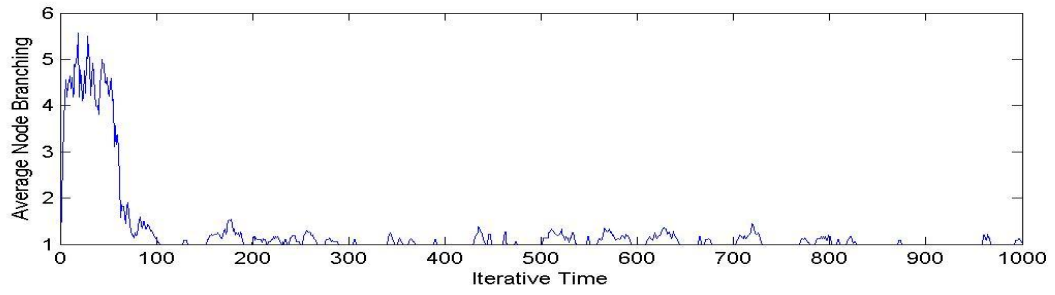
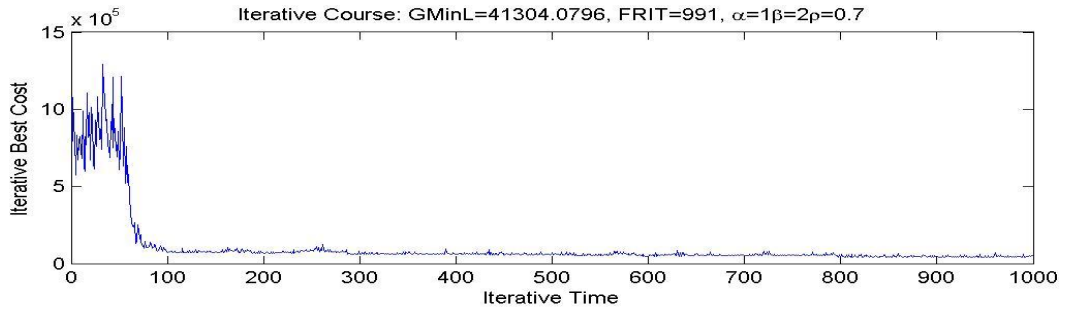
1-2 1-tutti Domanda Uniforme

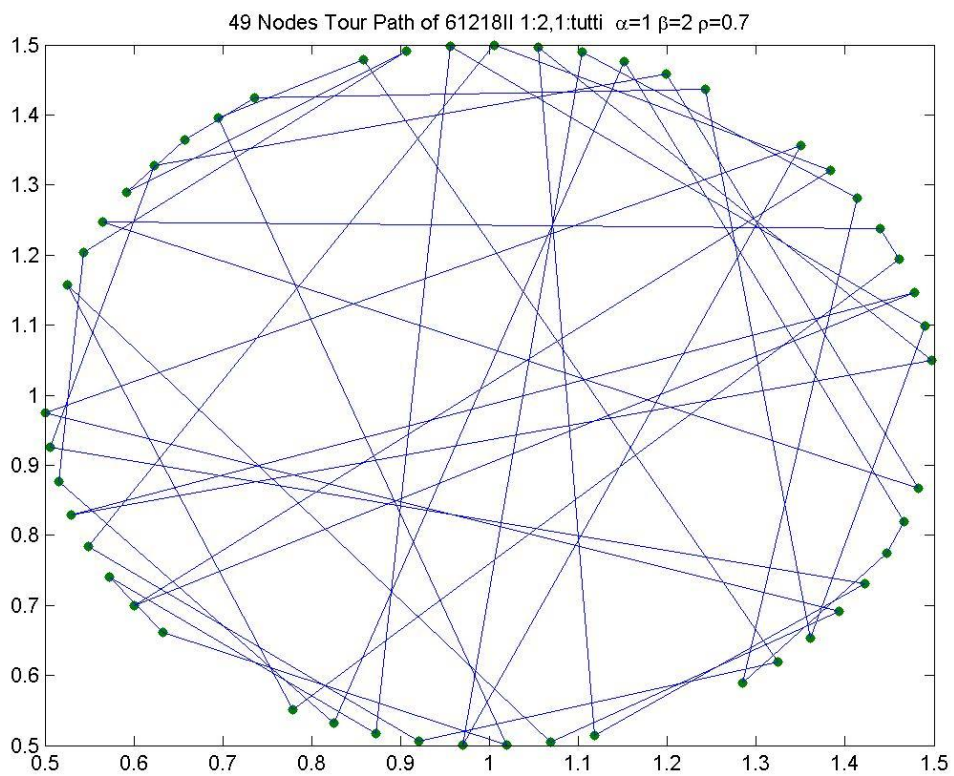
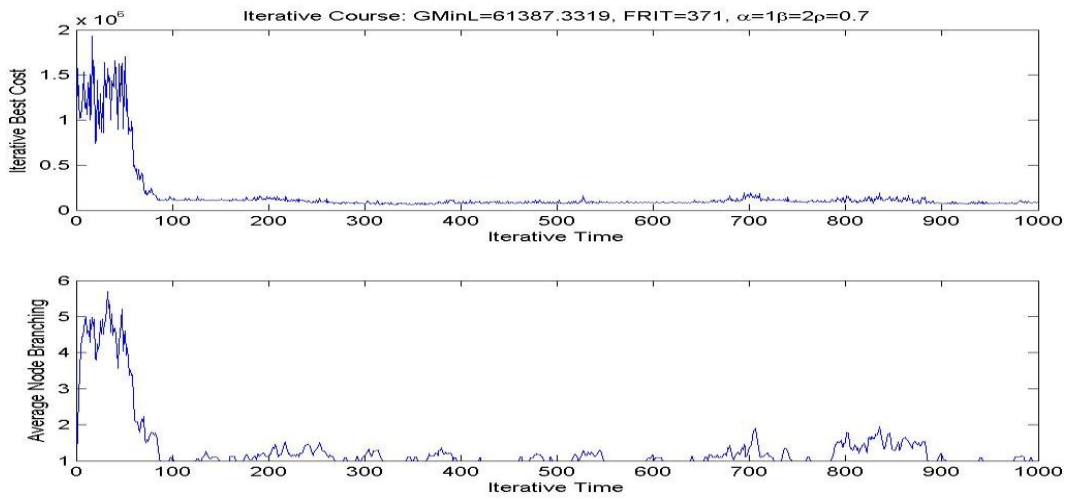




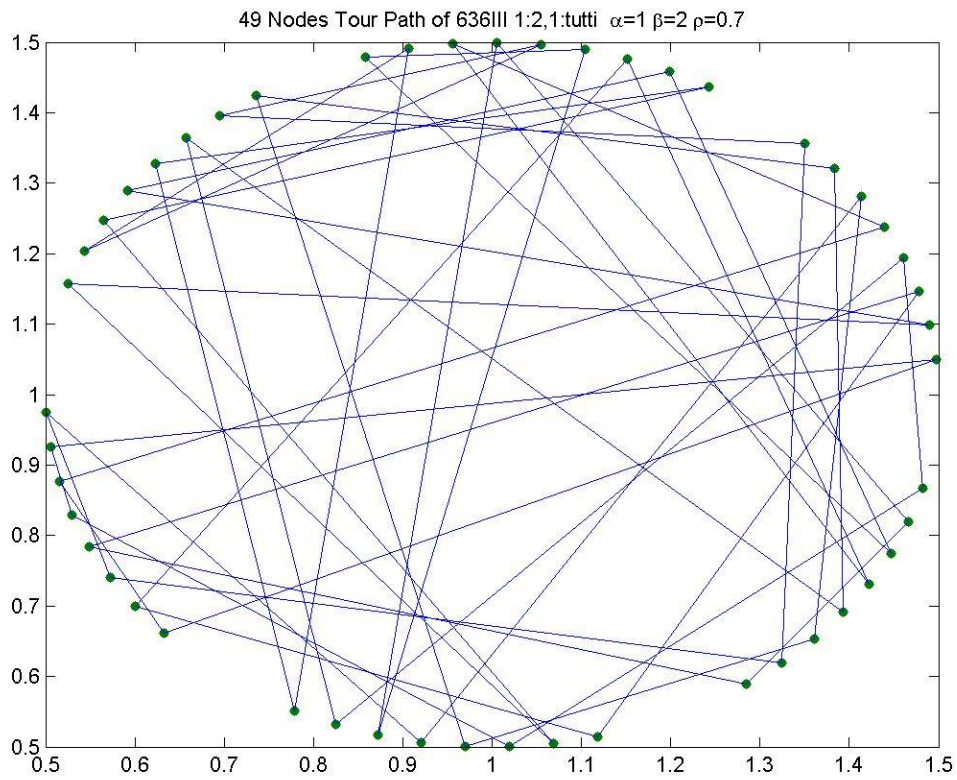
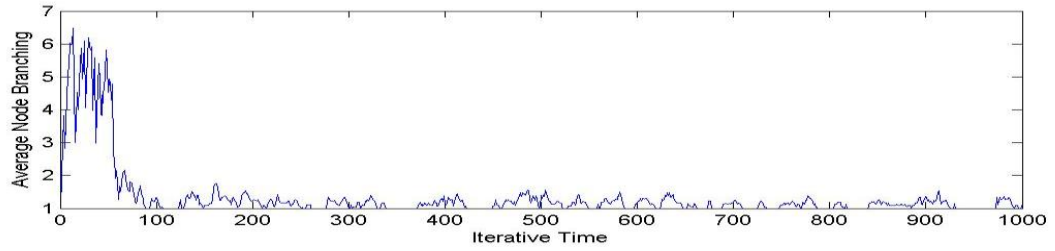
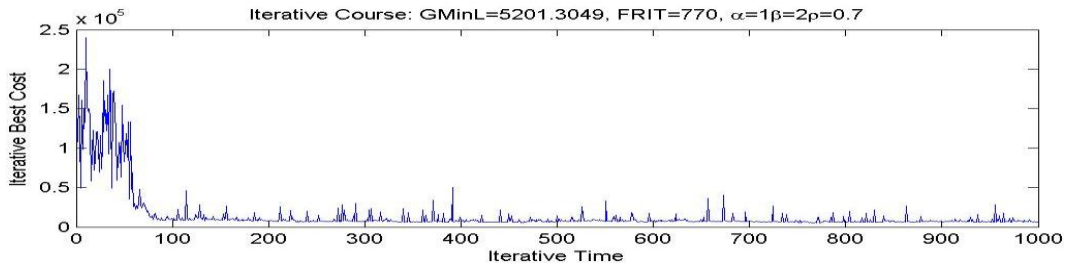


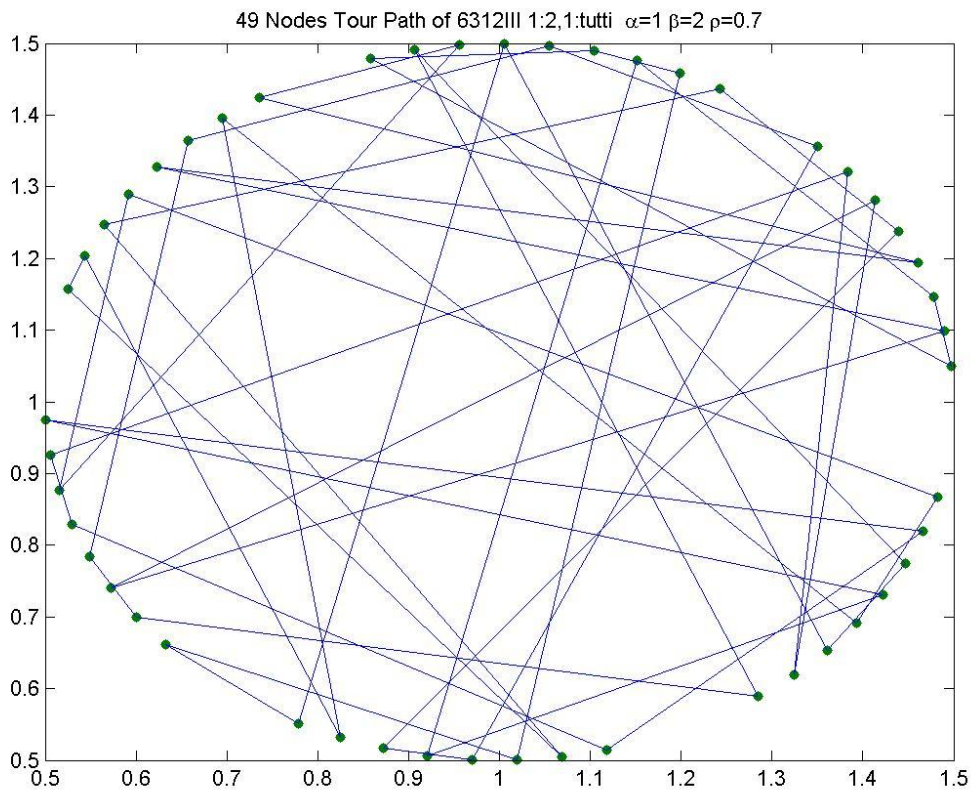
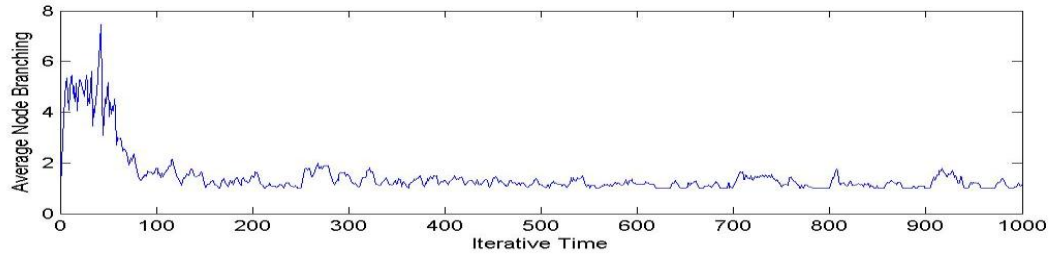
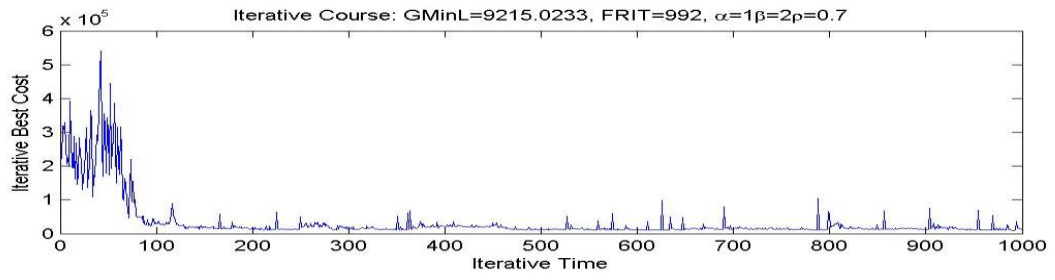


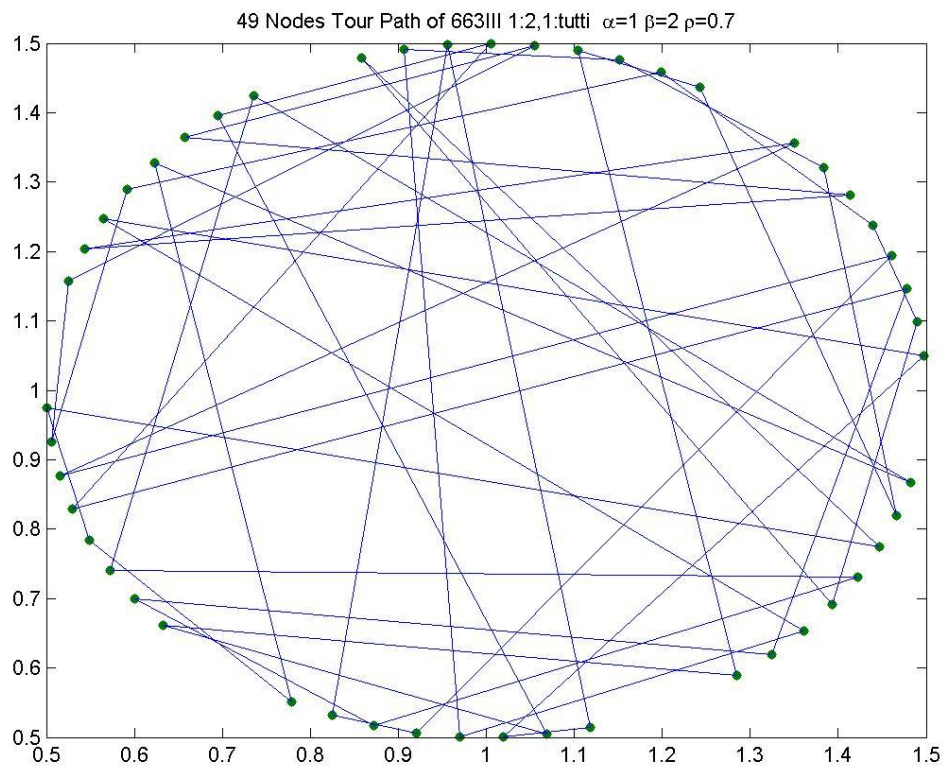
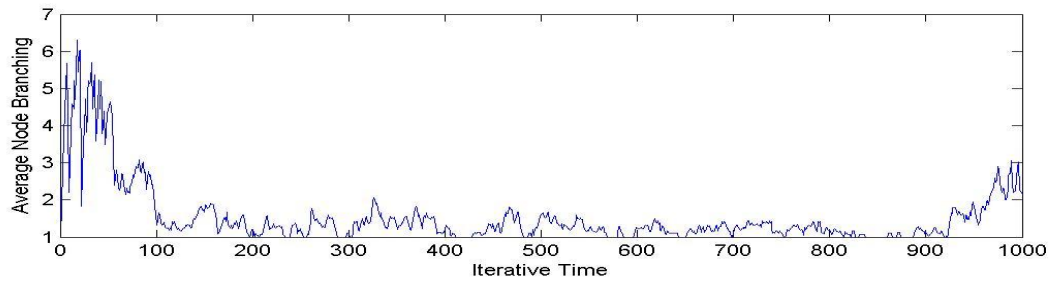
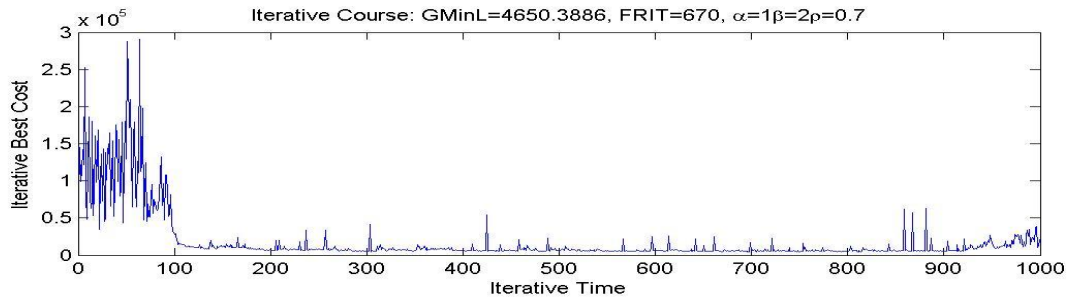


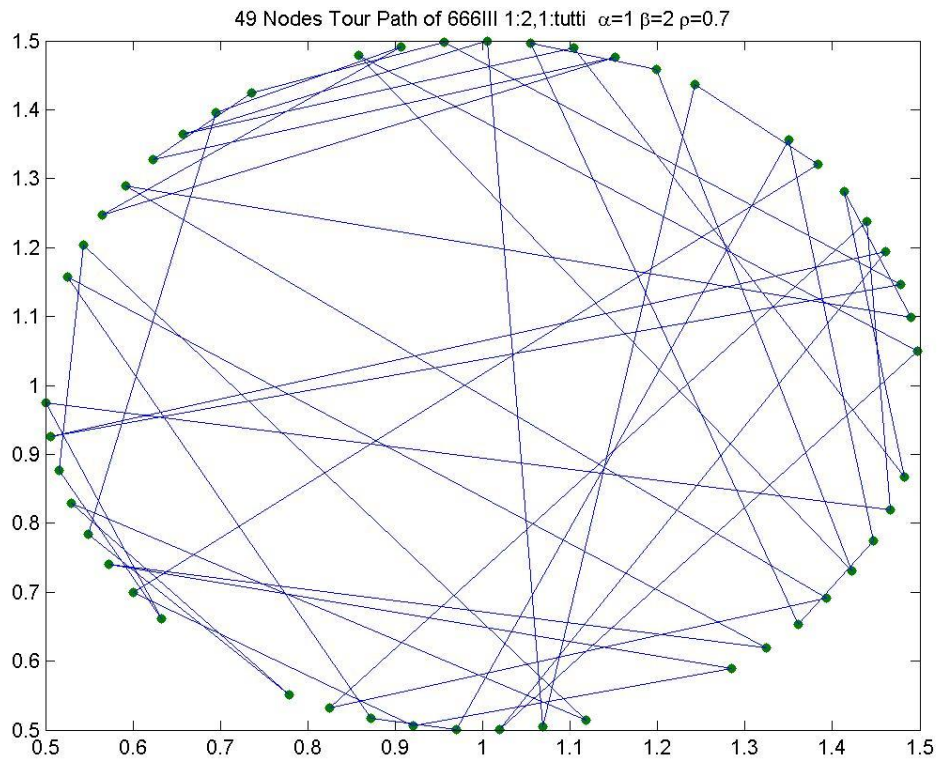
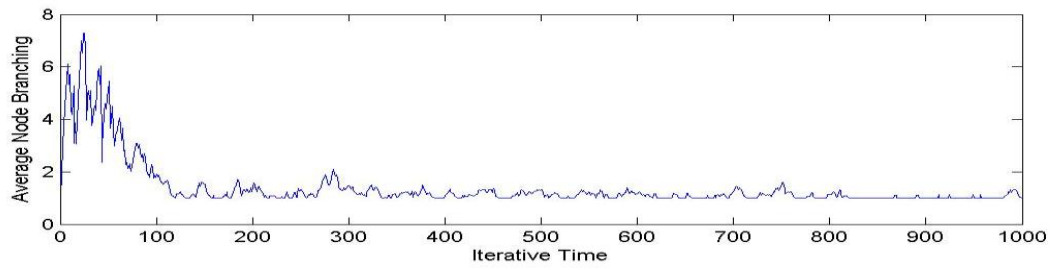
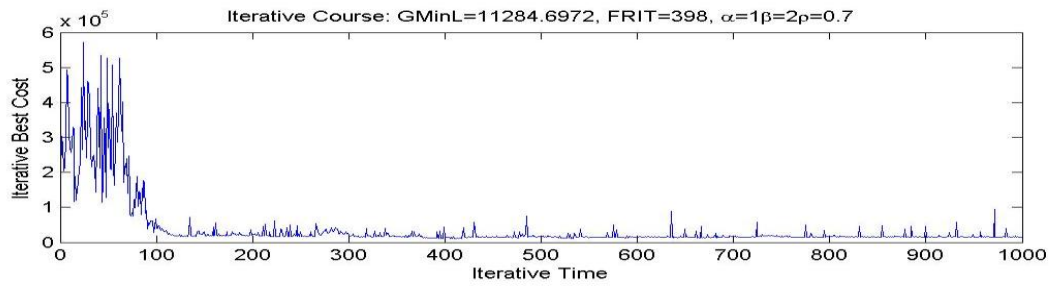


