



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed  
Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

***Dinamica inter-periodale delle scelte di  
percorso in una rete stradale:  
studio sperimentale della risposta degli utenti  
a diversi livelli di informazione***

Relatore:

Prof. Claudio Meneguzzer

Laureando:

Costanza Sofia Angiari

ANNO ACCADEMICO 2014 - 2015

# Sommario

1. INTRODUZIONE .....	3
2. LETTERATURA .....	5
3. ANALISI DEI DATI.....	21
4. CONCLUSIONI.....	62
BIBLIOGRAFIA.....	68



# 1. INTRODUZIONE

Il presente elaborato si occupa di analizzare, tramite un approccio di tipo sperimentale, la dinamica inter-periodale di scelta di percorso in una semplice rete di trasporto. Comprendere i meccanismi di scelta di percorso è necessario per migliorare il realismo dei modelli di assegnazione del traffico e le loro applicazioni pratiche, ad esempio i sistemi ATIS (Sistemi Avanzati di Informazione per il Traffico).

In particolare, il lavoro si occupa di analizzare i meccanismi di scelta di percorso attuati da un campione di utenti in una rete di trasporto costituita da due percorsi che collegano una coppia Origine/Destinazione, studiando le risposte degli utenti a diversi livelli di informazione.

L'analisi è principalmente indirizzata a rispondere a due quesiti fondamentali: l'esistenza di una convergenza del sistema verso uno stato stabile e l'effetto delle informazioni sulla velocità con cui i descrittori del sistema si avvicinano ai valori di equilibrio.

Nel Capitolo 2, dopo una breve panoramica sulla dinamica inter-periodale e sulle applicazioni ATIS, vengono presentati alcuni concetti legati ai mezzi tramite cui l'utenza può migliorare le proprie conoscenze spaziali e prestazionali della rete: le informazioni e l'esperienza. Segue una breve sintesi della letteratura esistente sull'argomento, che si concentra particolarmente sui lavori riguardanti analisi sperimentali simili a quella condotta nel presente lavoro.

Successivamente, nel Capitolo 3, dopo una presentazione dettagliata dello scenario sperimentale, viene esposta l'analisi dei dati raccolti. I principali aspetti trattati sono l'analisi dell'evoluzione temporale delle variabili descrittive del sistema, valutando la presenza di eventuali trend statisticamente significativi, e le relazioni tra di esse. Si analizzano poi i comportamenti di scelta a livello individuale, studiando le performance dei singoli utenti e le reazioni ai diversi livelli di informazione cui vengono sottoposti.

Il Capitolo 4 conclude l'elaborato, presentando un compendio dei principali risultati ottenuti e introducendo alcune proposte per futuri sviluppi dell'analisi.

## 2. LETTERATURA

### 2.1 La dinamica inter-periodale: generalità e applicazioni

I sistemi di trasporto possono essere descritti secondo due differenti orizzonti: dinamica intra-periodale (*within-day*) ovvero inter-periodale (*day-to-day*). Il problema *within-day* si focalizza sulle scelte di viaggio fatte da un individuo in risposta a necessità specifiche in un dato orario di un dato giorno; gli obiettivi del viaggio, le tendenze comportamentali e le abilità cognitive che influenzano questo processo di scelta rispecchiano lo stato di queste variabili nell'istante in cui la scelta viene intrapresa.

La formulazione *day-to-day* si occupa, invece, di modellare come lo stato del sistema cambia da un giorno all'altro ed evolve nel tempo, e la conoscenza spaziale degli utenti è in costante evoluzione a seguito dei ripetuti viaggi all'interno del network. La principale difficoltà nel modellare le dinamiche comportamentali dell'utenza sta nella comprensione di come la conoscenza dello stato della rete influenzi le scelte di percorso. I modelli con dinamica inter-periodale tengono in considerazione fenomeni quali l'abitudine e la diffusione di informazioni nello studio delle proprietà di convergenza verso uno stato di equilibrio.

La dettagliata conoscenza delle dinamiche inter-periodali è fondamentale per migliorare il realismo dei modelli di assegnazione del traffico; ed è un mezzo fondamentale per la progettazione e lo sviluppo dei sistemi ATIS (Advanced Traveller Information System), sistemi di informazione per il traffico privato. Le implementazioni ATIS appartengono

alla più ampia categoria delle applicazioni ITS (Intelligent Transportation System), che nascono dall'applicazione delle tecnologie informatiche e delle telecomunicazioni ai sistemi di trasporto, e sono definibili come l'insieme di procedure, sistemi e dispositivi che consente, attraverso la raccolta, l'elaborazione e la distribuzione di informazioni, di migliorare la mobilità.

L'interesse connesso allo sviluppo di tali sistemi è legato alla prospettiva di poter risolvere, con modesti investimenti infrastrutturali, i problemi di sovrasaturazione del traffico che interessano il deflusso nelle reti di trasporto: tali tecnologie fanno parte di quell'insieme di strumenti di pianificazione che mira alla "gestione dell'esistente", rimodulando la domanda di trasporto per mitigare la congestione e migliorare l'utilizzo delle capacità delle reti stradali. Provvedere gli utenti di informazioni in tempo reale può infatti condurre ad una redistribuzione più efficace dell'utenza non solo sui percorsi, ma anche sui modi di trasporto che caratterizzano una rete. Per il singolo utente, il vantaggio nell'utilizzo dei sistemi ATIS si traduce in scelte di percorso più efficienti e nella riduzione dello stress associato alla pianificazione del viaggio e alla navigazione all'interno del network; per il sistema invece, se un numero adeguato di utenti è provvisto di un sistema ATIS, si realizzano riduzioni significative del tempo di viaggio e dei ritardi, oltre che benefici ambientali legati alla riduzione del consumo di carburante e delle emissioni inquinanti.

## **2.2 Informazioni, esperienza e *compliance***

I sistemi ATIS sono dunque finalizzati a fornire ai viaggiatori informazioni sulle condizioni di traffico in tempo reale, allo scopo di indirizzare le loro scelte di percorso in un'ottica di efficienza e di massimizzazione dell'utilità percepita. Le informazioni che vengono fornite

agli utenti del sistema di trasporto possono essere classificate secondo diverse prospettive.

Se le informazioni vengono fornite all'origine dello spostamento (informazioni pre-viaggio) servono a rendere funzionali la scelta preventiva di percorso e quella dell'orario di partenza, mentre le informazioni in viaggio sono di supporto a scelte di percorso adattive. Quando l'informazione che viene sottoposta agli utenti riguarda le performance della rete si parla di informazione descrittiva, mentre nel caso si suggerisca ai viaggiatori il comportamento o la scelta da adottare, l'informazione è definita "prescrittiva". Le informazioni possono essere basate sull'analisi di dati storici (informazioni su base storica), adatte quindi a fenomeni di congestione ricorrente, che presentano andamenti ripetitivi con strutture temporali simili; oppure possono essere in tempo reale, atte a informare l'utenza riguardo a fenomeni di congestione occasionale. A seconda del contenuto previsionale, le informazioni possono essere classificate in predittive e non predittive: nel primo caso si tratta di informazioni che forniscono previsioni per il breve periodo (10 - 15 minuti), nel secondo i dati forniti si riferiscono alla sola situazione attuale.

Ovviamente, nelle previsioni di traffico è necessario considerare il comportamento degli utenti: i sistemi ATIS sono funzionali alla riduzione delle oscillazioni intorno all'equilibrio solo se gli effetti delle informazioni sul comportamento dell'utenza vengono correttamente presi in considerazione. A questo proposito sono state proposte delle classificazioni che tengono conto dell'evoluzione in completezza e complessità delle informazioni secondo livelli successivi (Bifulco e Simonelli, 2005). Si parla di *informazione puntuale e istantanea* quando il sistema prevede la sola raccolta di informazioni sul traffico e la loro pressoché diretta distribuzione, si tratta di informazioni derivanti da operazioni di monitoraggio del traffico e che mancano di capacità previsionale

e di esaustività spaziale rispetto all'area di studio. Quando, a seguito delle operazioni di monitoraggio, il sistema è in grado di estendere l'informazione (grazie a dei modelli di simulazione) nello spazio e nel tempo, essa diventa una *informazione predittiva e di sistema*. Il massimo livello di accuratezza si raggiunge con le *informazioni predittive, congruenti e di sistema* in cui la costruzione dell'informazione da distribuire agli utenti tiene conto dell'effetto che essa avrà sui loro comportamenti ed è quindi progettata con un livello di previsione congruente con la presenza del sistema informativo e con gli impatti da esso indotti.

Poiché le informazioni influenzano direttamente le scelte di viaggio dell'utenza, se tali scelte cambiano, variano anche la distribuzione dei flussi e le prestazioni della rete. Informazioni riguardanti lo stato attuale del traffico su una rete possono, se incomplete, innescare un effetto opposto a quello voluto, incrementando la congestione e i tempi di percorrenza. Ad esempio, un'informazione di allerta riguardante un tratto di strada in condizioni critiche può risultare una predizione auto-distruttiva: la maggioranza degli utenti sceglie strade alternative, su cui il deflusso si congestiona, mentre il segmento "a rischio" rimane libero da fenomeni di congestionamento.

Le informazioni fornite all'utenza non sono l'unica fonte di informazione sulle condizioni del deflusso in una rete che gli utenti hanno a disposizione: le scelte degli utenti sono in buona parte influenzate dalla naturale informazione che essi hanno del funzionamento del sistema di trasporto su cui si muovono, acquisita con l'esperienza. Nel contesto della dinamica inter-periodale, che prevede un meccanismo di ripetizione delle scelte, i viaggiatori possono aggiornare le loro previsioni in due modi differenti, a seconda che le scelte vengano effettuate in presenza o in assenza di informazioni esterne.