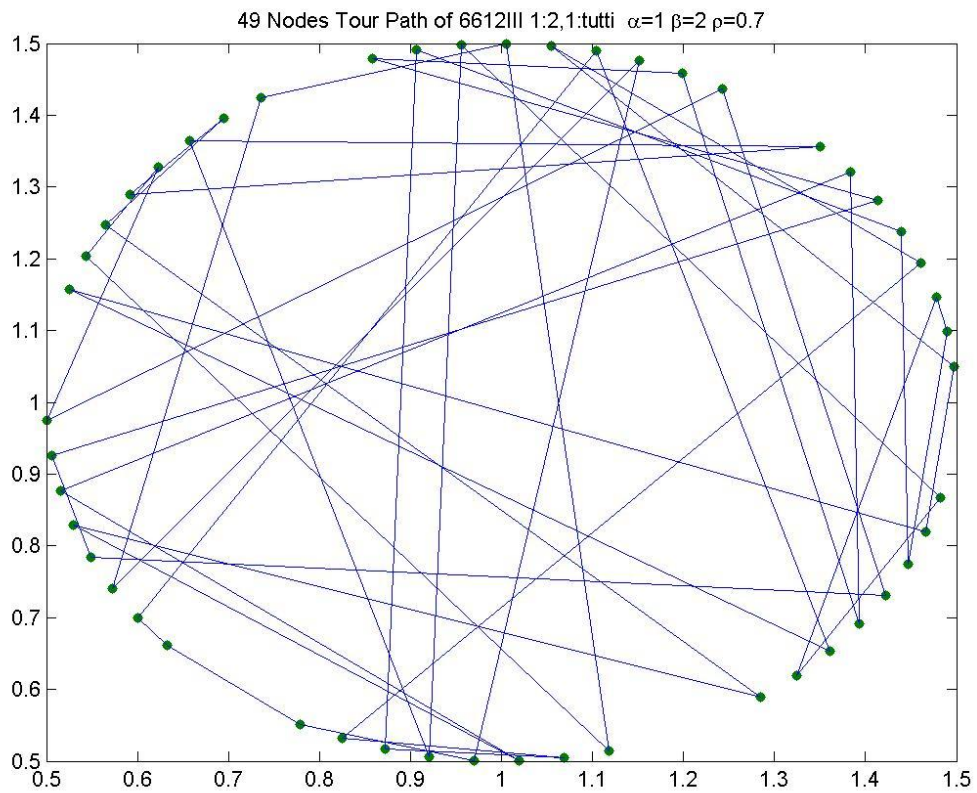
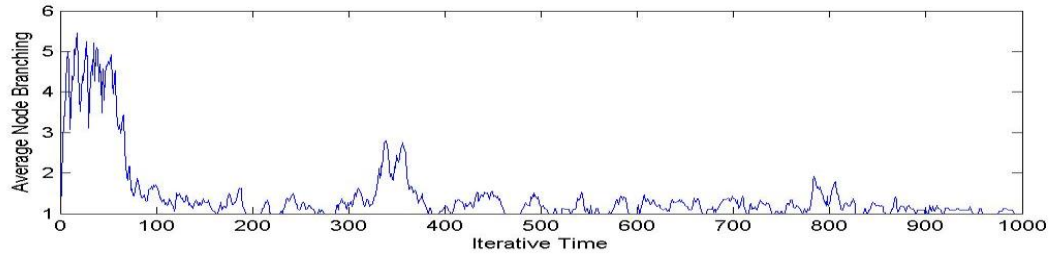
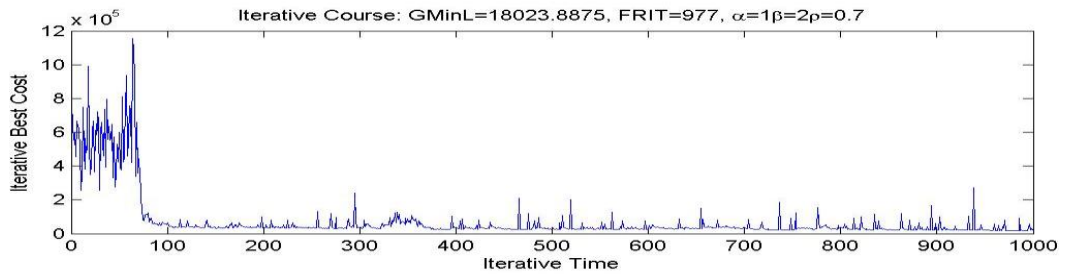
Domanda polarizzata su 2 prodotti

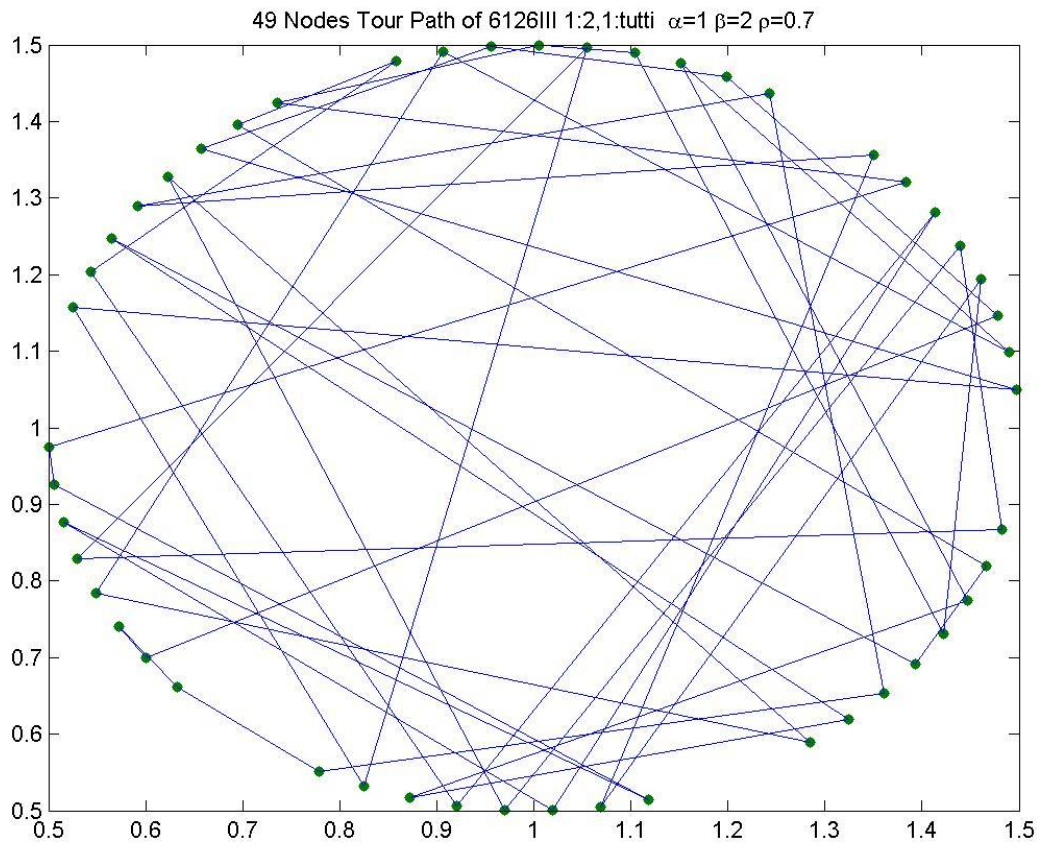
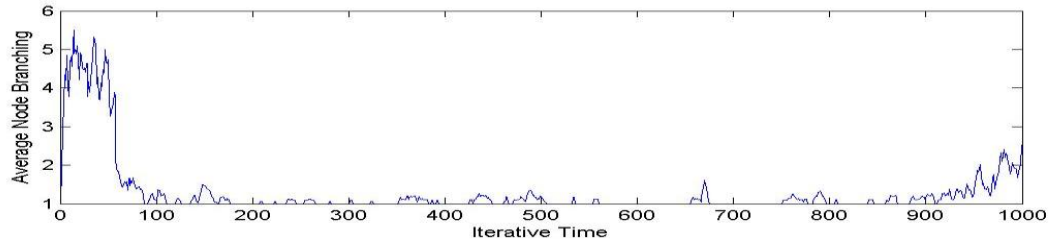
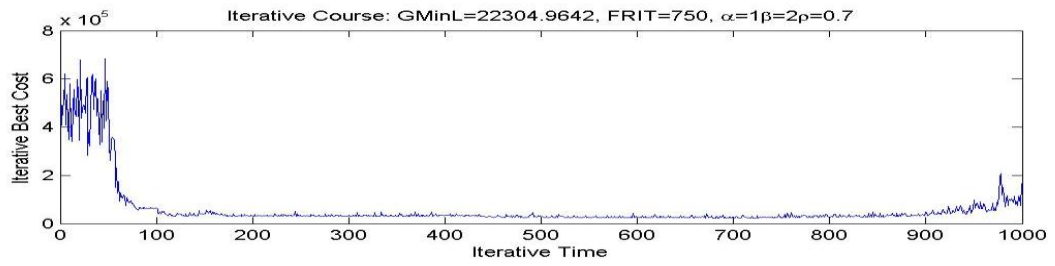


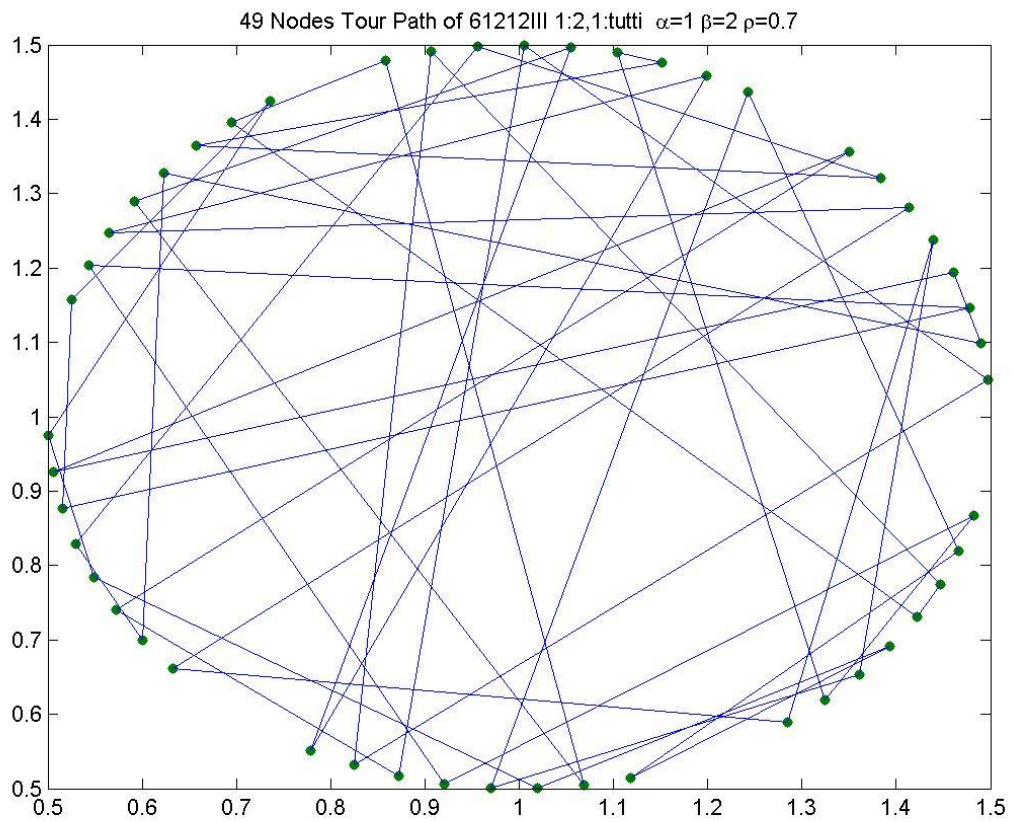
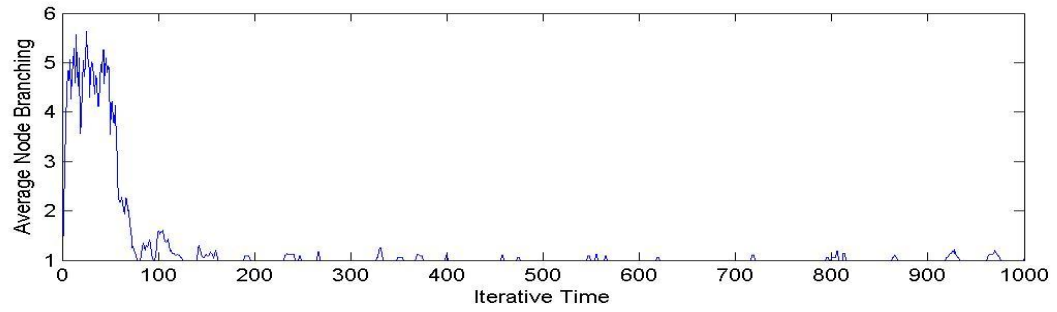
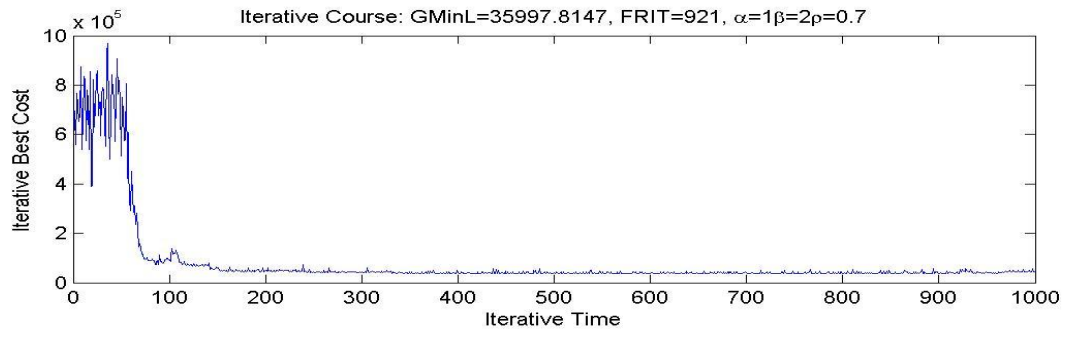


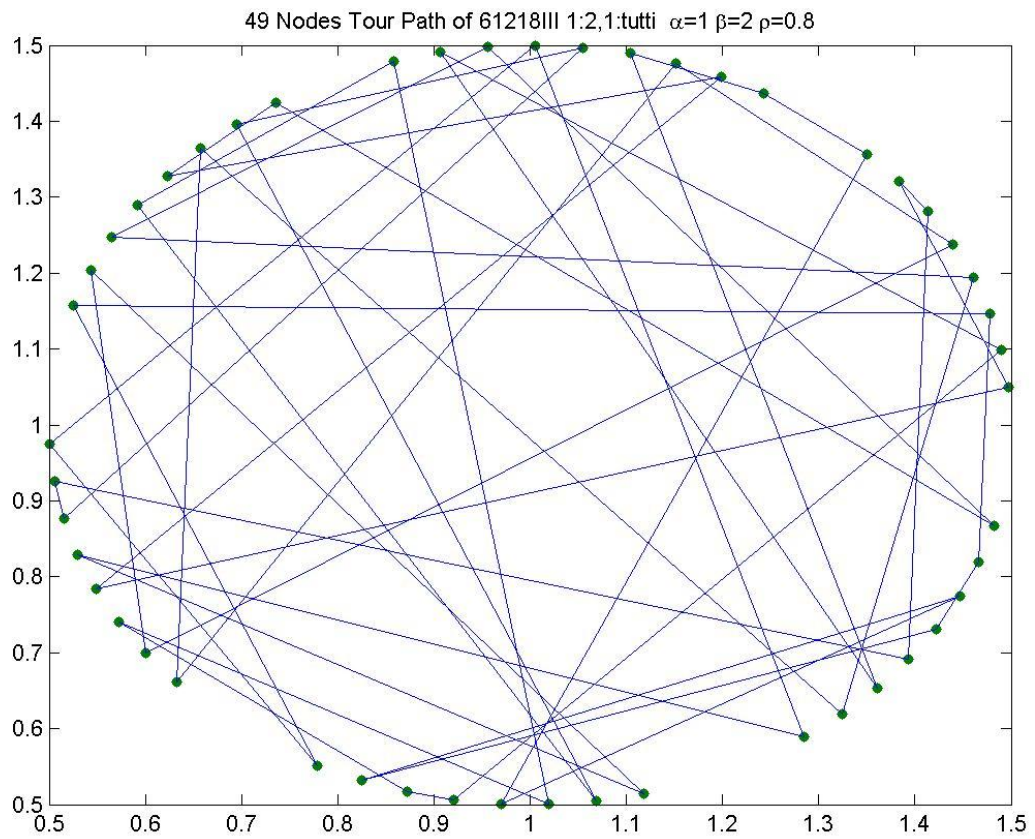
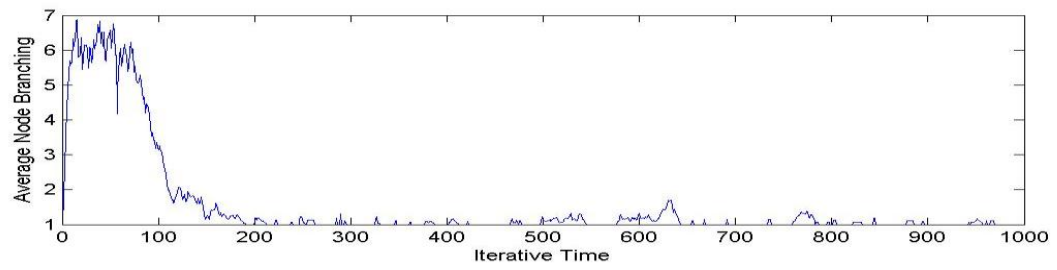
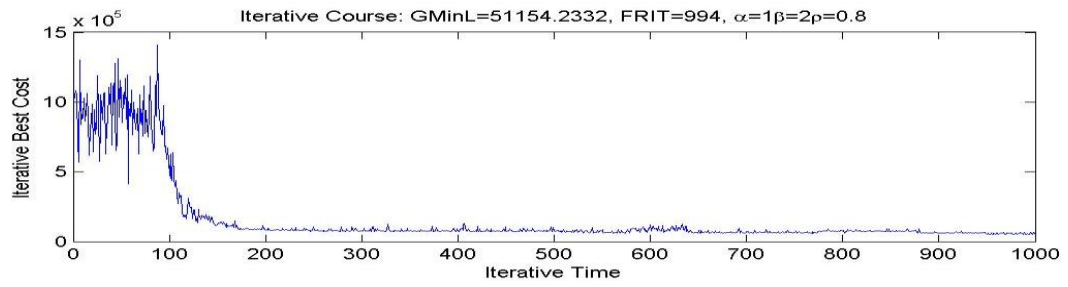