Nel caso di decisioni prese in assenza di informazioni, la dinamica di aggiornamento delle utilità percepite è basata solamente sulle performance della rete: ogni giorno, l'utente compie la sua scelta sulla base del tempo di viaggio sperimentato il giorno precedente, e sulla base del nuovo tempo di viaggio sperimentato egli riaggiorna le sue previsioni.

In un contesto che prevede informazioni dall'esterno, la scelta di percorso è influenzata, oltre che dall'esperienza acquisita, dalle informazioni a disposizione e dalla loro credibilità. L'utente aggiorna di giorno in giorno le sue previsioni sulla base dei tempi di viaggio sperimentati e considerando, in aggiunta, il livello di accuratezza delle informazioni utilizzate in precedenza. Un sistema informativo accurato deve ridurre al minimo la discrepanza tra le informazioni fornite e le effettive performance del network. Tale aspetto è strettamente relato al concetto di *compliance*, definibile come l'attitudine degli utenti a prendere decisioni conformemente alle informazioni e ai suggerimenti esterni. Il grado di *compliance* alle informazioni ricevute dipende in buona misura dalla accuratezza che gli utenti hanno sperimentato relativamente al sistema di informazione, cioè dalla capacità del sistema di fornire indicazioni che, una volta seguite, si dimostrino le più convenienti o di fornire descrizioni che durante il viaggio vengono sperimentate essere esatte. Generalmente, gli utenti di una rete sono tanto più restii a seguire le informazioni quanto maggiore è la loro familiarità con la rete.

### **2.3 La dinamica inter-periodale di scelta di percorso: stato dell'arte**

Lo studio della dinamica inter periodale di scelta di percorso può essere affrontato secondo diversi approcci. All'approccio teorico, che prevede la formulazione di modelli che rappresentino l'evoluzione verso l'equilibrio delle variabili del sistema in una serie di periodi successivi, secondo un processo

deterministico o stocastico, si affianca un approccio prettamente sperimentale, che prevede la raccolta di dati su cui improntare l'analisi. Questo approccio prevede l'analisi diretta del comportamento di scelta di percorso che gli utenti adottano nel muoversi in una rete di trasporto: vista la difficoltà di reperire tali osservazioni in una rete reale, si ricorre all'analisi delle scelte che individui reali compiono in uno scenario ipotetico e semplificato, durante una serie di ripetizioni che costituiscono il periodo di analisi, scegliendo tra pochi percorsi alternativi che collegano una coppia O-D (*laboratory-like experiments*). Un'altra via per reperire questo tipo di dati è somministrare questionari a utenti pendolari di reti reali: in questo modo, però, i risultati rappresentano più che altro una fotografia della situazione attuale, e il loro potere esplicativo in termini di sviluppo temporale dei processi decisionali, del ruolo dell'apprendimento e dell'interazione tra gli utenti è piuttosto limitato.

In letteratura si trovano diversi lavori che adottano l'approccio sperimentale, studiando le dinamiche di scelta di percorso in un ambiente "controllato" (*laboratory like experiments*). Uno degli studi più recenti è stato condotto da *Knorr, Chmura e Schreckenberg (2014)*. Gli autori scelgono di condurre degli esperimenti con l'obiettivo di analizzare il ruolo delle informazioni pre-viaggio (*pre-trip information*) e dell'apprendimento sulle dinamiche di scelta di percorso. L'approccio sperimentale consente agli autori di introdurre dei *payoff*, concetto largamente utilizzato nella teoria dei giochi, che viene in questo contesto declinato come esito monetario del successo delle scelte del singolo utente: i partecipanti all'esperimento ricevono una quota iniziale da cui vengono dedotte le spese di viaggio. L'incentivo economico rende l'esperimento più realistico, perché nella realtà un'errata scelta di percorso implica una perdita in termini di tempo e denaro.

Nel dettaglio, gli autori si concentrano sulla scelta tra due percorsi alternativi tra un'origine e una destinazione, simulando uno spostamento pendolare casa-lavoro. I due percorsi alternativi sono una strada principale (*main road*) e una strada a pagamento (*toll road*), per il cui utilizzo gli utenti pagano un costo fisso, aggiuntivo a dei costi variabili dipendenti dal livello di congestione sulla strada scelta. L'influenza delle informazioni pre-viaggio viene studiata realizzando tre diversi esperimenti, ciascuno caratterizzato da 50 ripetizioni: nel primo gli utenti scelgono il percorso senza avere informazioni sullo stato di congestione nel sistema; nel secondo, dopo aver effettuato la scelta, essi vengono informati di quanti altri utenti intendono intraprendere il loro stesso percorso, ricevendo dunque un'informazione pre-viaggio a carattere previsionale, e hanno la possibilità di cambiare la preferenza indicata; il terzo esperimento è articolato come il secondo, con la differenza che per accedere all'informazione e alla possibilità di variare la scelta iniziale, gli utenti devono pagare una quota fissa.

L'evoluzione temporale delle scelte di percorso evidenzia una tendenza di approccio ai valori di equilibrio, che suggerisce una attitudine dei partecipanti ad organizzarsi per trovare la distribuzione di equilibrio (*User Equilibrium*), con un progressivo decremento delle fluttuazioni tra i due percorsi disponibili. L'effetto delle informazioni pre-viaggio si rileva in particolar modo confrontando il secondo e il terzo esperimento: in quest'ultimo, dove soltanto un numero limitato di utenti sceglie di accedere alle previsioni sulla congestione nella rete, si manifesta un miglior coordinamento e un uso più efficace delle due alternative di percorso.

Tali considerazioni portano a concludere che l'esperienza e l'apprendimento giocano una parte importante nella dinamica delle scelte di percorso, ma l'impossibilità di raggiungere uno stato di equilibrio, pur con un

numero elevato di osservazioni, induce a dubitare dell'esistenza di un equilibrio stabile come quello teorizzato da Wardrop.

Inoltre, dai migliori risultati in termini di efficienza che emergono dal terzo esperimento, consegue che un utilizzo più efficace della rete si ottiene quando solo una parte dell'utenza può disporre di informazioni aggiuntive. Queste conclusioni sono confermate da diversi autori in letteratura, che hanno dimostrato che il massimo risultato in termini di efficienza di sistema si ottiene quando solo una contenuta frazione di utenti – circa fino al 25%, è equipaggiata con sistemi ATIS, e conseguentemente ha accesso alle informazioni (Adler, 1998): Quando la percentuale di utenti informati aumenta, si possono innescare degli effetti negativi di concentrazione dei flussi su alcuni percorsi.

Un esperimento molto simile a quello appena presentato è stato condotto da *Selten et al. (2007)*. Anche in questo caso le alternative di percorso sono due, una *side road* e una *main road*, caratterizzata da una capacità maggiore. La peculiarità dello studio è che il processo decisionale di scelta di percorso viene analizzato conducendo un paragone con la teoria dei giochi.

Secondo la teoria dei giochi classica un gioco è, in linea di principio, un sistema in grado di evolversi nel tempo, che si conclude con un risultato per ciascuno dei partecipanti (giocatori). Caratteristica di un gioco è una funzione, detta di pagamento (payoff function): per ciascun giocatore rappresenta l'esito finale del gioco, solitamente un costo o un beneficio. Un'importante distinzione è quella tra giochi non-cooperativi e giochi cooperativi. Un gioco è detto cooperativo se due o più giocatori si coalizzano, cioè se concordano le proprie strategie con l'obiettivo di minimizzare la perdita globale della coalizione; un gioco è detto non-cooperativo se ogni giocatore ha l'obiettivo

minimizzare esclusivamente i propri costi. Un problema di assegnazione dei flussi su una rete è riconducibile ad un gioco non-cooperativo, e prevede l'esistenza di un gran numero di punti di equilibrio, ciascuno dei quali è caratterizzato da un *payoff* uguale per ciascun giocatore (secondo quanto teorizzato da Wardrop: all'equilibrio nessun utente trova vantaggio nel variare la sua scelta perché la configurazione di equilibrio prevede un costo di percorso uguale, e minimo, per tutti gli utenti).

Uno dei principali punti di discontinuità tra lo studio di Knorr e quello di Selten è che in quest'ultimo le informazioni fornite agli utenti non sono del tipo pre-viaggio, ma si tratta di feedback sulla scelta di percorso attuata nella ripetizione più recente dell'esperimento. Nel dettaglio, i partecipanti vengono sottoposti a due differenti "trattamenti" informativi, caratterizzati da 200 ripetizioni ciascuno: nel primo gli utenti ricevono, all'inizio di ogni ripetizione, delle informazioni riguardo al tempo di viaggio e al payoff dell'ultimo percorso scelto, mentre nel secondo viene loro fornito anche il tempo di viaggio realizzatosi nell'alternativa di percorso non scelta. Pur rilevando l'assenza di convergenza verso l'equilibrio teorico, dal momento che permangono consistenti oscillazioni fino alla fine di entrambi i trattamenti, è comunque da sottolineare l'effetto positivo di un feedback completo: le oscillazioni sono infatti più contenute nel secondo trattamento. Gli autori indicano la sopracitata molteplicità dei punti di equilibrio tra le possibili ragioni della non convergenza del sistema: in ciascuno stato di equilibrio il numero di utenti sulla *side road* è sei, ma il set di utenti che scelgono tale percorso può essere qualunque sestupla del totale di giocatori.

Un'ulteriore peculiarità dello studio è l'analisi del numero di cambiamenti di percorso tra una ripetizione e la successiva. Innanzitutto, esaminando il numero di variazioni di percorso in funzione del tempo, si

osserva che il trend è sempre negativo nelle sessioni del secondo trattamento: una probabile spiegazione del fenomeno, sicuramente correlata alle fluttuazioni meno accentuate rispetto al primo trattamento, è che gli utenti, avendo a disposizione un contenuto informativo più completo, non necessitano di raccogliere direttamente informazioni sperimentando entrambi i percorsi a disposizione. In secondo luogo, lo studio analizza la correlazione tra il numero di *road changes* con i payoff degli utenti: in tutte le sessioni dell'esperimento la correlazione negativa tra il payoff del singolo utente e il numero di cambiamenti di percorso indica che in media tali tentativi non sono di successo.