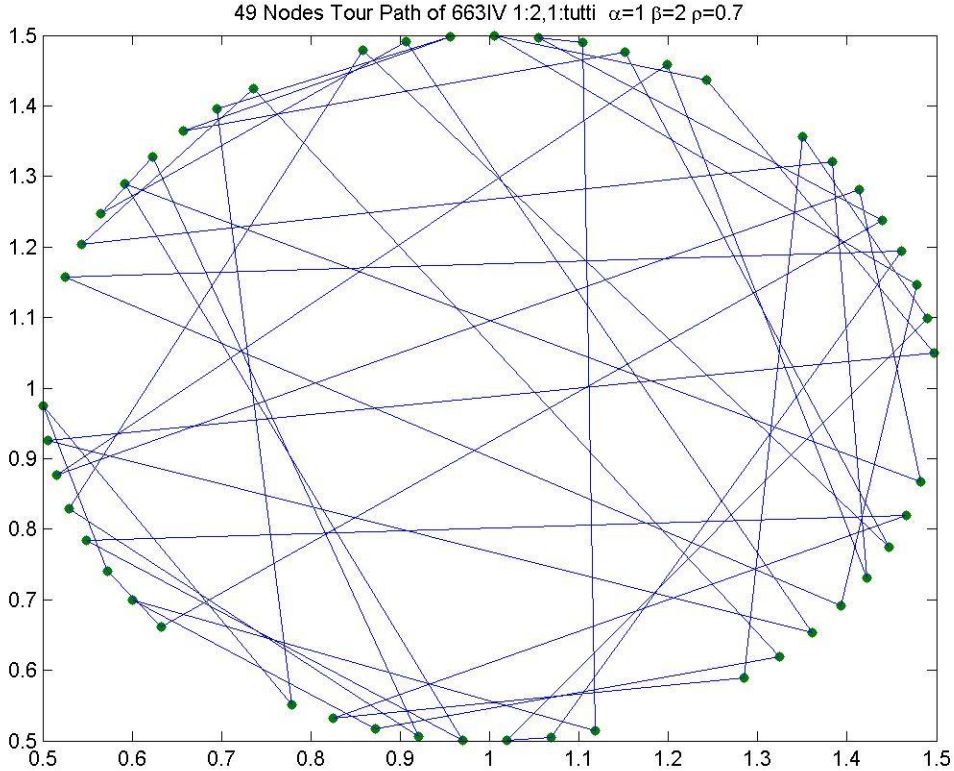
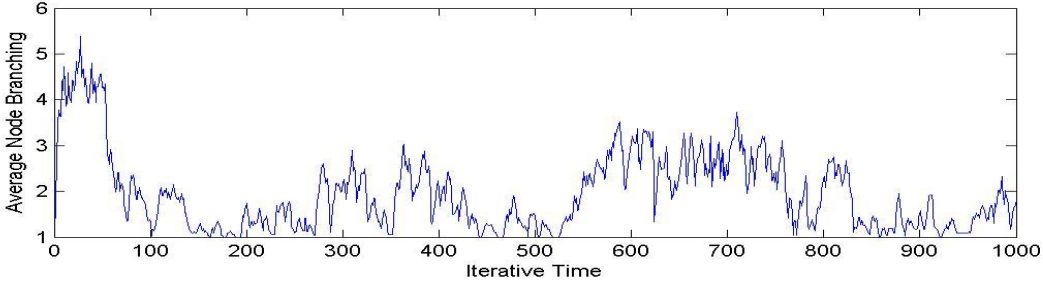
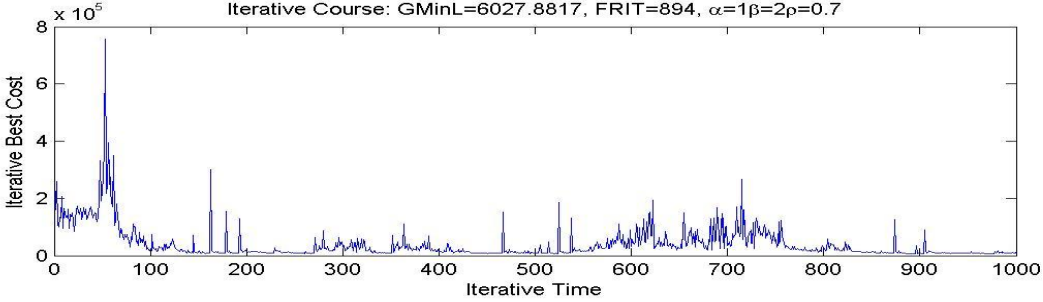


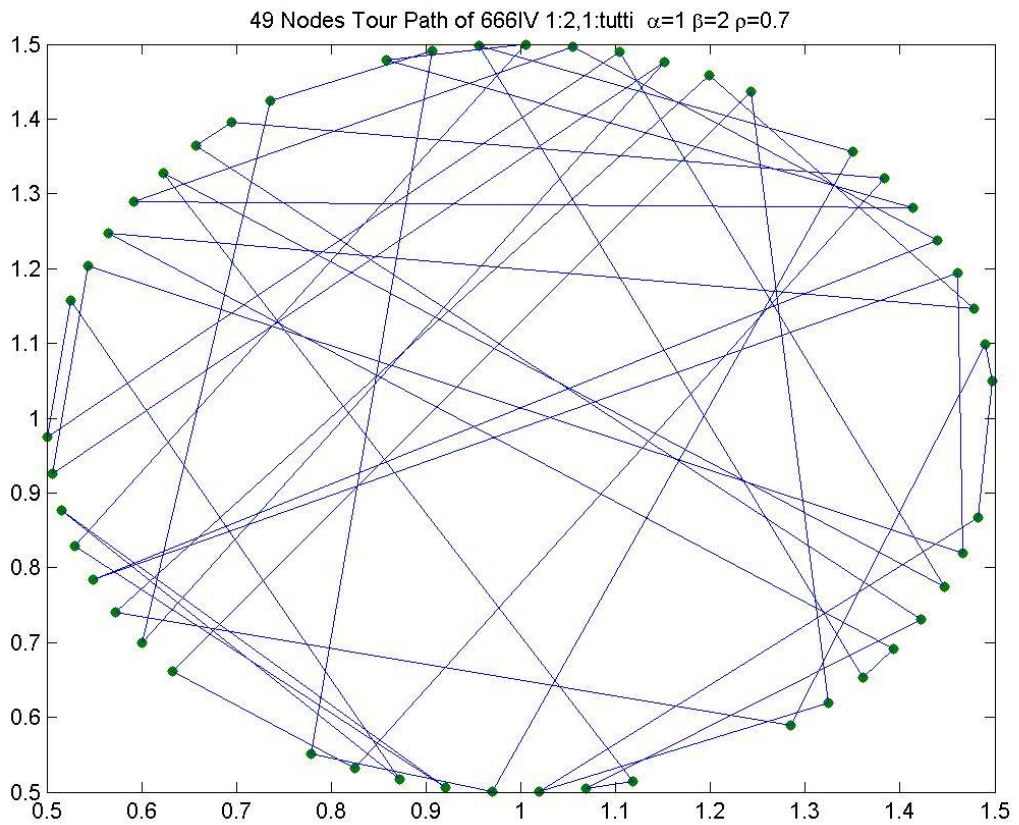
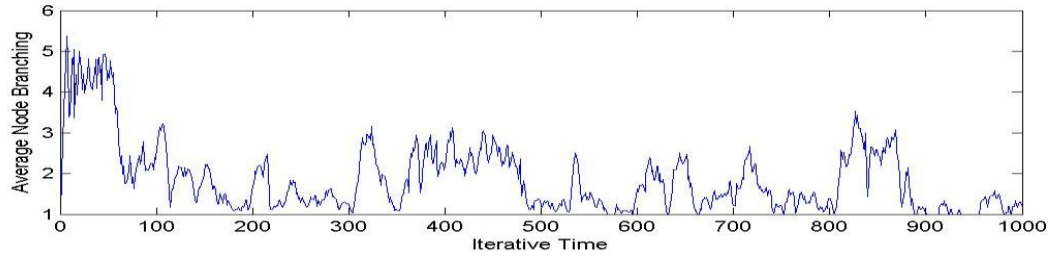
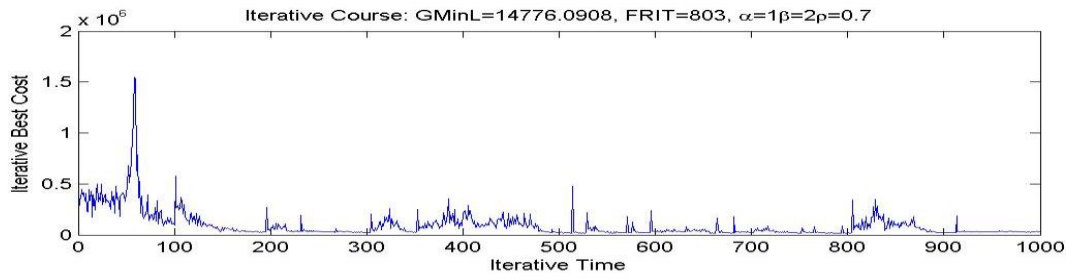


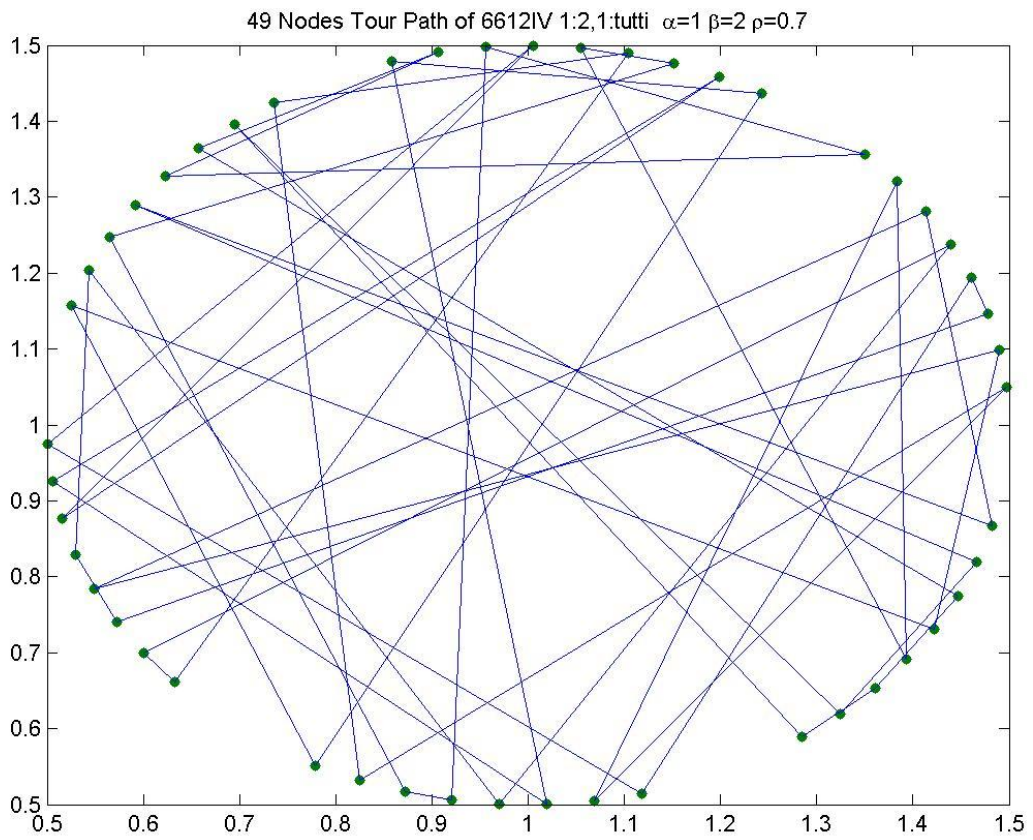
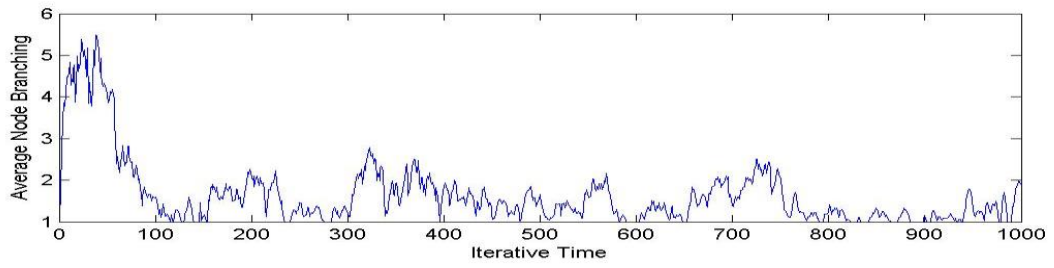
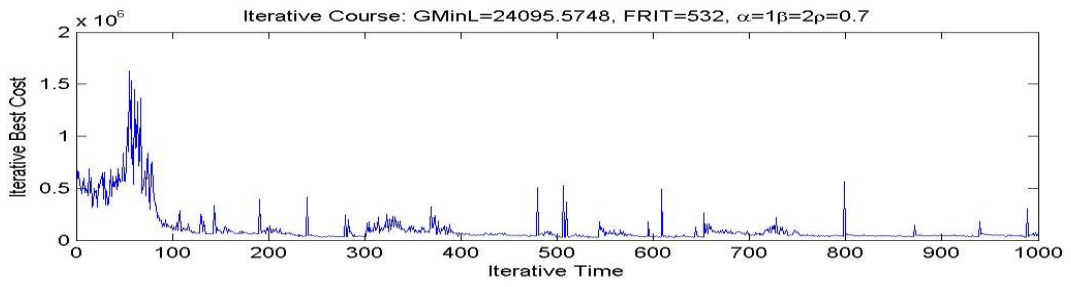


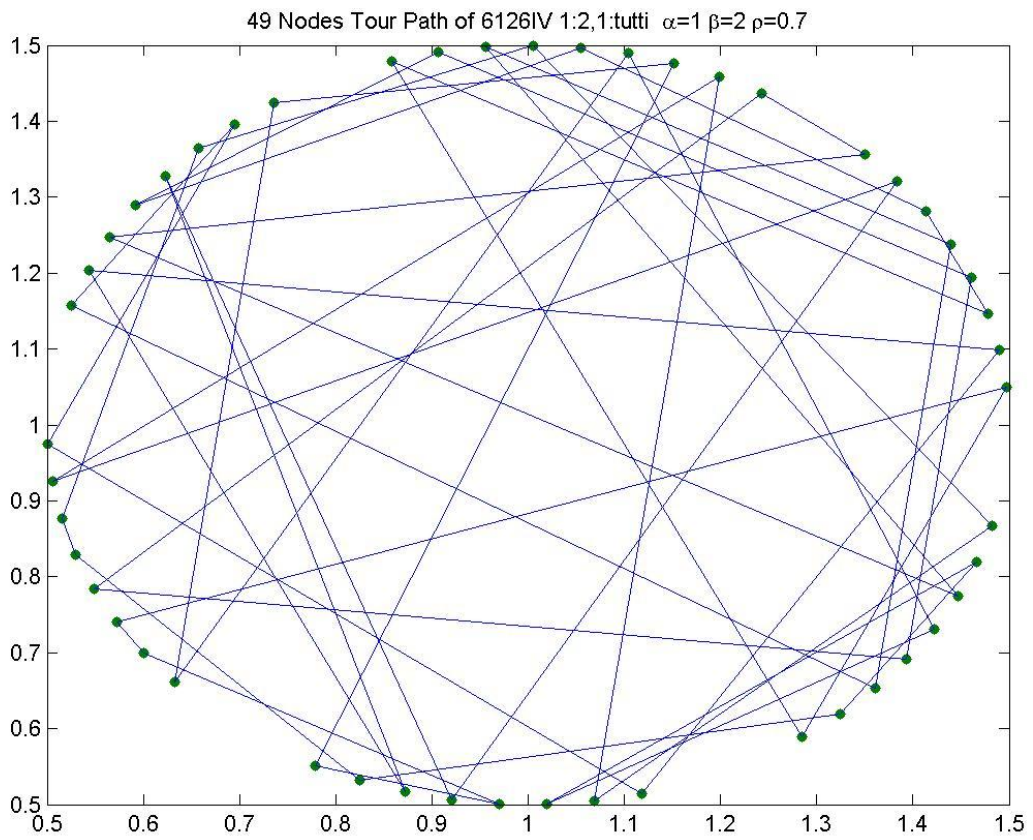
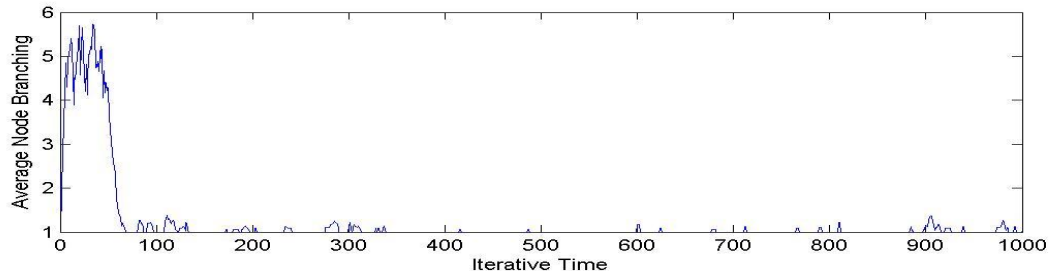
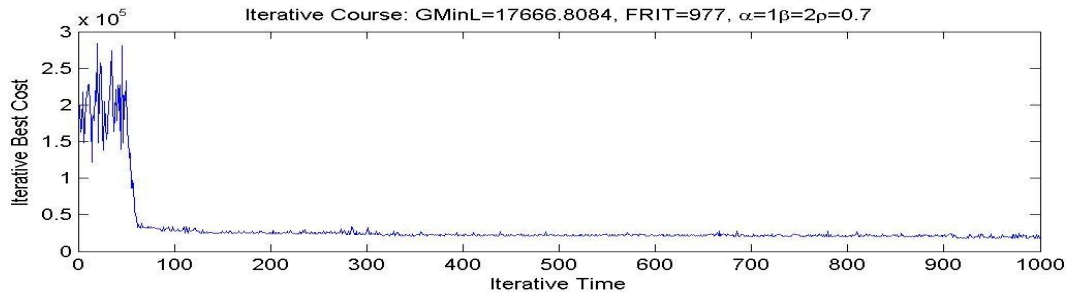


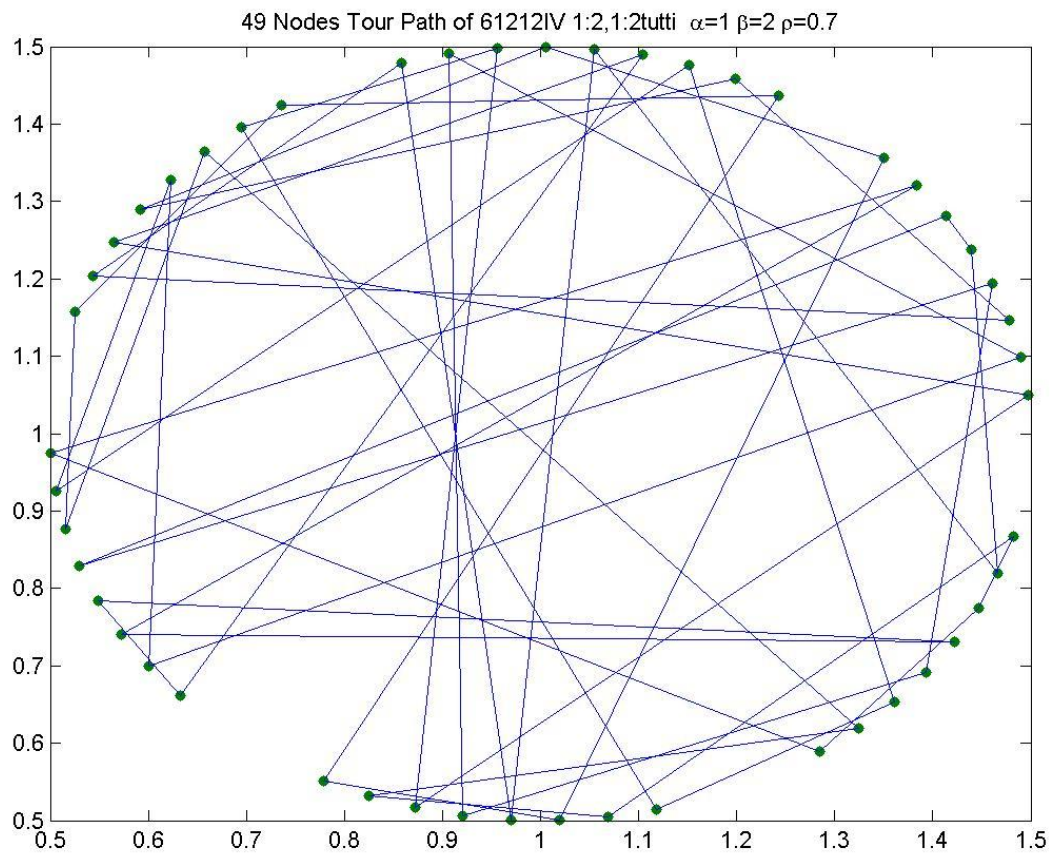
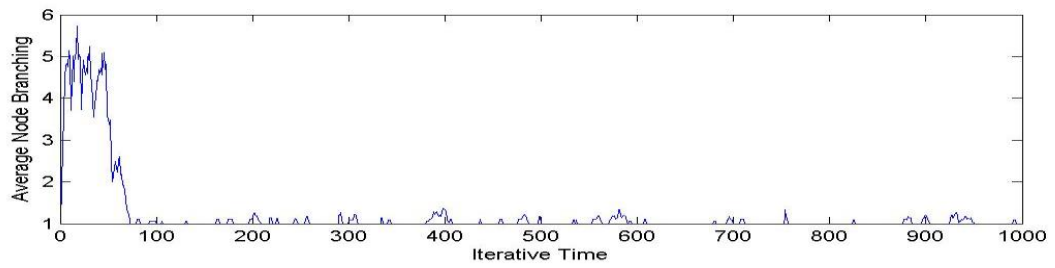
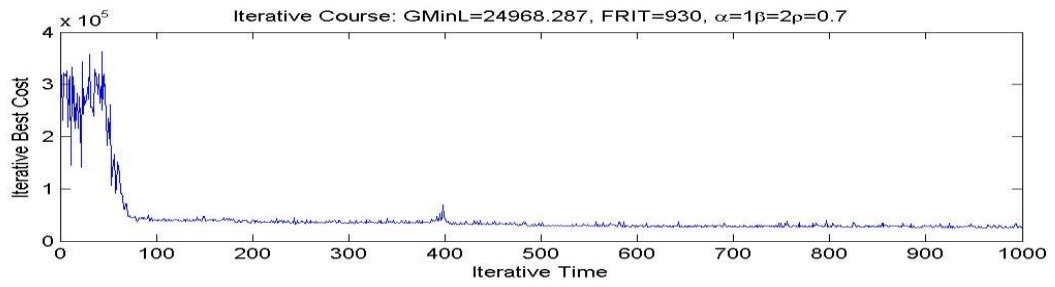
Domanda polarizzata su 1 prodotto