Ulteriori considerazioni vengono fatte sulle modalità di risposta degli utenti al risultato della loro scelta, espresso in termini di payoff, con l'obiettivo di comprendere se le esperienze recenti influiscono sulle scelte successive. Posto che il payoff di equilibrio è pari a 10, si classificano come negativi payoff inferiori, mentre valori superiori rispecchiano risultati positivi. Un partecipante che, a seguito di un payoff negativo sulla strada scelta, decide di variare percorso, spostandosi su quello meno congestionato, ha una modalità di risposta *diretta*. Diversamente, un utente che varia la sua scelta a seguito di un payoff positivo, ha una modalità di risposta *indiretta*: egli si aspetta che il payoff positivo fungerà da attrattore, rendendo più probabile il congestionamento del percorso nella successiva ripetizione dell'esperimento. Gli autori presentano evidenze statistiche a supporto dell'esistenza delle due diverse strutture di risposta.

**Meneguzzer e Olivieri (2013)** analizzano la dinamica inter-periodale di scelta di percorso tramite un'analisi sperimentale che ha coinvolto 30 soggetti, operanti scelte di percorso in una rete di tre percorsi alternativi tra un'unica coppia O-D. Sulla scia dell'esperimento di Selten, nelle 50 ripetizioni

dell'esperimento, i soggetti vengono provvisti di feedback riguardanti i tempi di percorrenza del percorso scelto nell'ultima ripetizione, senza però alcuna informazione aggiuntiva riguardante le alternative di percorso non scelte (*foregone payoff*). Lo studio si focalizza in particolare sulla convergenza dei flussi ai valori di equilibrio (*User Equilibrium*) e sull'evoluzione temporale del comportamento di variazione di percorso.

Osservando il tempo medio di rete, si rileva che le condizioni di equilibrio vengono raggiunte in alcune iterazioni, ma esse non perdurano come stato stazionario: in accordo con i risultati di altri studi (i.e. Selten, 2007), permangono ampie oscillazioni per l'intera durata dell'esperimento. Indagando però la possibile esistenza di un trend temporale statisticamente significativo (tramite il test di Daniels sulle medie mobili), l'ipotesi nulla dell'inesistenza di un trend è rifiutata computando la media mobile su intervalli superiori a 5 periodi consecutivi, tale risultato indica la possibilità che, nel lungo periodo, la variabile tempo medio di rete possa avvicinarsi ai valori di equilibrio.

Lo studio analizza altresì l'evoluzione temporale del *route switching*, meccanismo alla base della dinamica inter-periodale del sistema. Secondo il primo principio di Wardrop, raggiunto l'equilibrio di rete, l'attività di *route switching* dovrebbe essere assente, dal momento che gli utenti non hanno alcun incentivo a cambiare percorso. La presenza di tassi consistenti di variazione di percorso durante l'intero periodo di analisi conferma quanto già osservato con riferimento al tempo medio di rete, le cui forti oscillazioni durante in periodo di analisi impediscono il raggiungimento di condizioni stabili. L'osservazione diretta della serie storica dei cambi di percorso giornalieri non consente di individuare un possibile trend nella sua evoluzione temporale, viene pertanto effettuato un test di Daniels anche in riferimento a questa variabile. I risultati

ottenuti sono statisticamente significativi, confermando la supposizione che in un orizzonte di analisi più lungo la rete possa evolvere verso condizioni di stabilità.

Partendo dal presupposto che, in una dinamica inter-periodale come quella analizzata, la decisione di variare percorso possa essere strettamente connessa all'insoddisfazione rispetto alle esperienze di viaggio precedenti, viene presentata una regressione che investiga la relazione tra il numero totale di cambiamenti di percorso individuali durante l'intero esperimento e il tempo medio sperimentato dal singolo utente nello stesso lasso di tempo. La relazione tra le due grandezze risulta debole, ma statisticamente significativa, e gli autori ne danno due possibili letture. Considerando come causa la variabile NIS (*Number of Individual Switches*), che produce come effetto la variabile AITT (*Average Individual Travel Time*), la conclusione dell'analisi è che una strategia che comporta un numero di cambi di percorso elevato è mediamente infruttuosa, dal momento che conduce a valori elevati dei tempi di viaggio. Se invece si inverte il sopracitato rapporto causa-effetto, si deduce che utenti che sperimentano tempi di viaggio molto elevati tendono a cambiare percorso più frequentemente, nel tentativo di migliorare la loro performance.