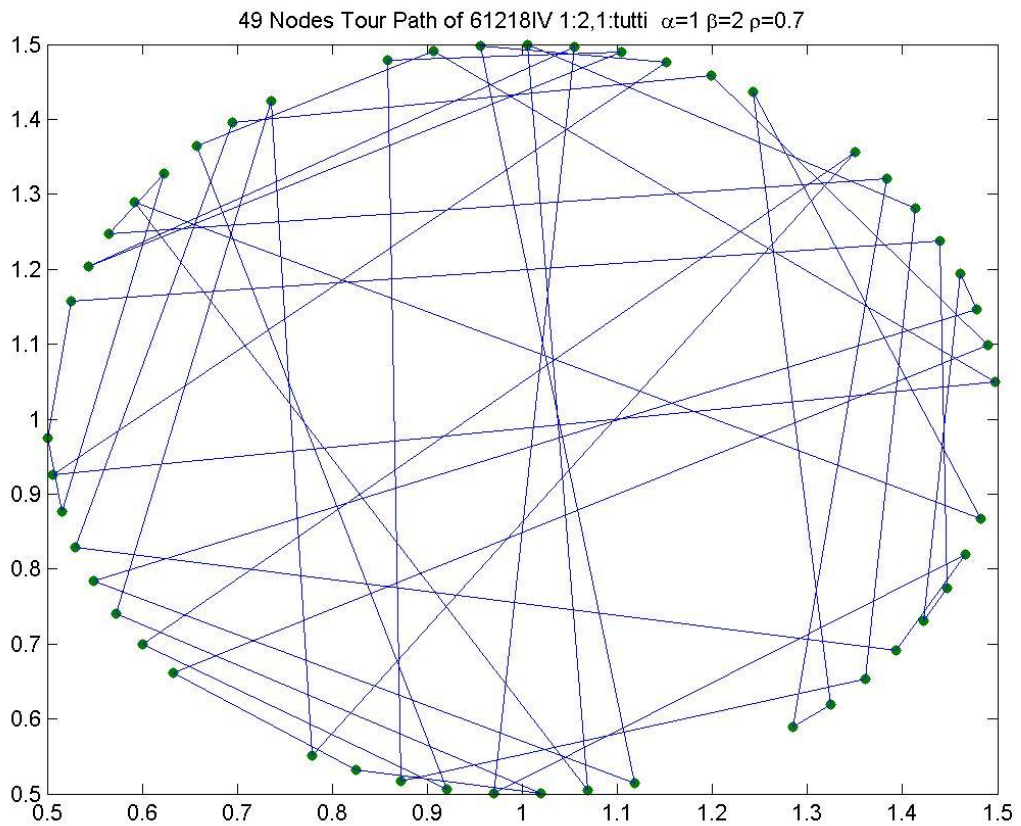
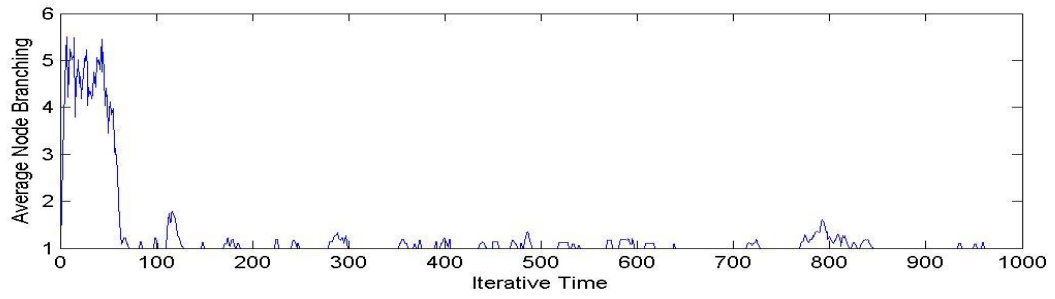
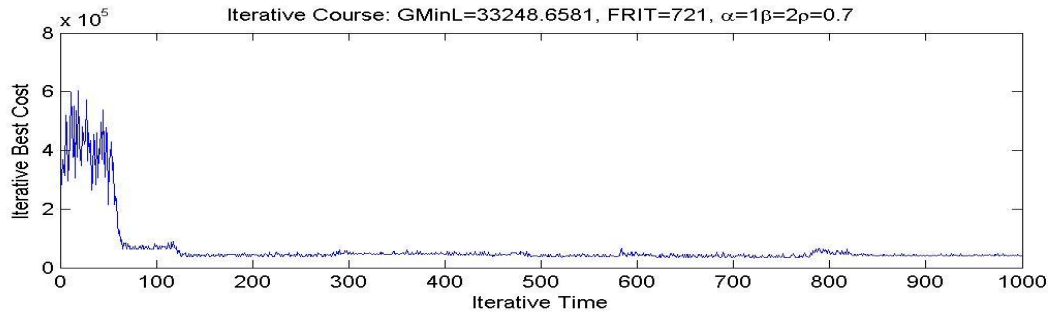




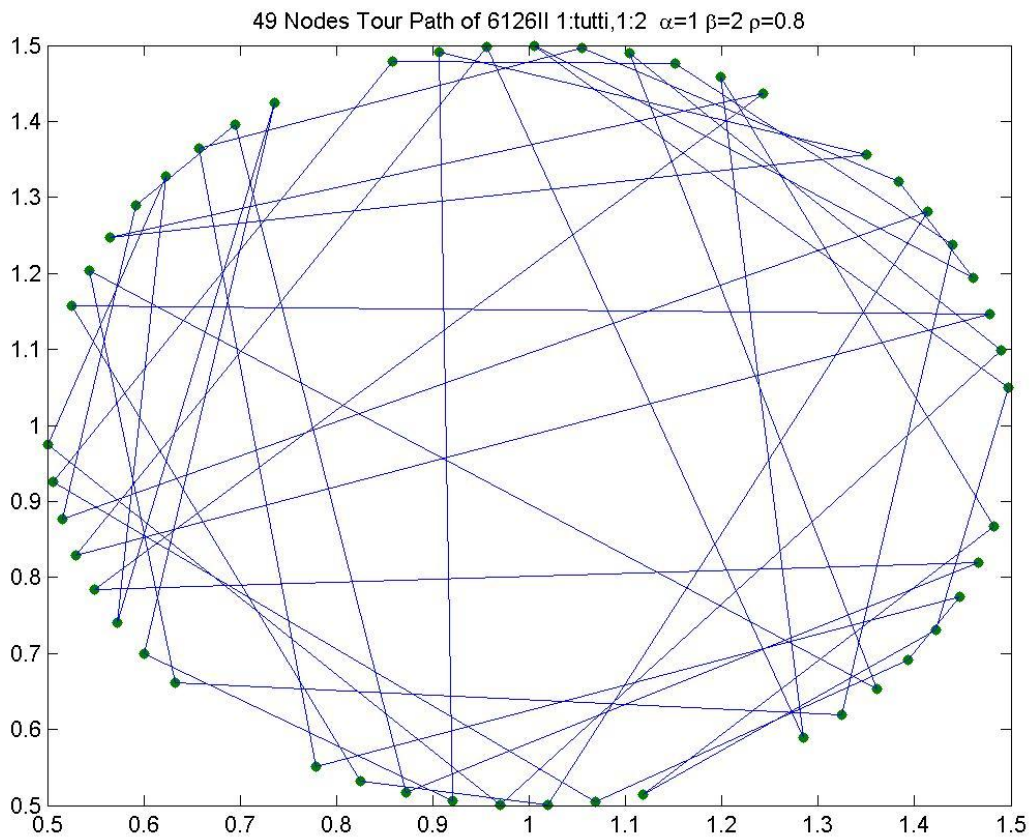
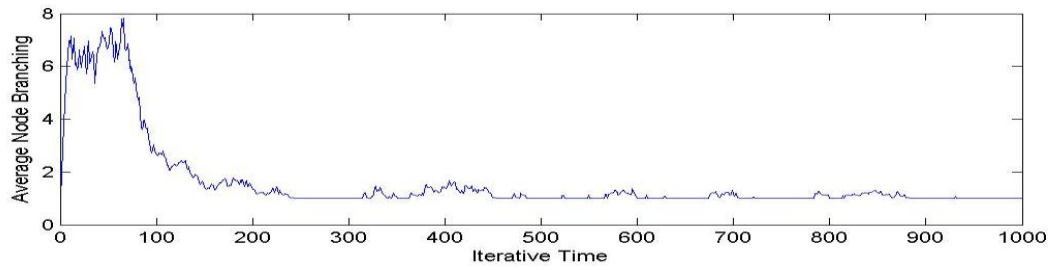
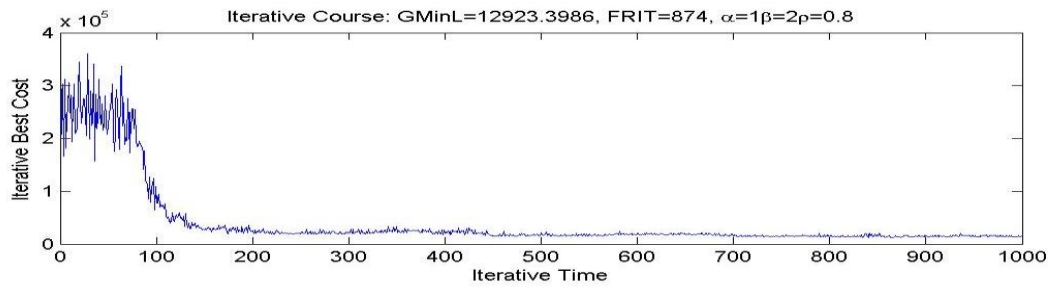


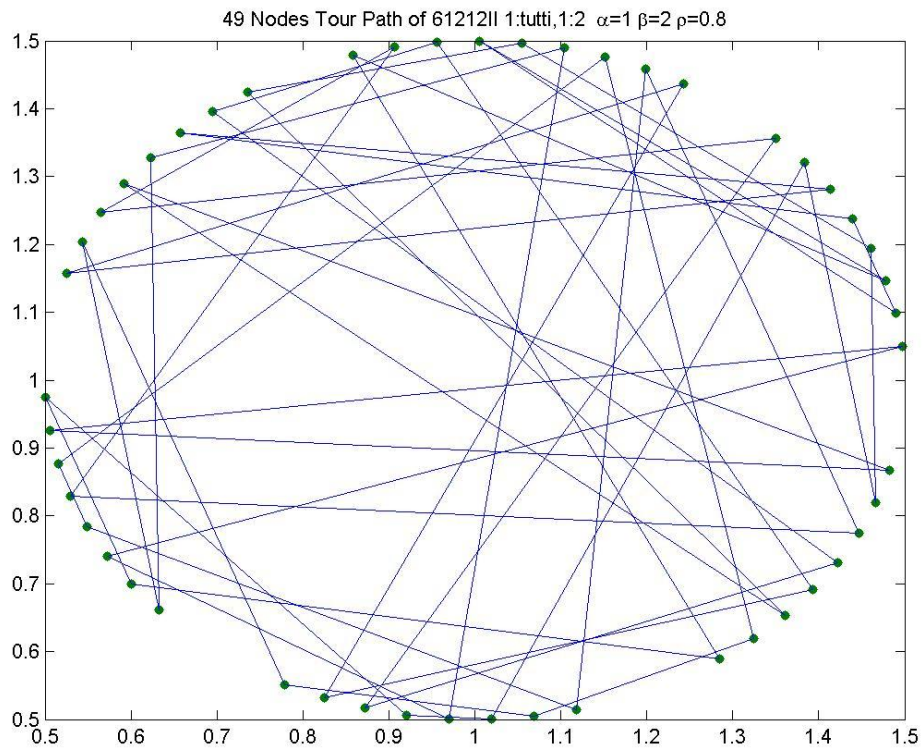
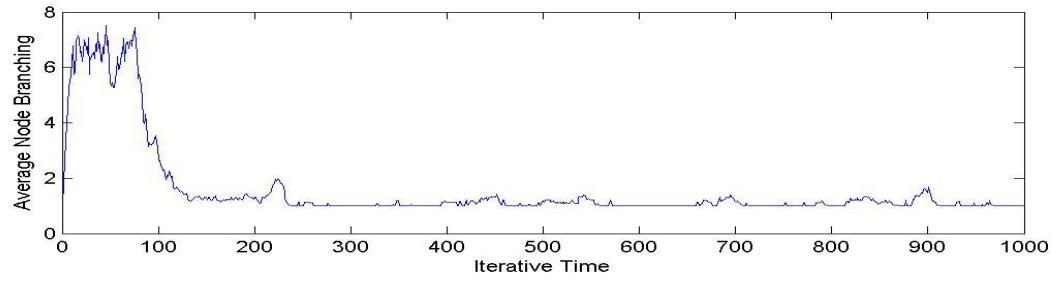
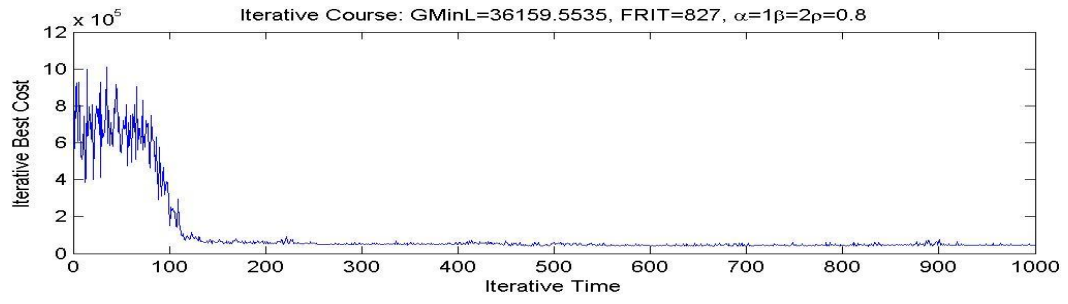


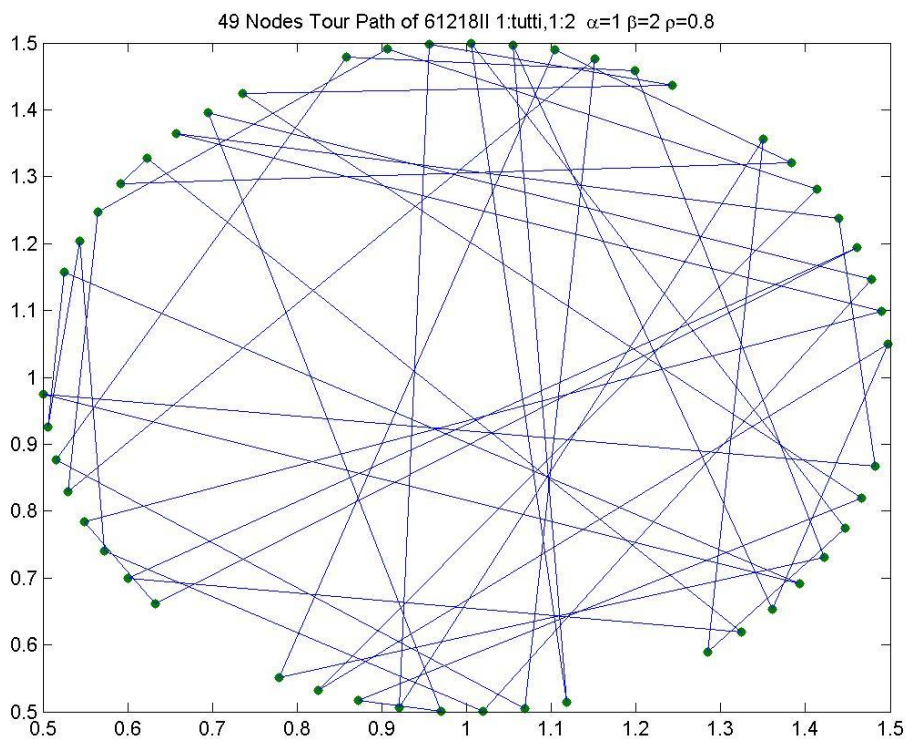
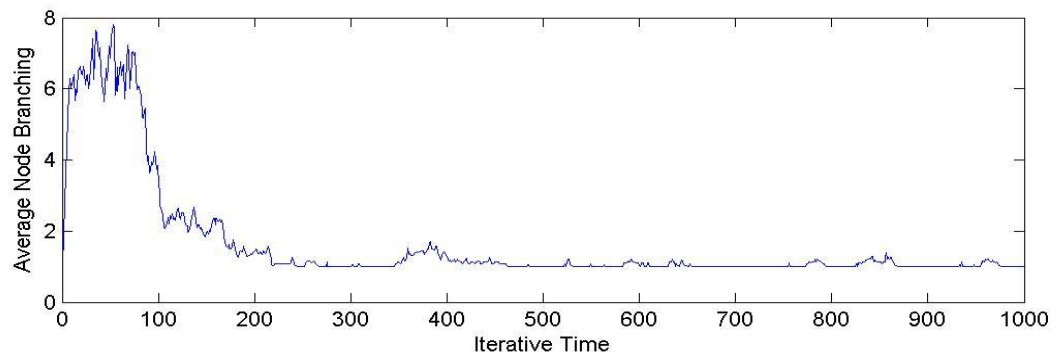
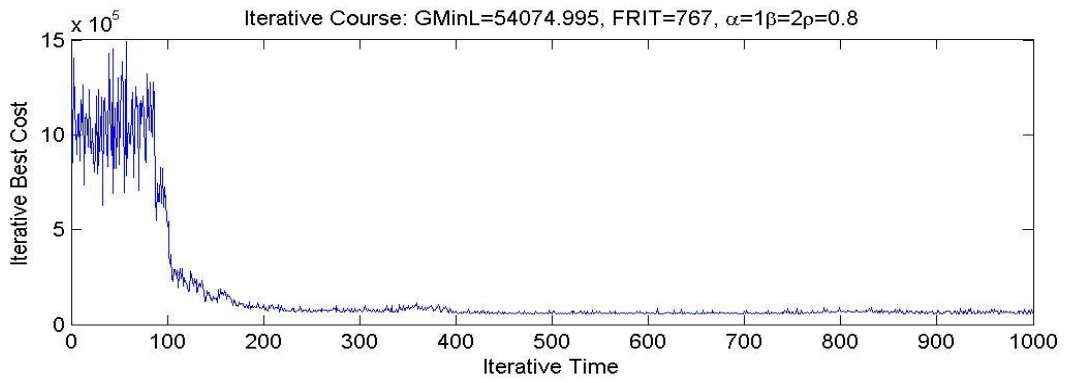




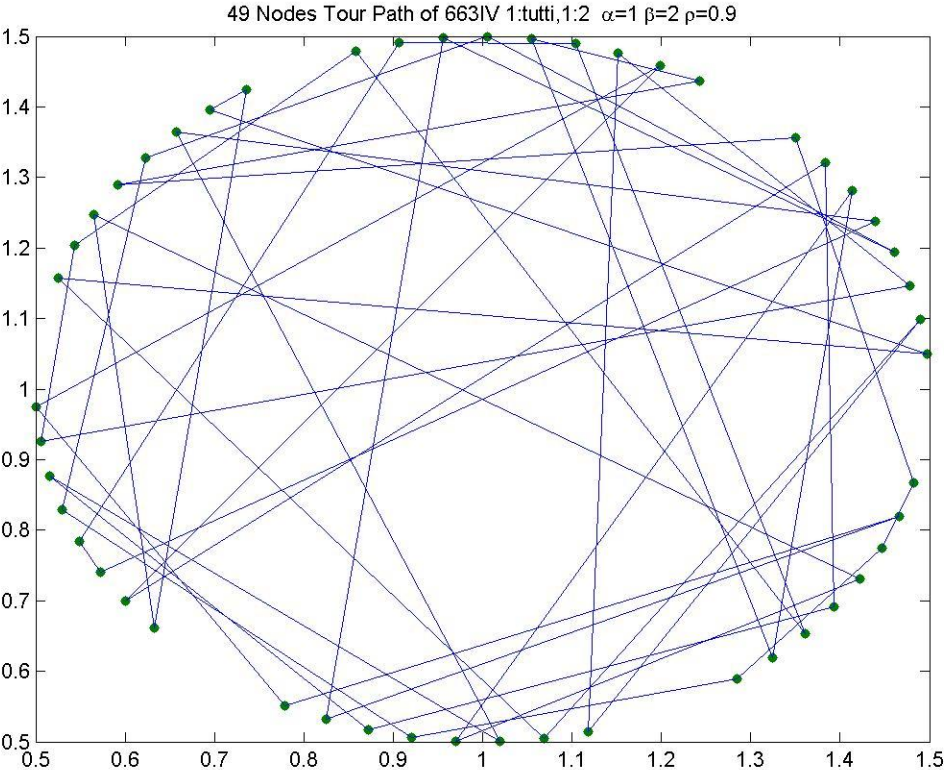
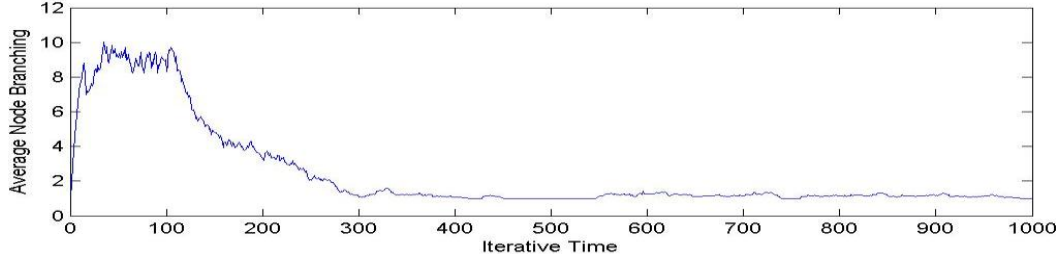
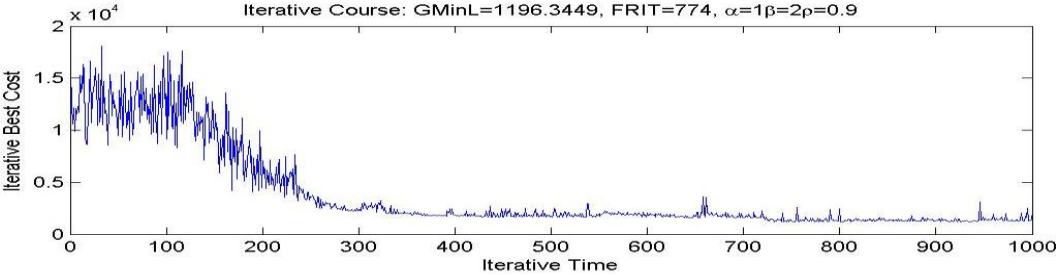
1-tutti 1-2 Domanda polarizzata su 3 prodotti