Gli studi presentati di Meneguzzer e Selten analizzano la dinamica *day-to-day* di scelta di percorso in un contesto in cui gli utenti sono provvisti soltanto di feedback, senza altre informazioni a carattere previsionale: tale scenario è riconducibile ad un contesto di scelta in cui gli utenti devono fare fede alla sola esperienza derivante dai viaggi precedenti. Uno studio di **Iida et al. (1992)**, partendo dal presupposto che il comportamento di scelta degli utenti che si muovono su una rete dipende dalla conoscenza immagazzinata durante le esperienze di viaggio giornaliere, valuta l'esperienza come

combinazione dei tempi di viaggio sperimentati e degli errori di stima del tempo di percorrenza (differenza tra il tempo di viaggio previsto dall'utente e il tempo di viaggio effettivamente sperimentato).

Vengono condotti due esperimenti differenti su due diversi campioni di utenti: nel primo gli utenti vengono messi al corrente del tempo di viaggio sperimentato durante l'iterazione precedente, mentre nel secondo hanno a disposizione lo storico dei tempi di viaggio previsti e di quelli effettivi relativi a tutte le iterazioni precedenti. Il network oggetto di studio è costituito da due percorsi che collegano una coppia O-D, uno è più lungo e a capacità maggiore (*route 1*), l'altro, più breve, caratterizzato da una minore capacità (*route 2*). Ad ogni ripetizione gli utenti vengono messi a conoscenza del feedback relativo al tempo di percorrenza sul percorso scelto nell'iterazione precedente e, facendo una previsione riguardo i tempi di viaggio all'iterazione successiva, scelgono tra tutti il percorso su cui ritengono si avrà il tempo di percorrenza minore. In un contesto come quello esaminato le variabili del sistema (principalmente flussi e tempi di percorrenza) sono instabili ed difficile fare previsioni: l'utente è costretto a scegliere il percorso sulla base di esperienze soggettive e informazioni di traffico imperfette.

La principale conclusione dello studio è che il comportamento di scelta è significativamente influenzato dalla quantità di informazione disponibile, e che le differenze tra i due esperimenti sono ascrivibili al diverso contenuto informativo che li caratterizza. Nel primo esperimento, in cui la scelta di viaggio si basa soltanto sul tempo realizzato nell'iterazione precedente, l'evoluzione del sistema non converge ad uno stato stabile e presenta degli ampi range di oscillazione delle variabili. Nel secondo esperimento, pur non essendo rilevabile un'effettiva convergenza all'equilibrio, la portata delle oscillazioni diventa significativamente più piccola e la loro ampiezza decresce

rapidamente anche dopo una perturbazione significativa: questo potrebbe indicare che fornire agli utenti lo storico delle precedenti esperienze influenza positivamente le loro previsioni. Inoltre, confrontando le distribuzioni delle differenze tra i tempi di viaggio previsti e quelli effettivi, si rileva che l'errore nella previsione è inferiore nel secondo esperimento (il valore medio, in termini assoluti, dell'errore di previsione è inferiore). Un'altra significativa osservazione è legata al comportamento di avversione al rischio rispetto al livello di esperienza dell'utente. Nel primo esperimento, in cui la quota di informazione è inferiore, il tasso di *route switching* sulla strada a maggiore capacità (*route 1*) è minore rispetto all'altro percorso, anche quando il tempo di percorrenza è grande. Una possibile spiegazione del fenomeno è che, in un contesto di informazione incompleta, il meccanismo di scelta degli utenti è di *risk-aversion*, mentre quando l'informazione diventa più precisa (esperimento 2) gli utenti si spostano più facilmente sulla strada a minore capacità, perché hanno un migliore controllo dei meccanismi di variazione del sistema.

Un ulteriore studio condotto da **Iida et al. (1994)**, osserva la relazione tra informazioni provviste all'utenza e comportamento di scelta, focalizzandosi sulla reazione degli utenti alla variazione sia in termini quantitativi che qualitativi delle informazioni a disposizione, ricavando che il comportamento dipende non solo dalla presenza delle informazioni, ma anche del loro livello di precisione. La principale discontinuità con lo studio degli stessi autori precedentemente presentato è che si valuta la reazione in termini di meccanismi di scelta dello *stesso* campione sottoposto a trattamenti informativi differenti, con lo scopo di valutare le conseguenze sulla dinamica inter periodale a seguito dell'introduzione di un sistema ATIS.

Nell'esperimento proposto i partecipanti compiono simultaneamente e ripetutamente scelte di percorso ipotetiche, basandosi su informazioni di tipo

predittivo che vengono fornite ad ogni ripetizione relativamente a tutte le alternative di percorso. Ogni ripetizione corrisponde all'ora di punta mattutina su una rete costituita da un'unica coppia O-D collegata da due percorsi parzialmente sovrapposti, con un bivio che costituisce il nodo iniziale dei due percorsi alternativi. Agli utenti viene fornito il feedback relativo al tempo di viaggio realizzatosi nell'ultima iterazione sul percorso scelto, successivamente viene loro fornita un'informazione di tipo predittivo sul tempo di viaggio all'iterazione successiva su entrambi i percorsi: facendo una previsione sulla base dell'informazione ricevuta e dell'esperienza personale, ogni utente compie la scelta.