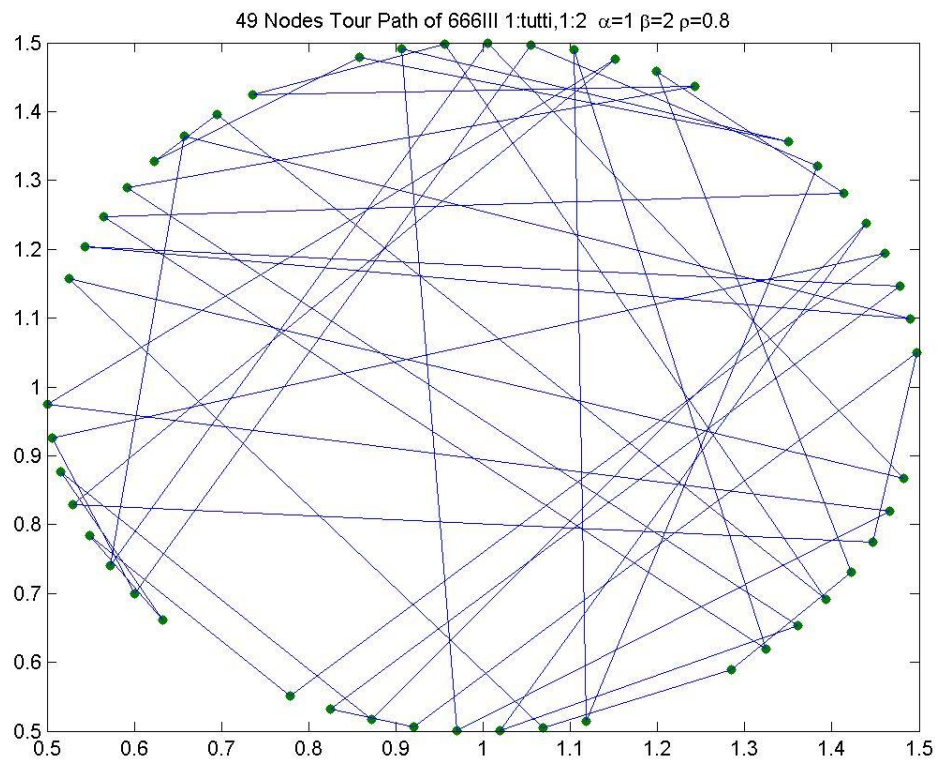
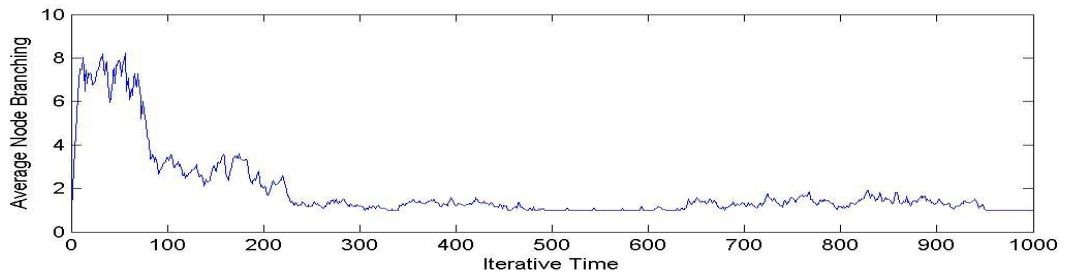
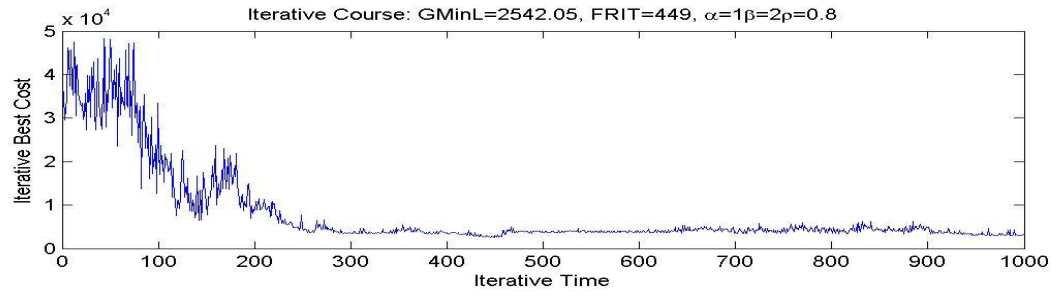


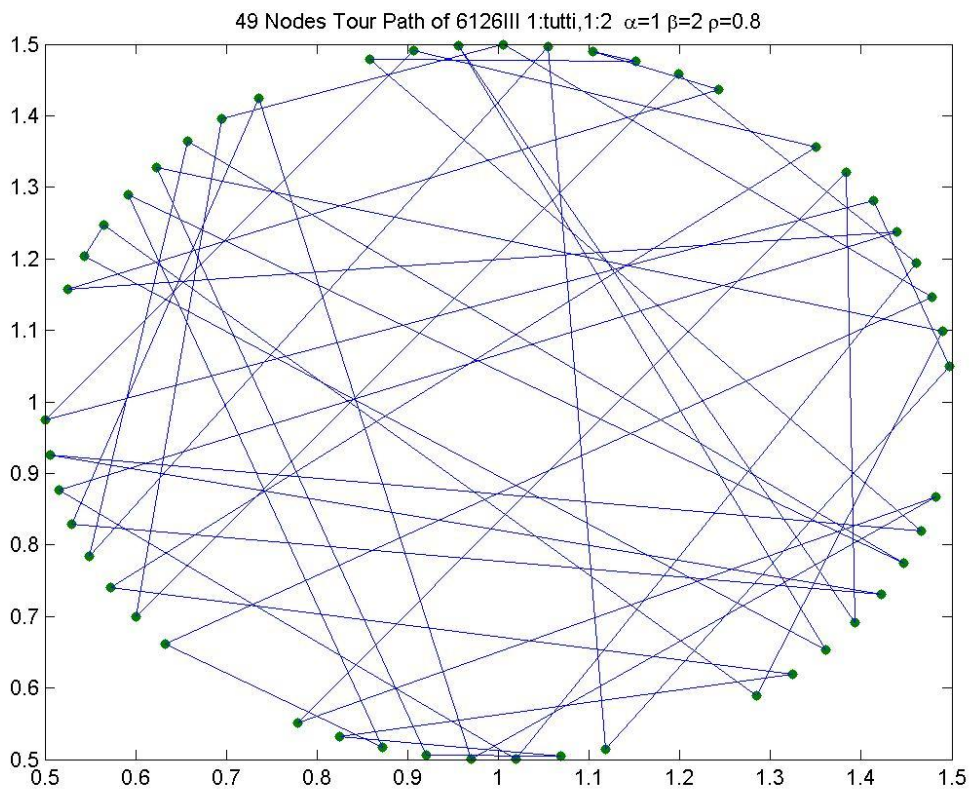
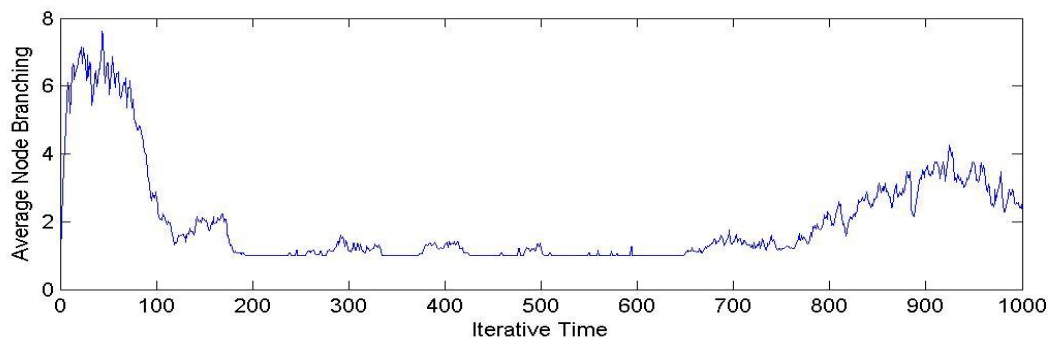
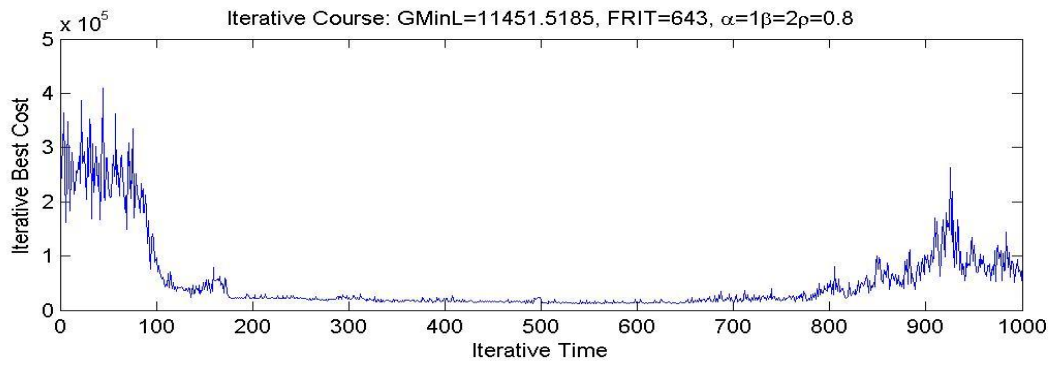


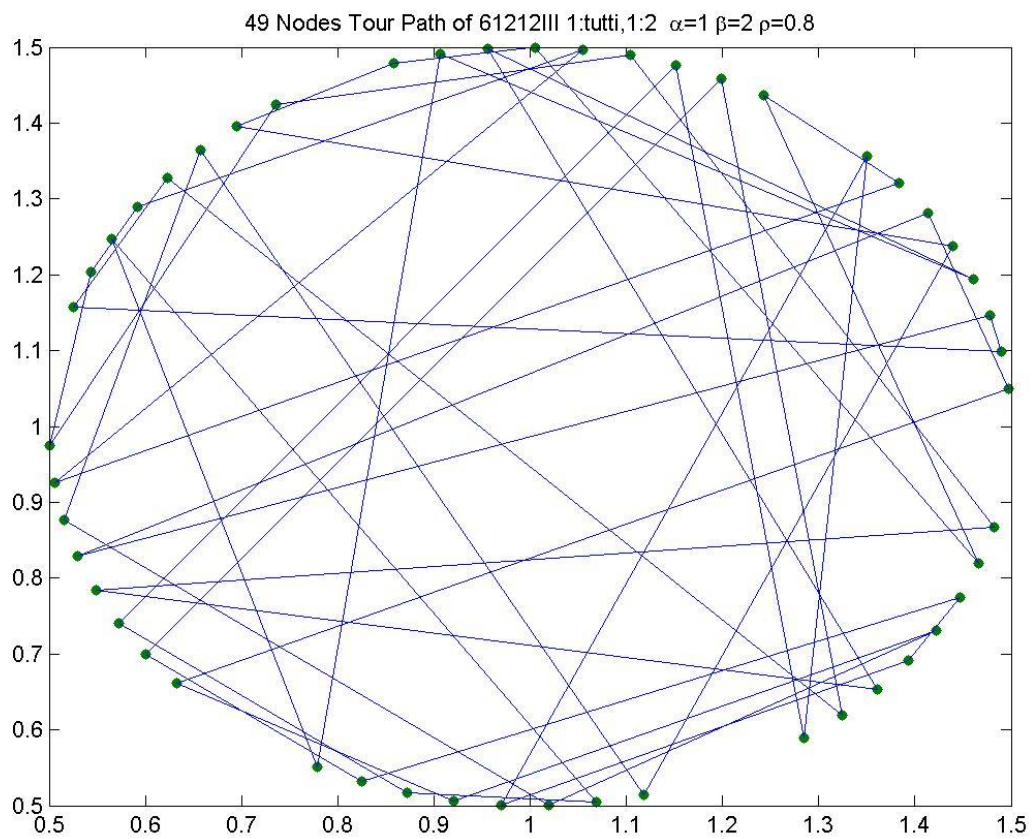
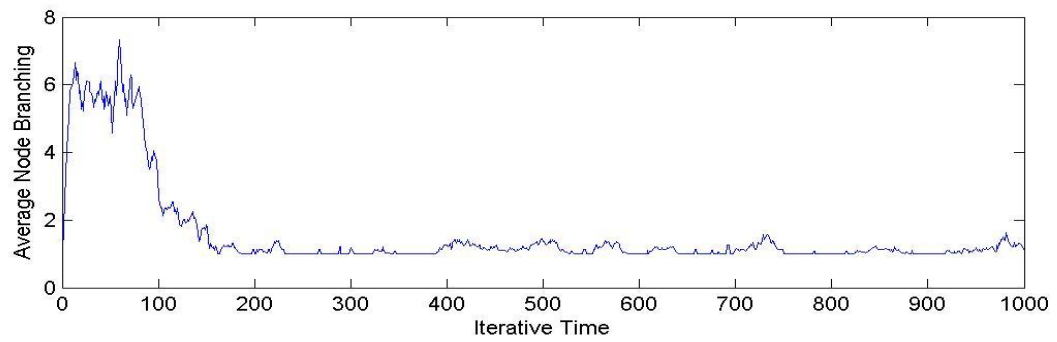
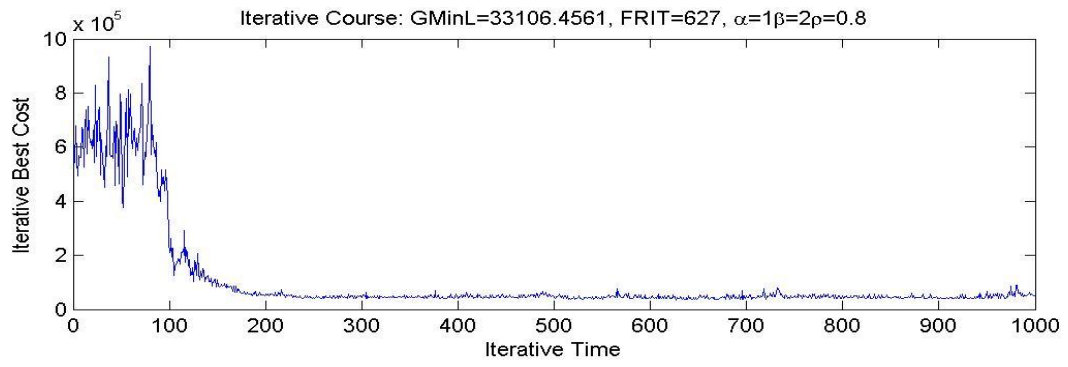


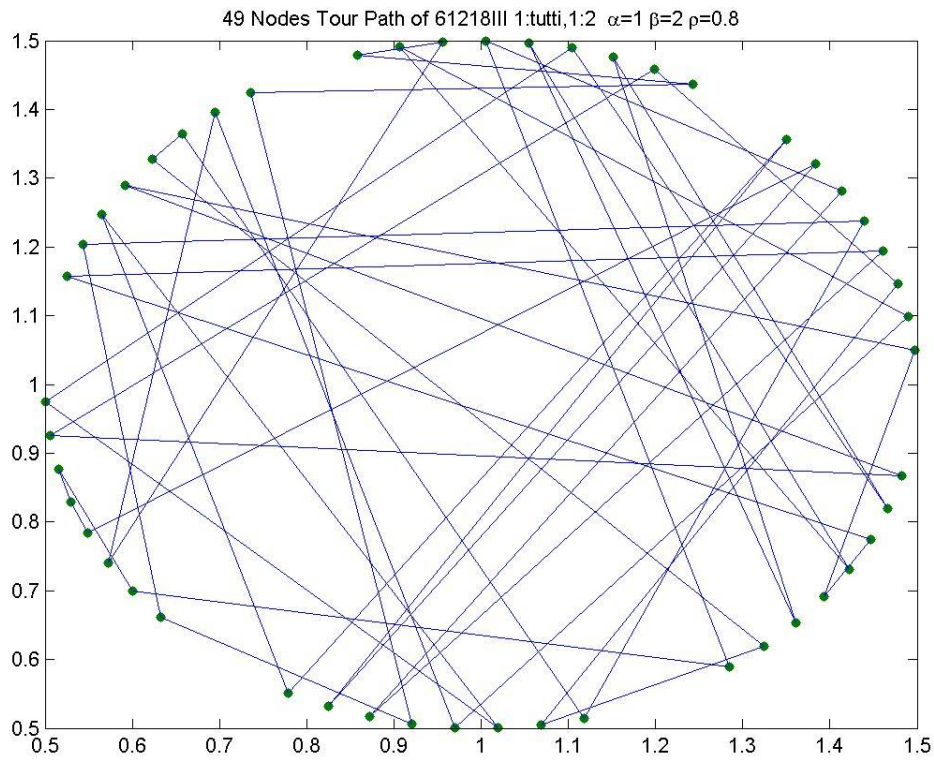
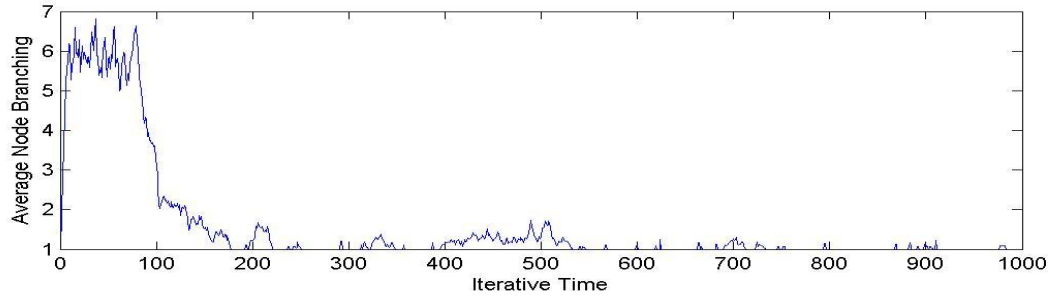
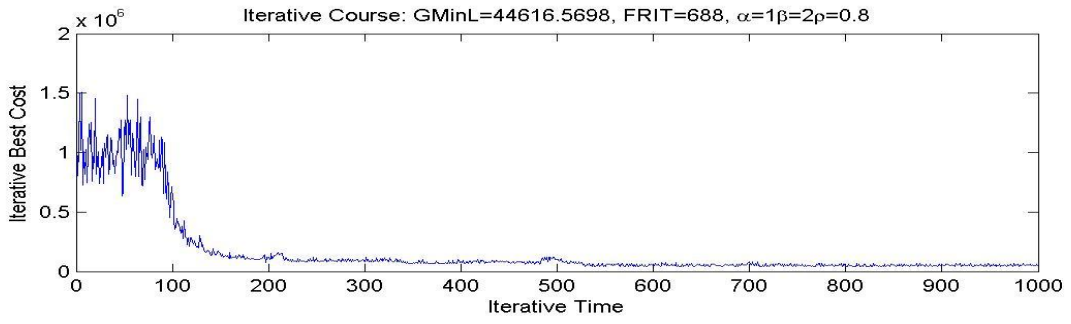
Domanda polarizzata su 2 prodotti



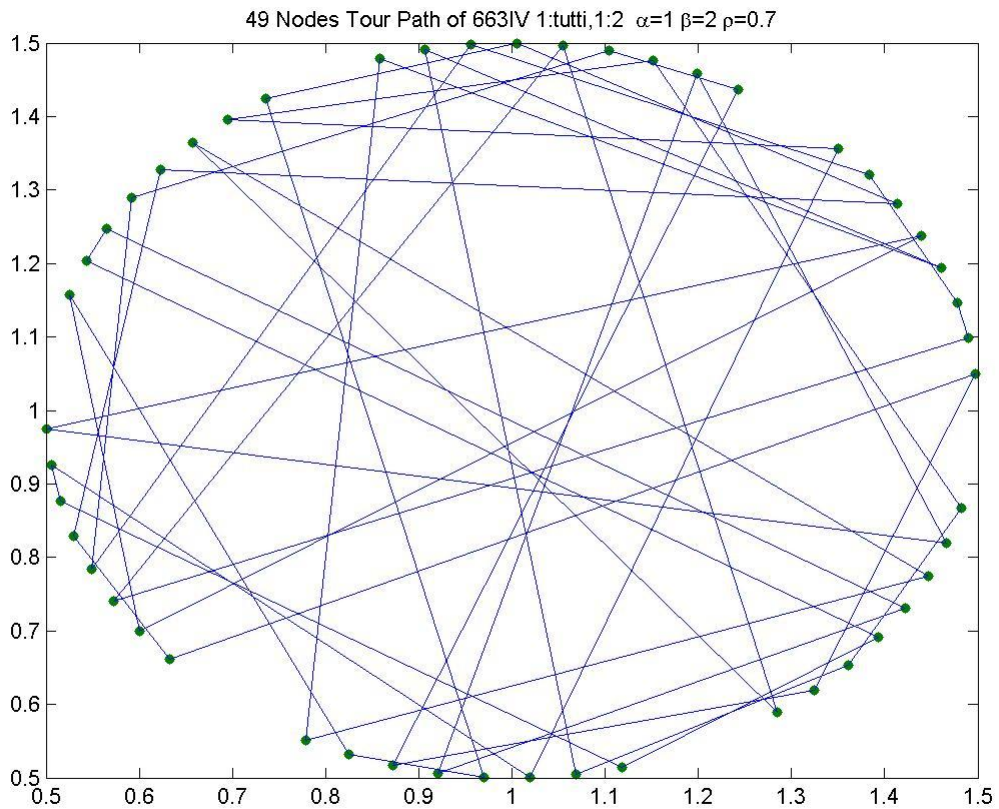
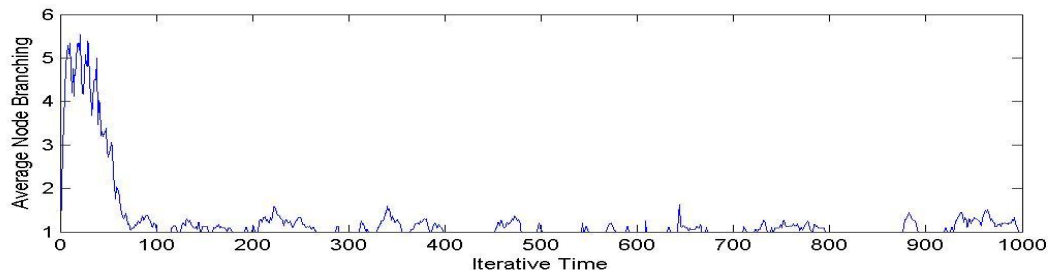
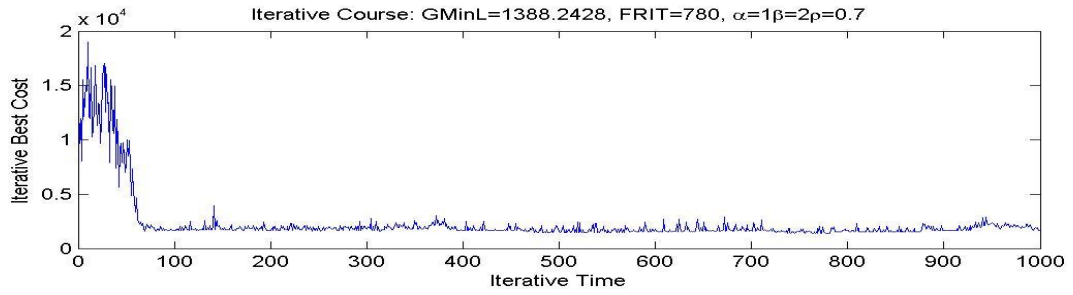


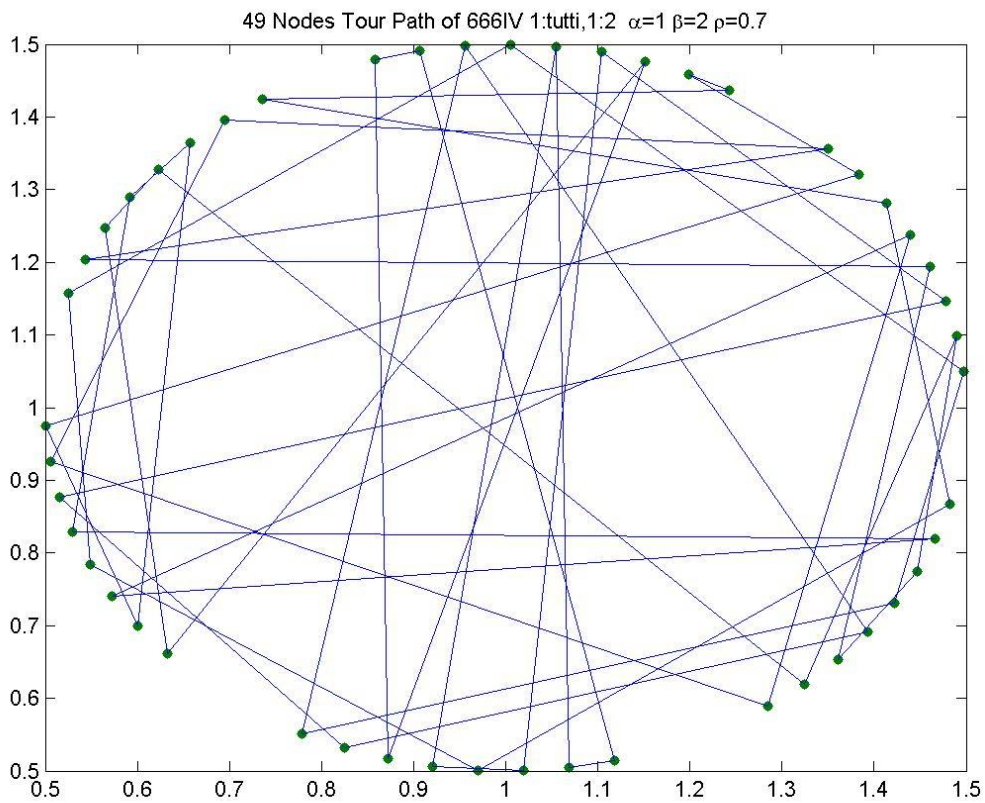
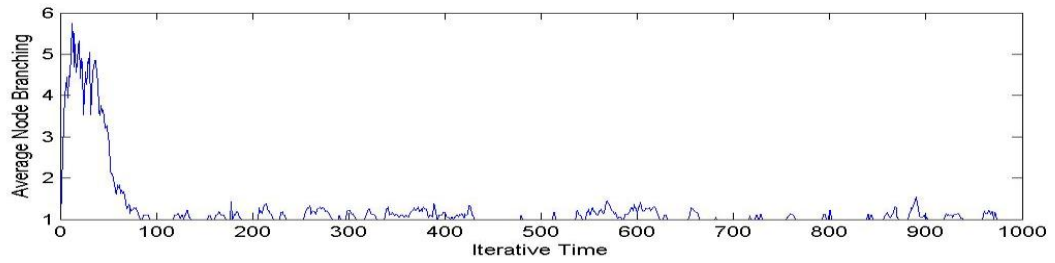
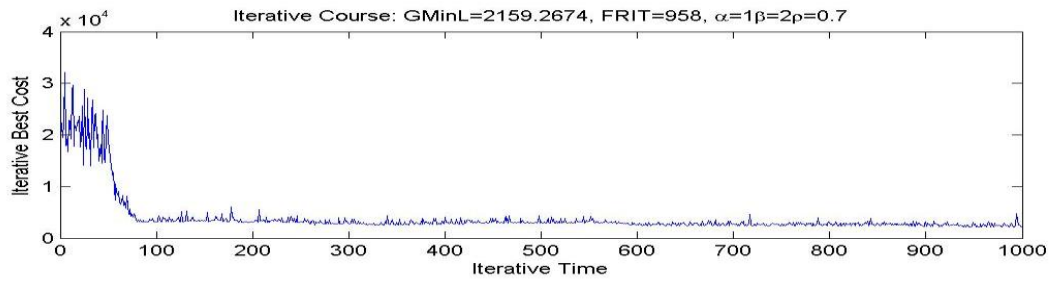


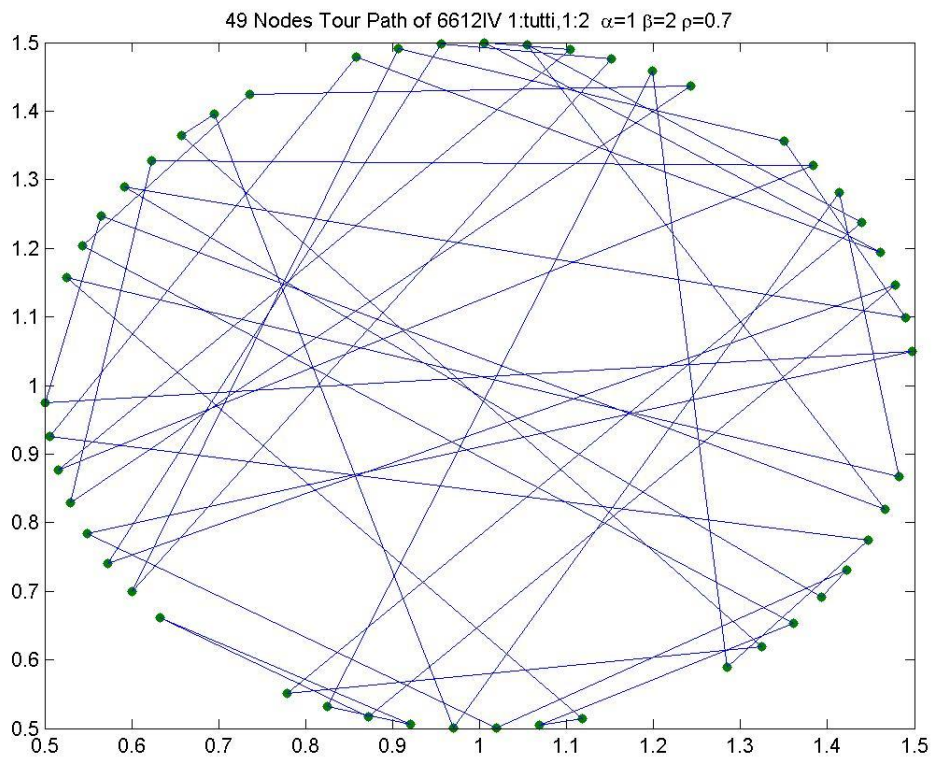
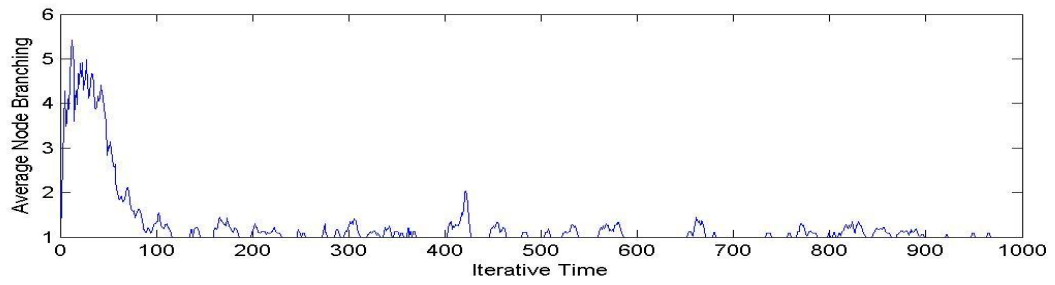
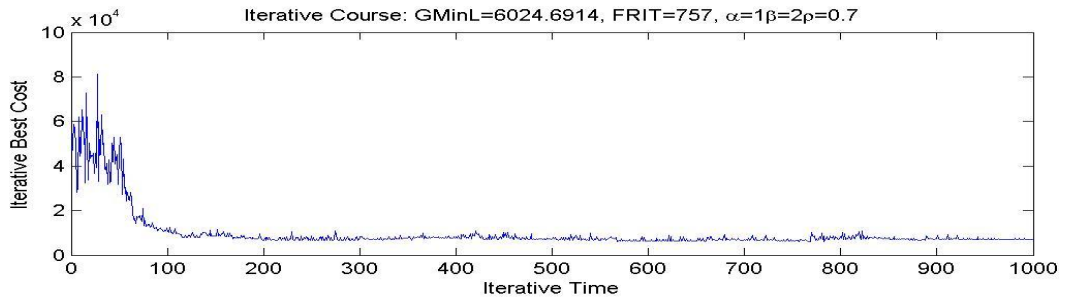


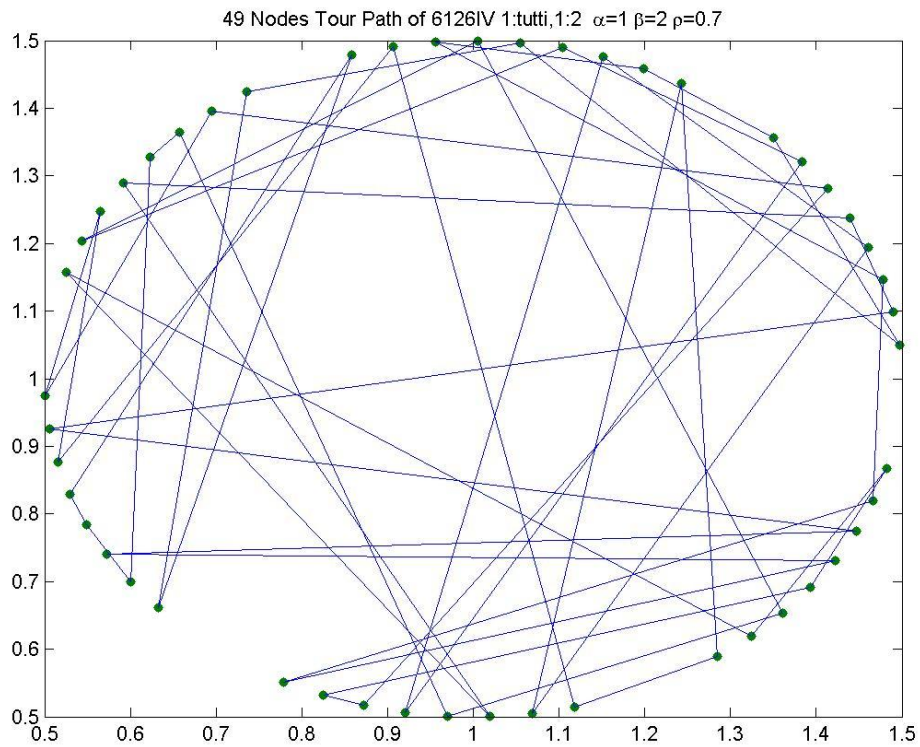
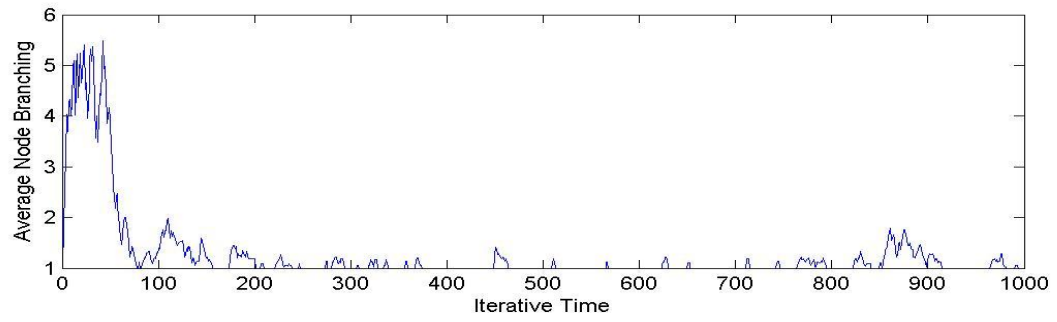
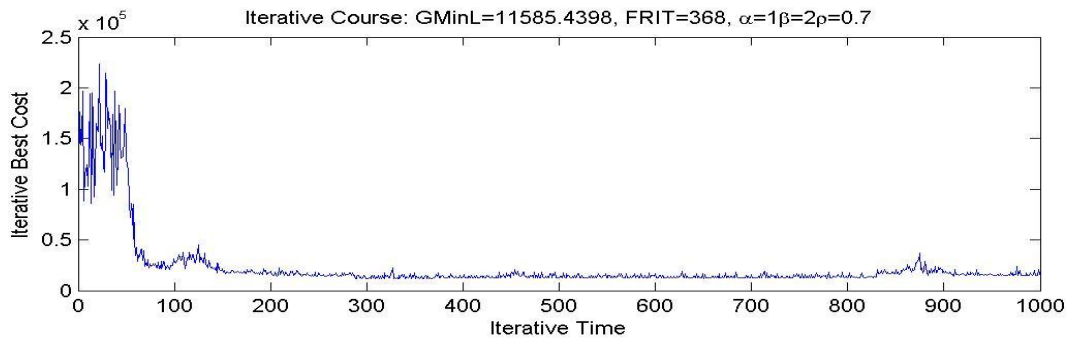


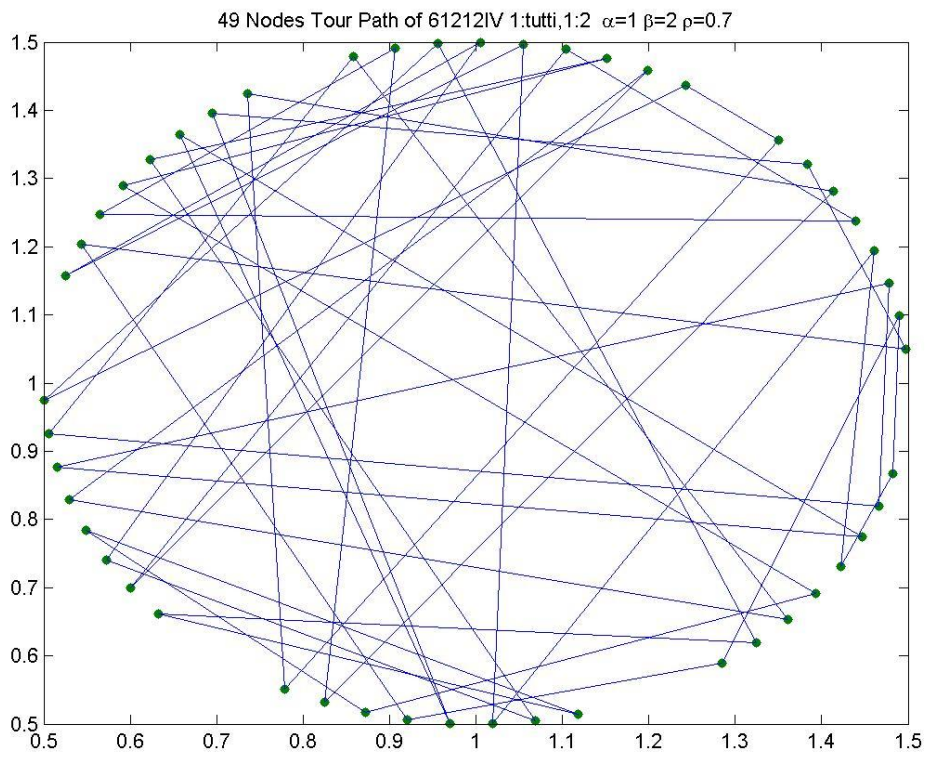
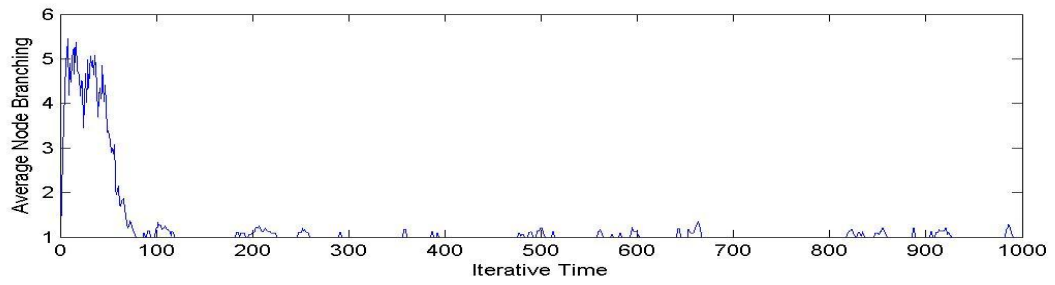
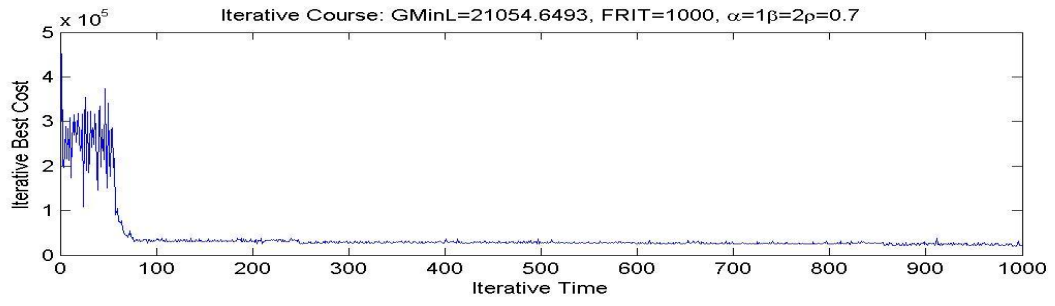
Domanda polarizzata su 1 prodotto

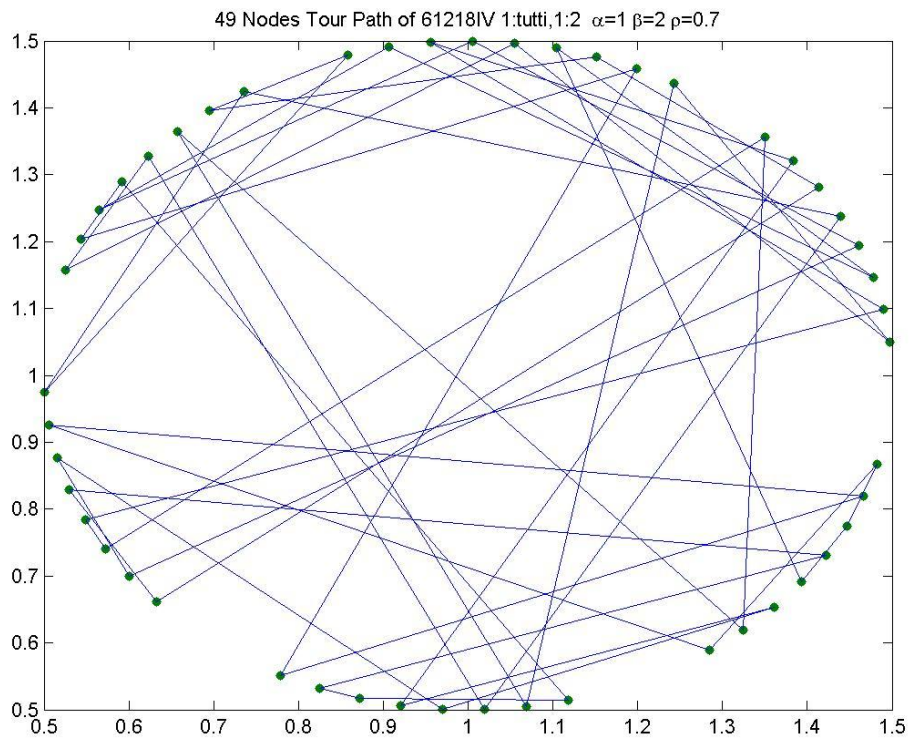
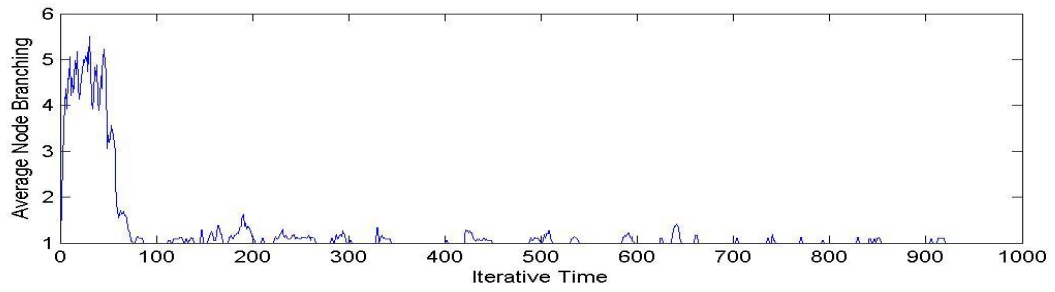
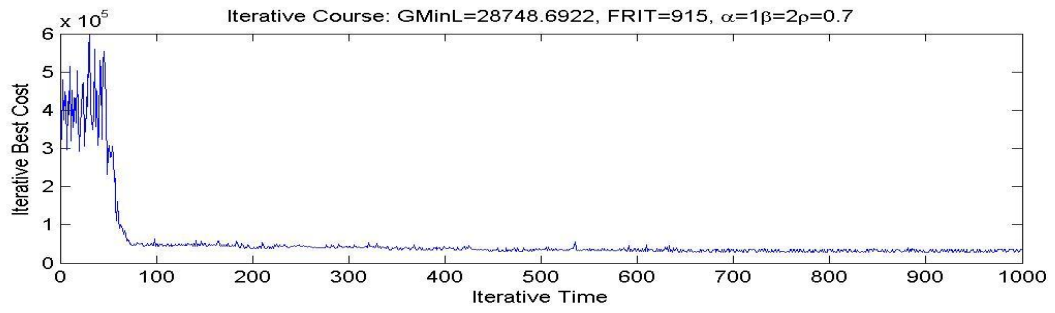