Vengono condotti tre esperimenti su campioni diversi di 35 partecipanti, ciascuno caratterizzato da tre diversi scenari: il primo scenario è comune a tutti gli esperimenti, e non prevede che vengano fornite informazioni predittive all'utenza, nel secondo e nel terzo scenario invece tali informazioni vengono fornite, secondo diversi livelli di accuratezza. Le informazioni predittive vengono calcolate come numeri casuali normalizzati il cui valore medio corrisponde al tempo di percorrenza effettivo determinato all'iterazione precedente, e l'accuratezza dell'informazione è misurata sulla base della deviazione standard (*high quality information* – SD = 1 min; *low quality information* – SD = 5 minuti). Nel primo e nel terzo esperimento il livello di accuratezza delle informazioni fornite nel secondo e nel terzo scenario è costante – rispettivamente *high quality* nel primo esperimento e *low quality* nel terzo. Il secondo esperimento, che corrisponde invece al caso in cui un sistema di informazione viene progressivamente migliorato, prevede informazioni di tipo *low quality* nel secondo scenario e di tipo *high quality* nello scenario successivo.

I risultati ottenuti confermano che le informazioni vengono considerate dagli utenti nel processo di scelta di percorso, ma che la predisposizione al loro utilizzo dipende dall'accuratezza delle stesse. Con riferimento al secondo esperimento, infatti, in cui il livello di accuratezza varia tra il secondo e il terzo scenario, la differenza tra il tempo di viaggio effettivo e quello previsto è molto maggiore nel secondo scenario, in cui la qualità dell'informazione è più bassa.

Inoltre, il campione del primo esperimento, trattato solamente con informazioni di tipo *high quality* è molto più predisposto ad affidarsi alle previsioni rispetto al campione del secondo (qualità dell'informazione crescente tra il secondo e il terzo scenario): gli utenti si mostrano poco disposti a rivedere la loro predisposizione all'utilizzo delle informazioni, anche se l'accuratezza migliora, fatto che porta a ipotizzare una sorta di inerzia nel meccanismo di scelta di percorso degli utenti.

## 3. ANALISI DEI DATI

### 3.1 Descrizione dello scenario sperimentale

Nel presente lavoro viene sviluppato un esperimento riguardante una serie di ripetizioni di scelte di percorso ipotetiche, che simulano viaggi pendolari del tipo casa - lavoro. Lo scenario sperimentale, volutamente semplificato in linea con gli esempi presenti in letteratura, è un *toy network* costituito da un'unica coppia Origine/Destinazione, collegata da due percorsi alternativi non sovrapposti (Fig. 1).

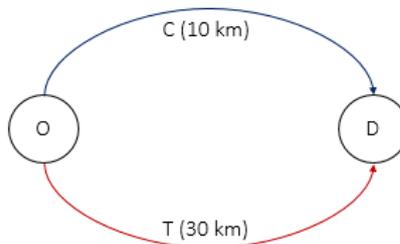


Fig. 1 - Schema della rete di offerta

I percorsi disponibili sono una strada di attraversamento del centro abitato (Centrale), lunga 10 km, con un limite di velocità di 50 Km/h e tempo di percorrenza a vuoto (*free flow*) pari a 12 minuti, e una strada extraurbana (Tangenziale), lunga 30 km, con limite di velocità 90 km/h e tempo di percorrenza pari a 20 minuti in assenza di traffico.

Nell'esperimento si ipotizza che gli utenti attuino simultaneamente le loro scelte di percorso e non viene presa in considerazione la variabilità dei tempi di partenza, è dunque possibile calcolare i tempi di percorrenza con

funzioni di performance convenzionali: è stata utilizzata allo scopo la funzione BPR.

$$t = t_v \left[ 1 + \alpha \left( \frac{f}{k} \right)^\beta \right]$$

	<i>Centrale</i>	<i>Tangenziale</i>
Tempo di percorrenza <i>free flow</i> (min)	12	20
Capacità (k)	13	20
Coefficiente $\alpha$	2	0,8
Coefficiente $\beta$	5	4

Tabella 1 - Caratteristiche delle infrastrutture e coefficienti della funzione BPR

Le proprietà delle funzioni tempo di percorrenza per entrambe le strade sono illustrate in Fig. 2. La strada tangenziale ha una capacità maggiore rispetto alla centrale, e conseguentemente la curva della BPR presenta una pendenza inferiore, mentre la minore capacità che caratterizza la strada centrale si traduce in una funzione molto più ripida, con incrementi significativi del tempo di percorrenza a seguito di variazioni modeste di flusso.