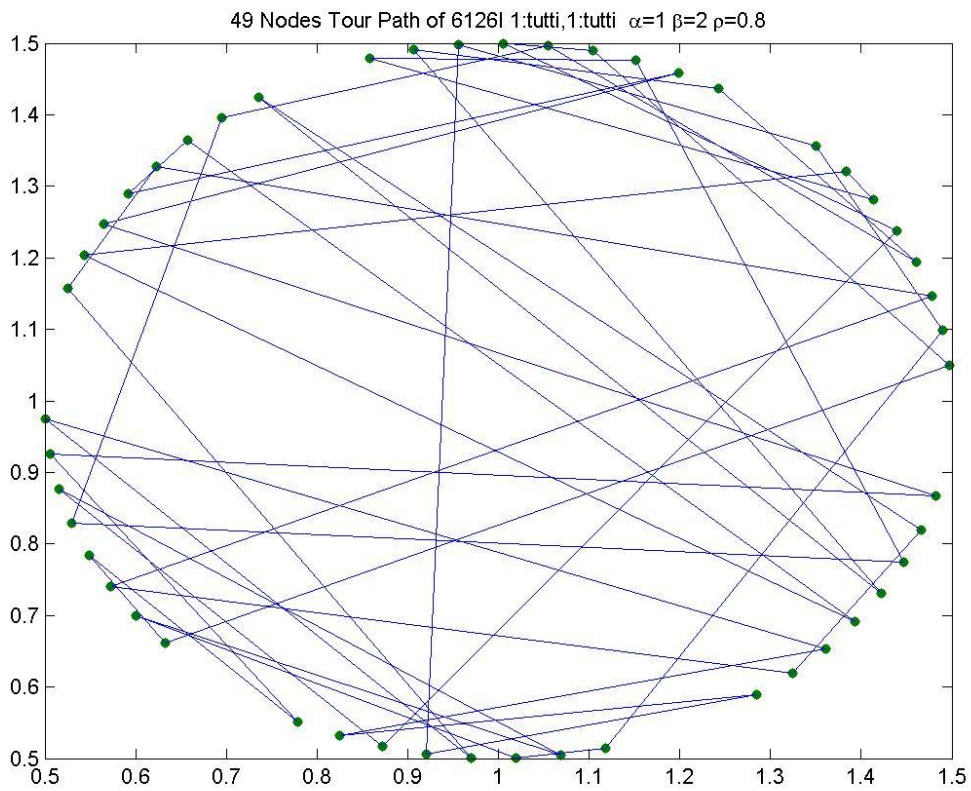
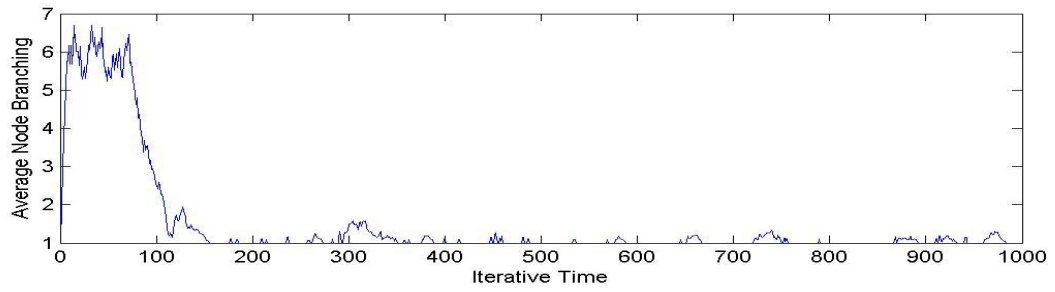
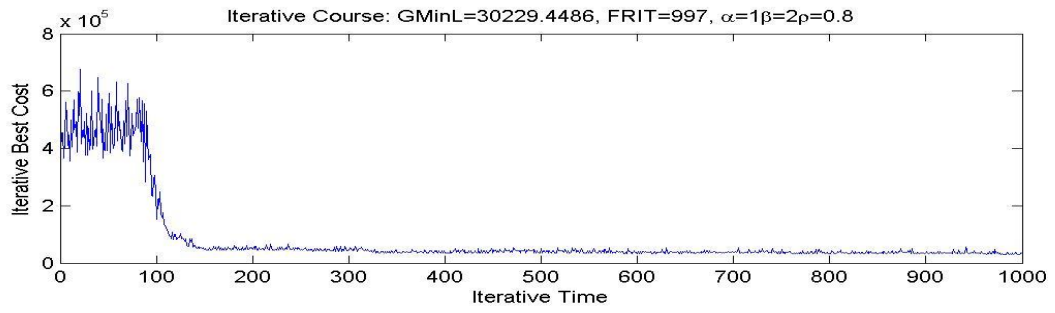


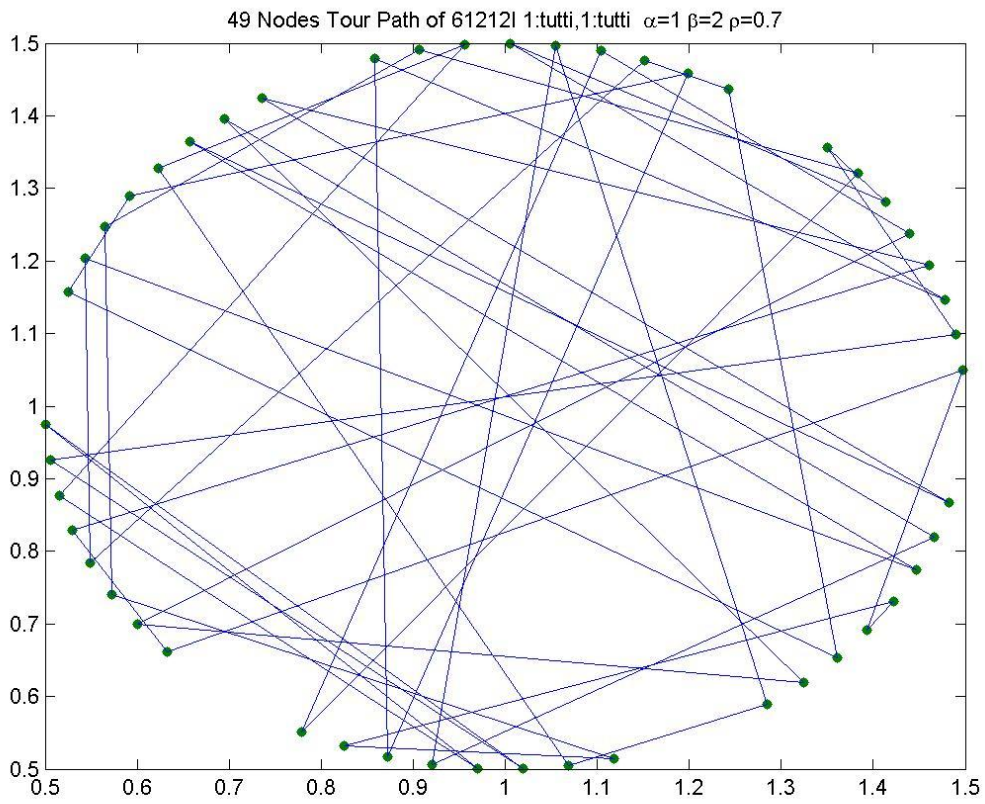
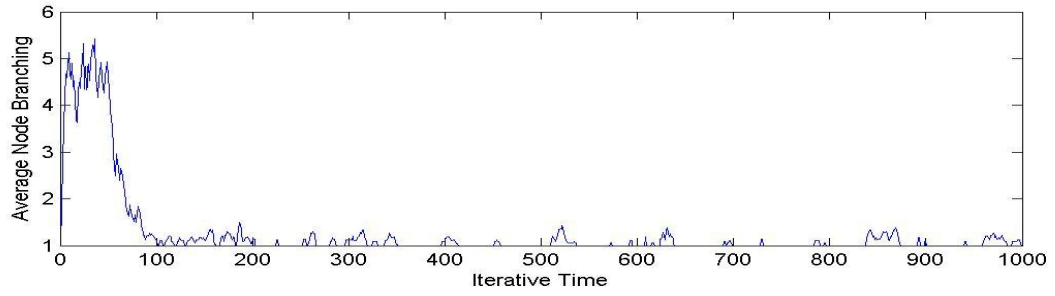
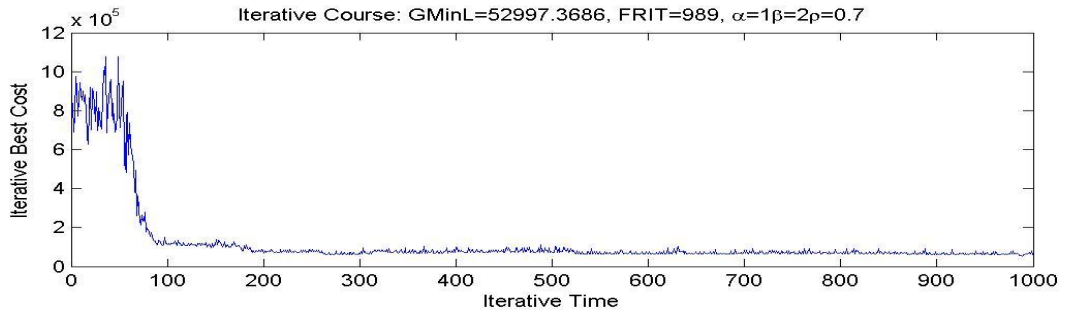


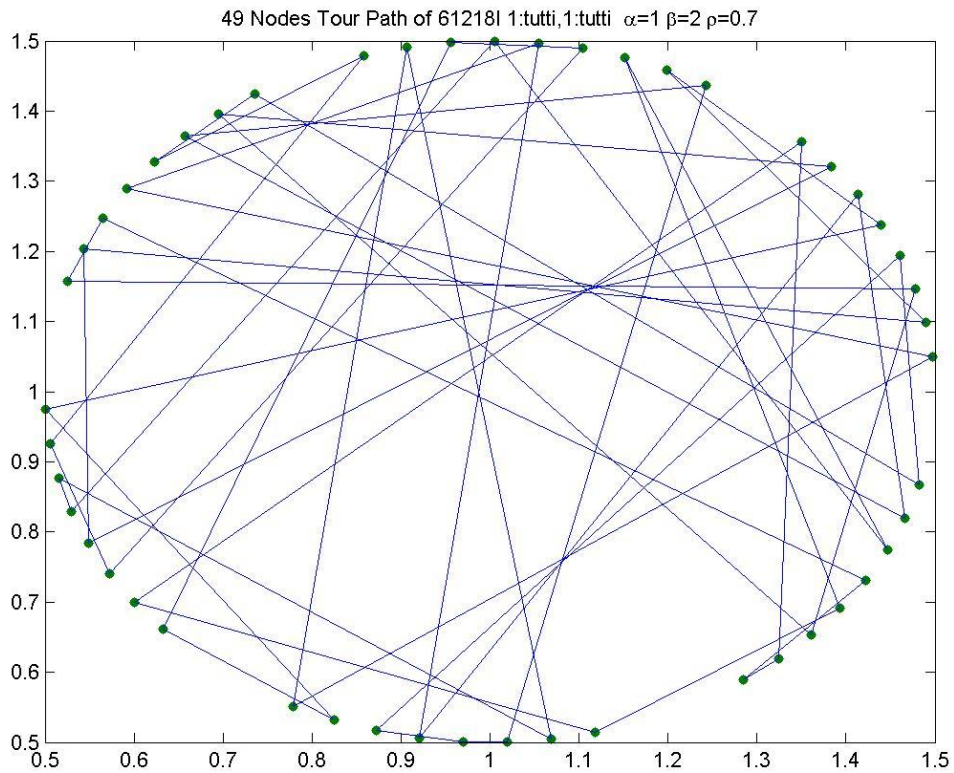
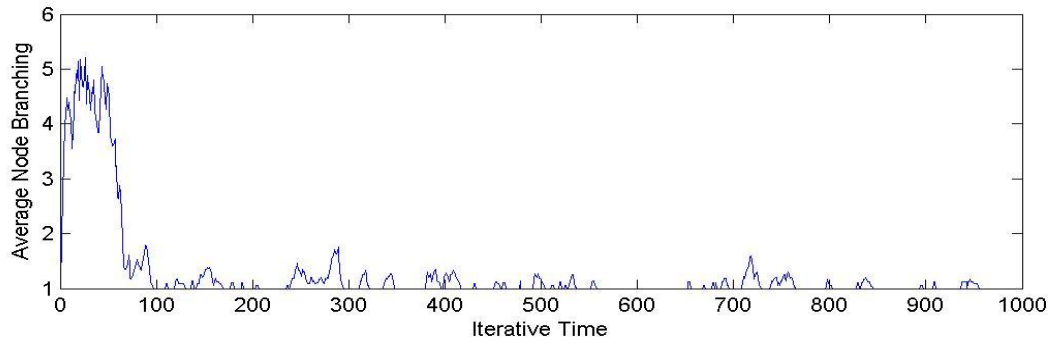
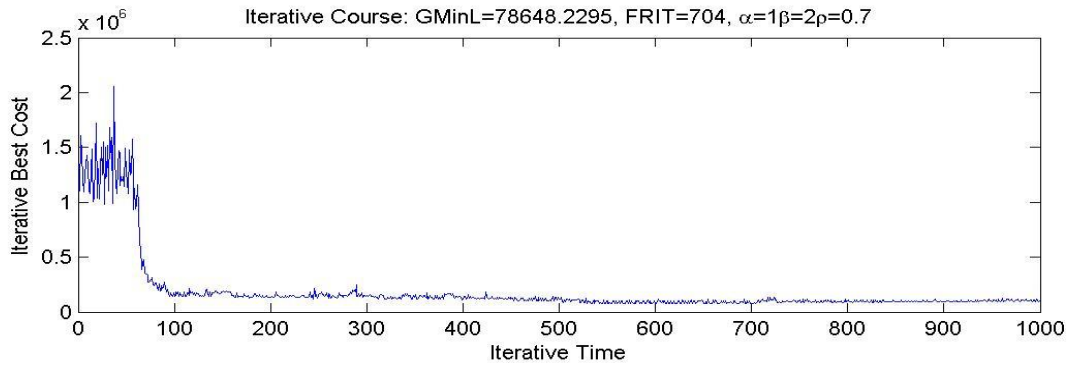


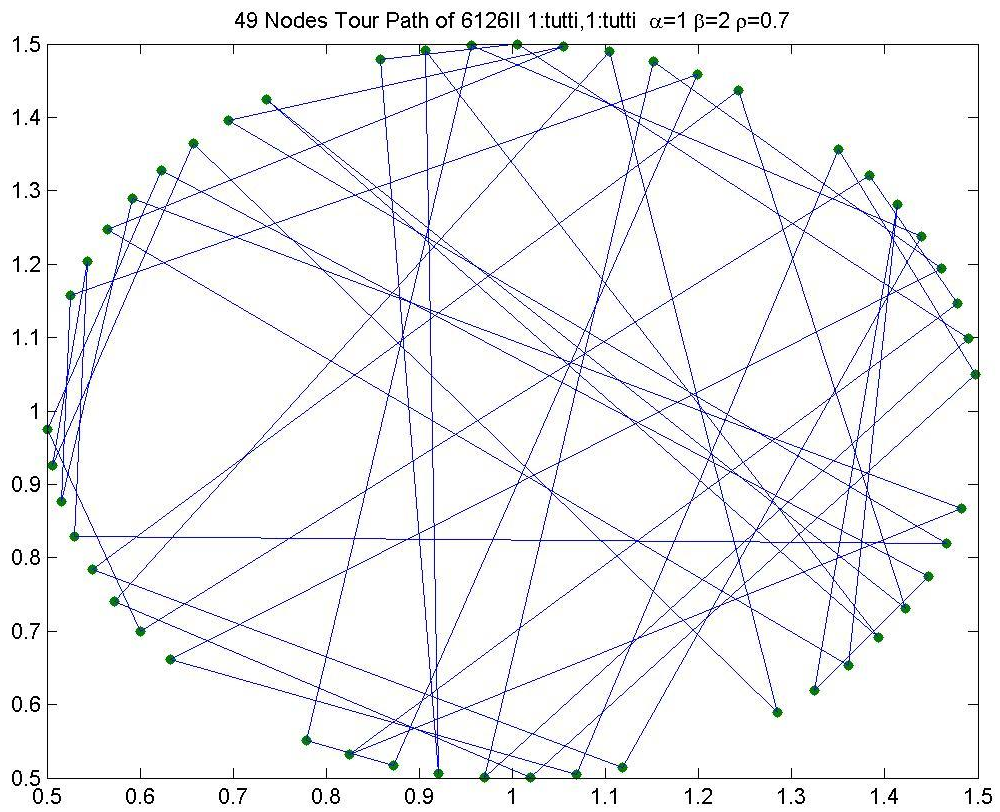
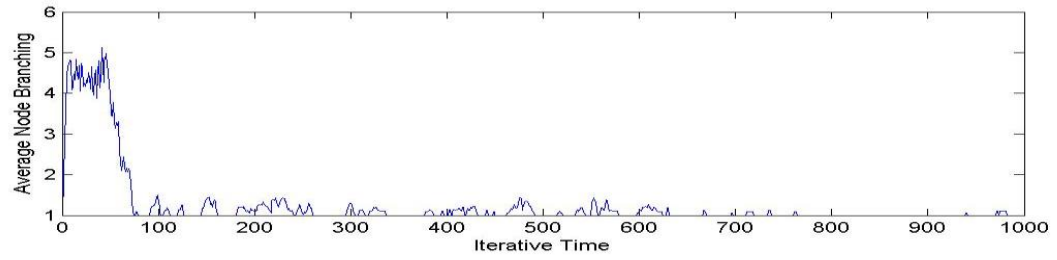
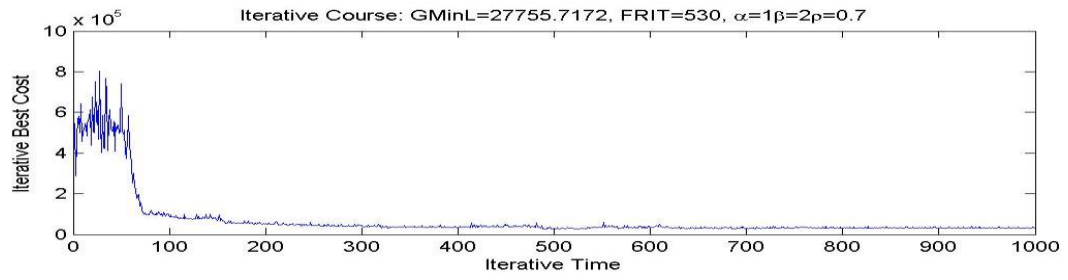


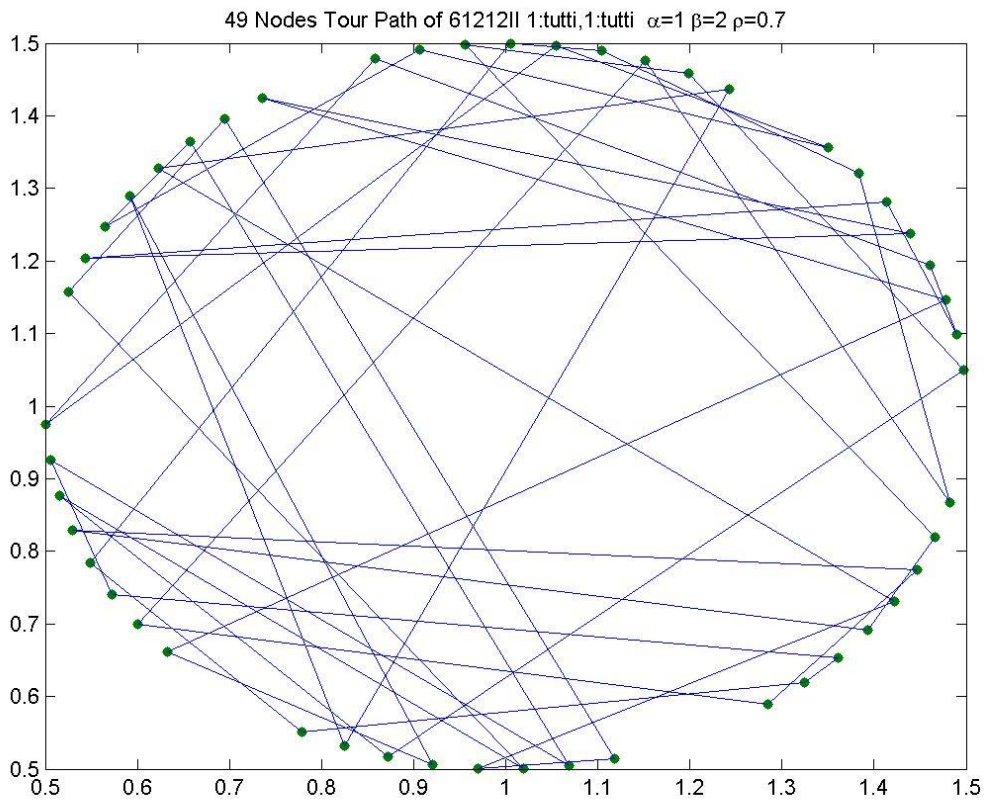
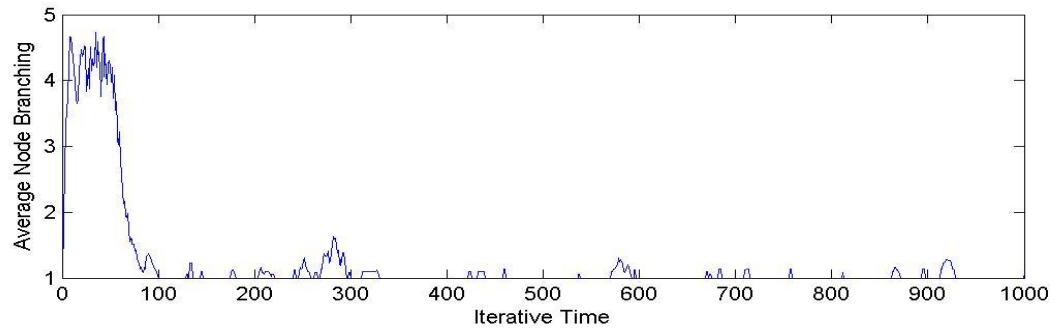
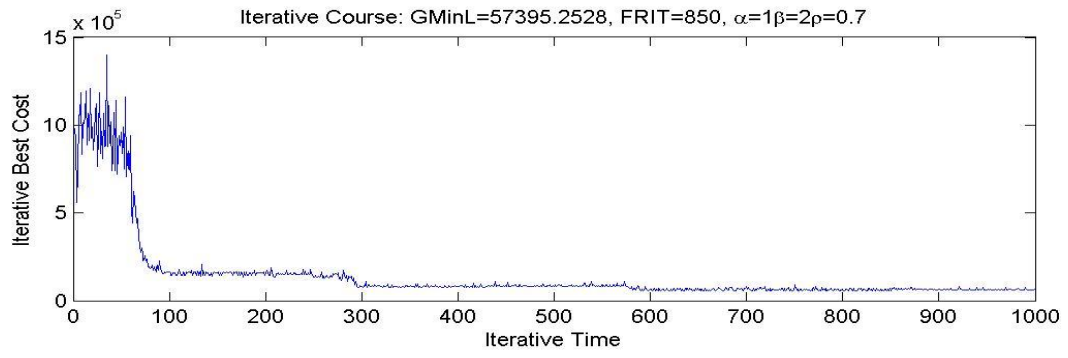
1-tutti 1-tutti Domanda Uniforme

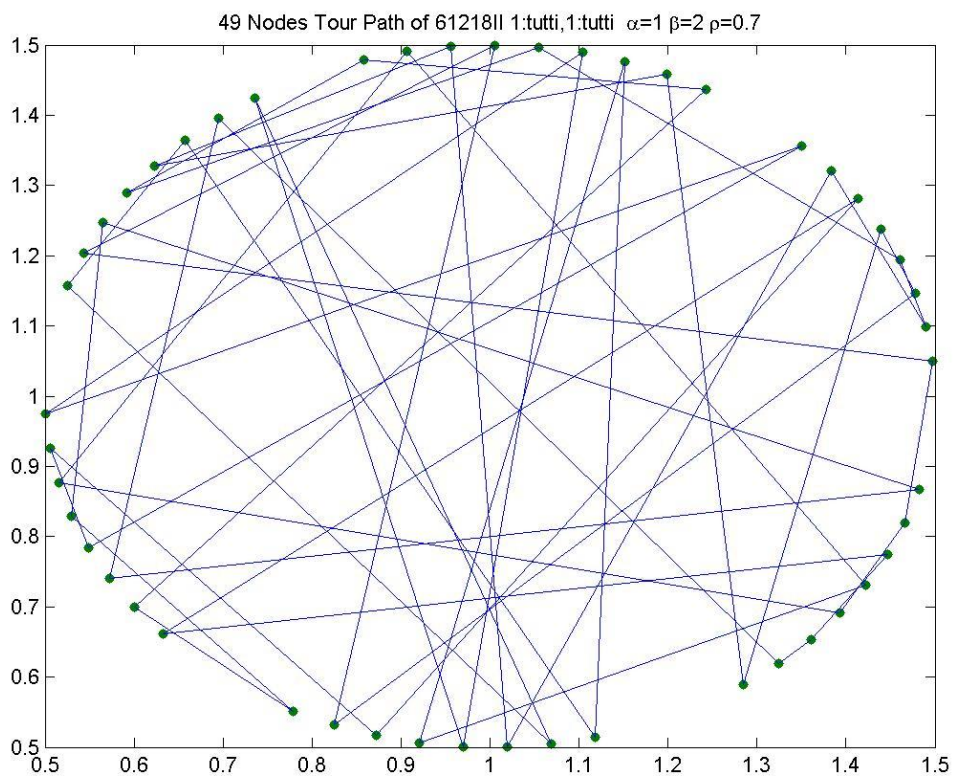
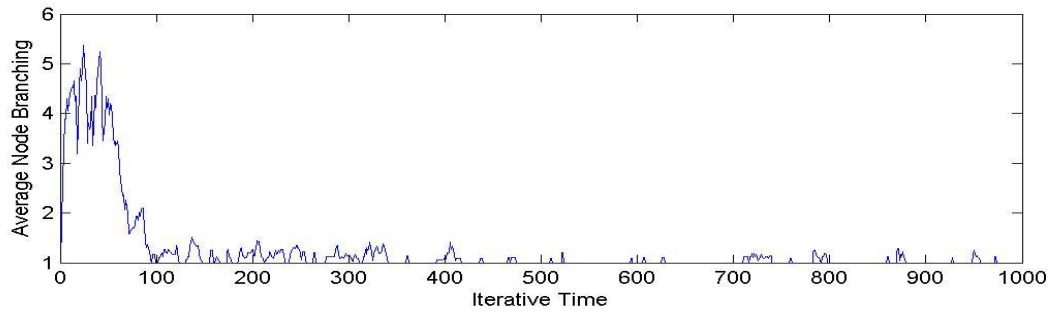
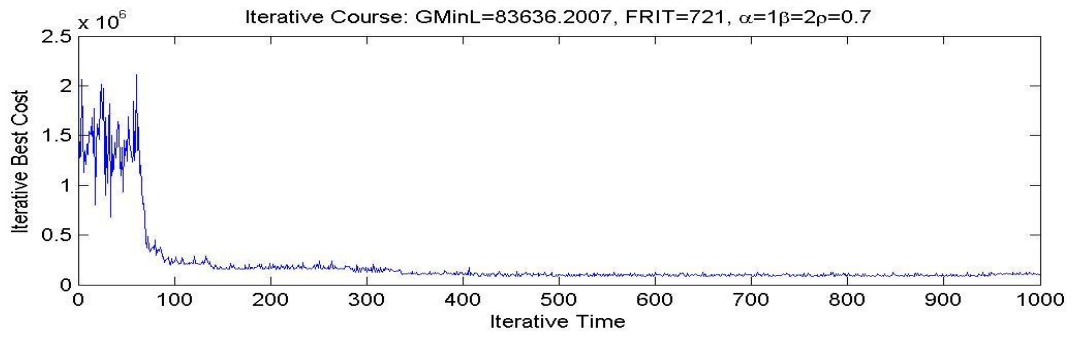




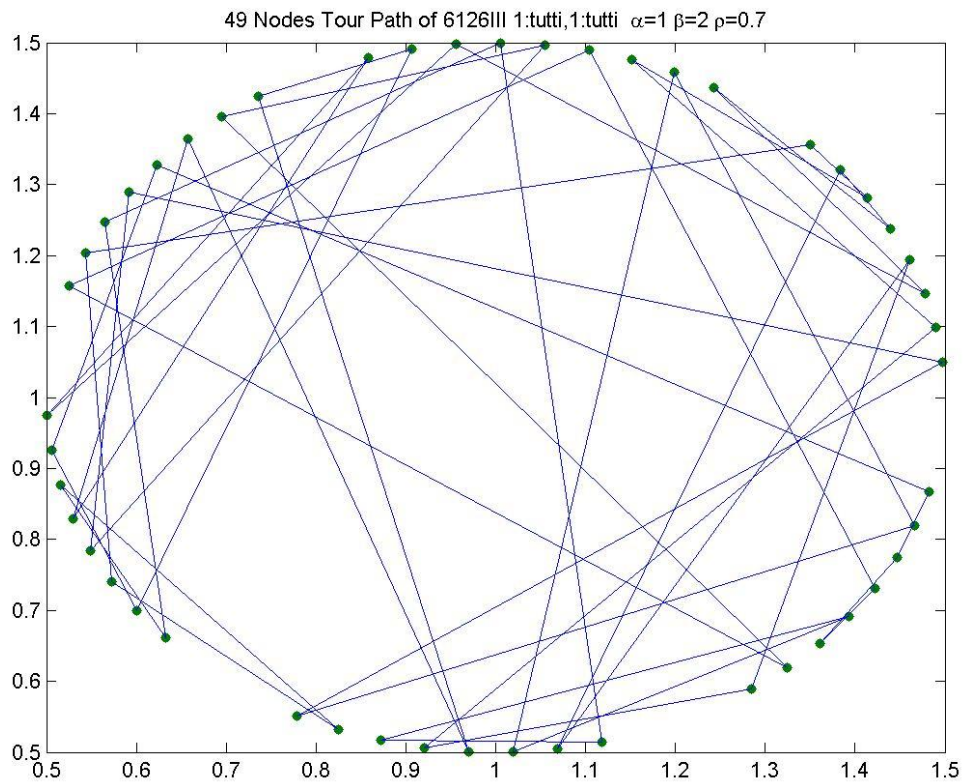
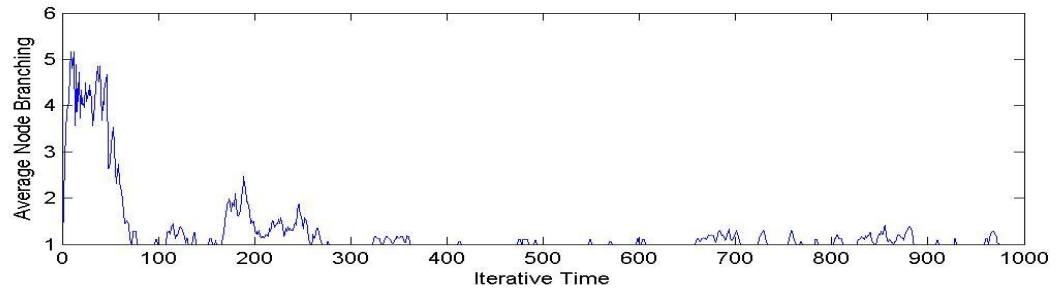
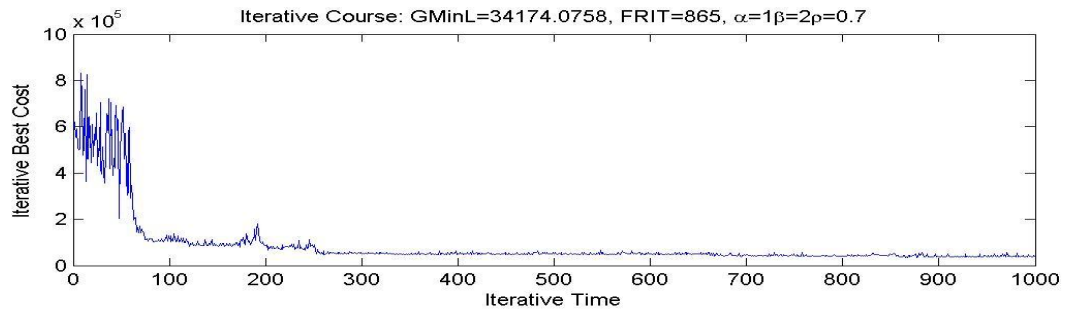


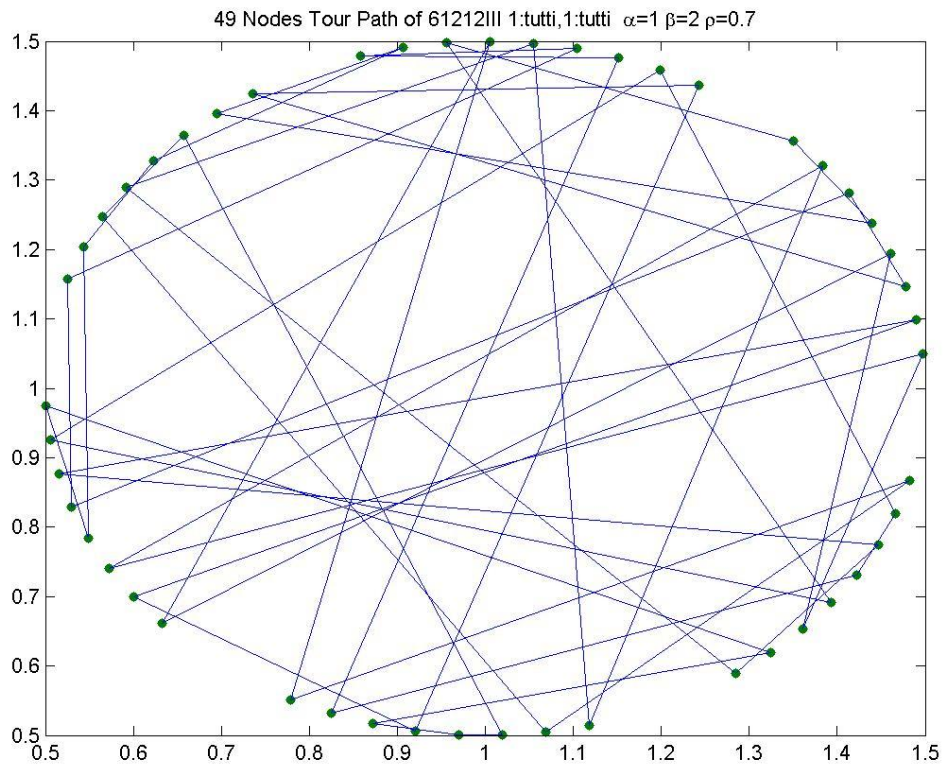
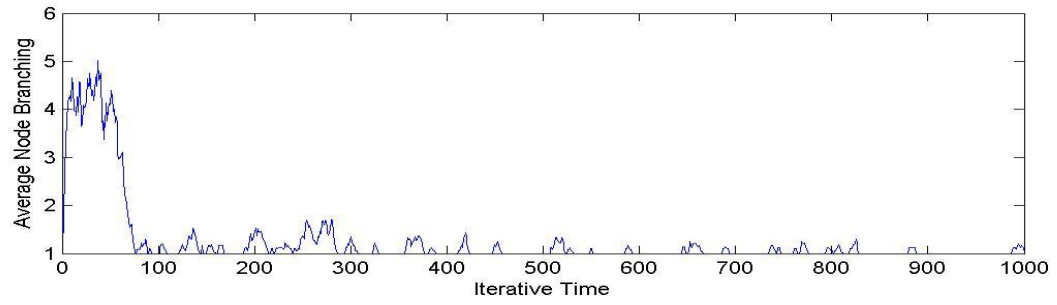
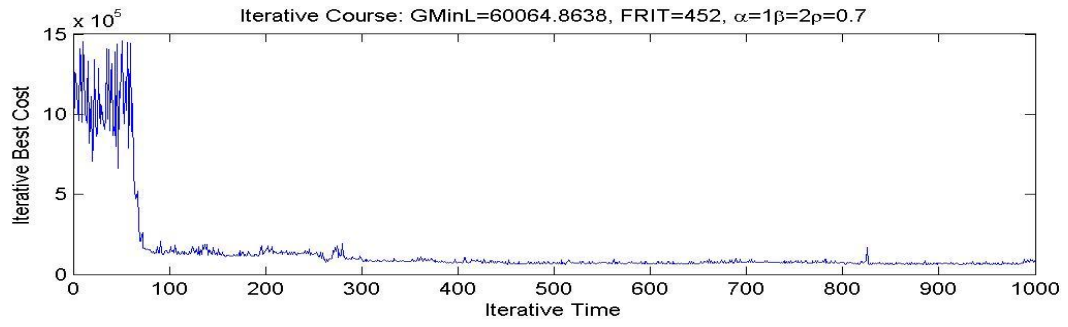


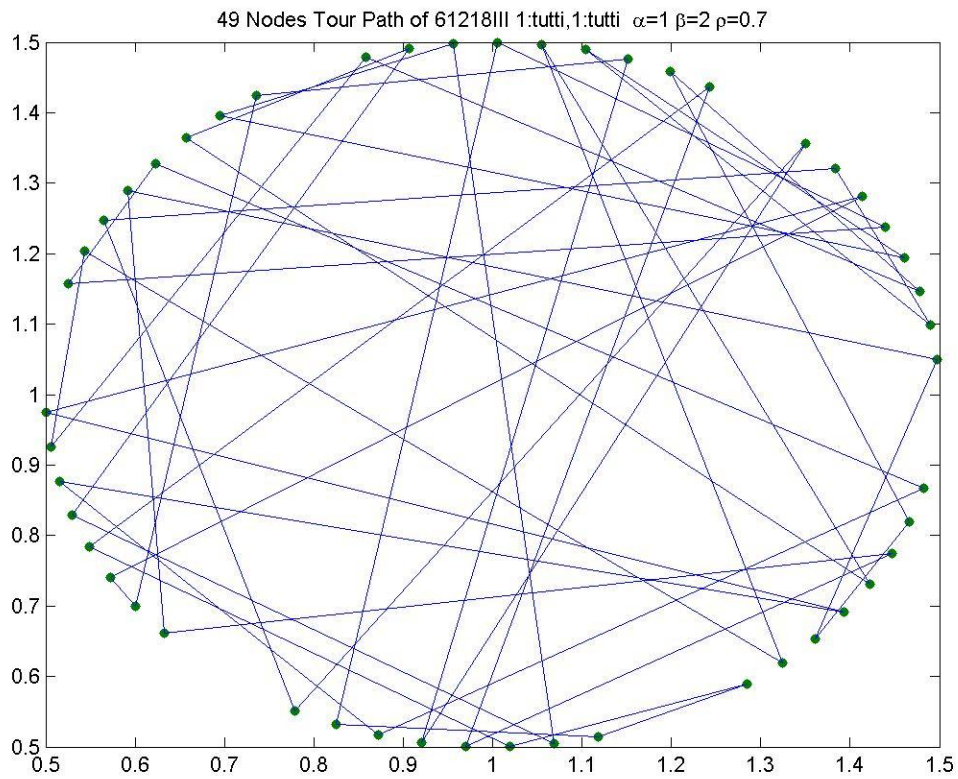
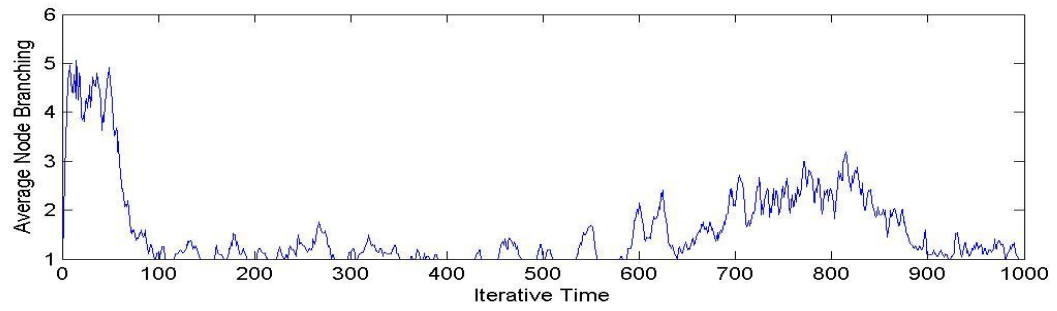
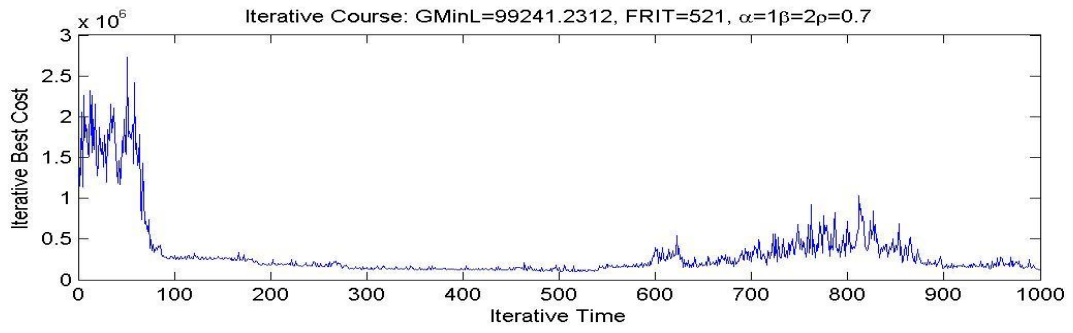




Domanda Polarizzata su 2 prodotti







Domanda polarizzata su 1 prodotto