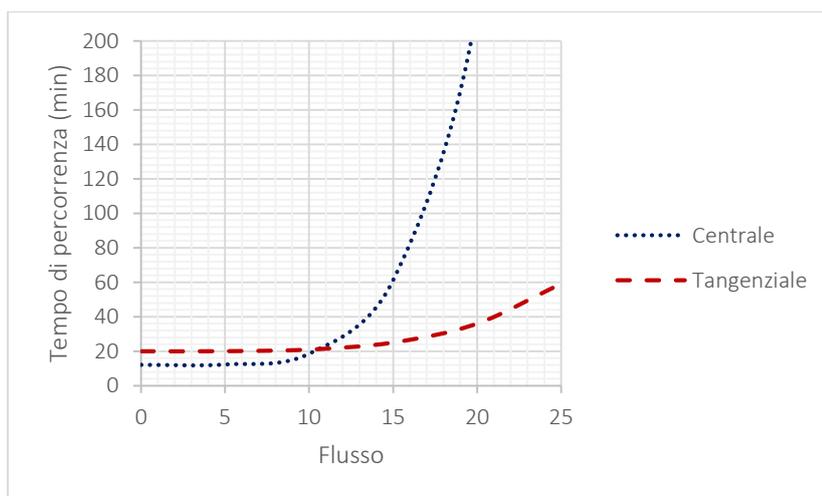


Fig. 2 - Funzioni BPR relative ai due percorsi della rete

Il campione è costituito da 33 individui, tutti provvisti di patente di guida, selezionati in modo da assicurare una sufficiente variabilità rispetto alle caratteristiche personali (Fig. 3). Ai partecipanti è stato richiesto di indicare la propria scelta di percorso per un totale di 60 ripetizioni successive, con le quali si vogliono simulare i viaggi quotidianamente compiuti dai pendolari. L'esperimento si è svolto nel mese di Maggio 2015, le ripetizioni erano distribuite nei giorni feriali (tre al giorno, alle 9:00, alle 13:00 e alle 17:00): come osservato da Meneguzzer e Olivieri (2013), questo approccio è più realistico rispetto a quelli adottati da altri esperimenti di questo tipo riportati in letteratura, in cui ai partecipanti è richiesto di compiere le scelte di percorso per un numero elevato di volte in un intervallo di poche ore.

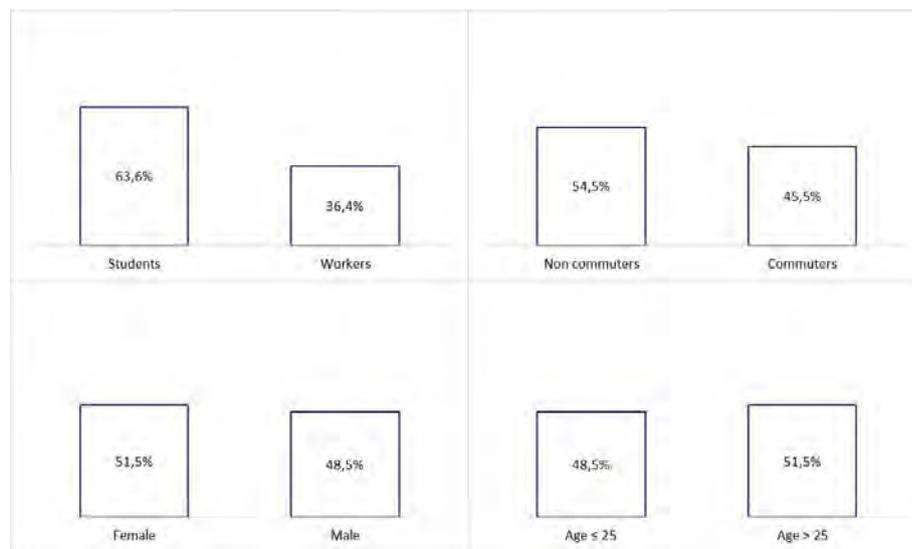


Fig. 3 - Distribuzione delle caratteristiche personali del campione

All'inizio del periodo di simulazione sono state comunicate ai partecipanti informazioni sul tipo di infrastruttura corrispondente ai due link, insieme ai valori dei tempi *free flow*, mentre con riferimento alle capacità dei link sono state fornite solo informazioni generiche, senza precisarne i valori esatti. I partecipanti non erano a conoscenza del numero totale dei soggetti coinvolti, e sono stati istruiti ad evitare ogni forma di cooperazione.

Sono stati calcolati i valori caratteristici dello stato di equilibrio, da utilizzare come riferimento nelle analisi successive, basandosi sulla dimensione totale della domanda e sulle funzioni tempo di percorrenza assunte nella progettazione dell'esperimento. All'equilibrio, sul totale di  $n=33$  partecipanti, la distribuzione sui due link è  $n_C = 13$  e  $n_T = 20$ , e il tempo di viaggio è uguale su entrambi i percorsi ( $t_C = t_T = 36$  min), distribuzione dei flussi che corrisponde allo *User Equilibrium* in accordo con il primo principio di Wardrop (Wardrop, 1952).

Durante l'esperimento non sono state fornite agli utenti informazioni di tipo predittivo, ma solamente feedback riguardanti i tempi di percorrenza nell'iterazione precedente. Il contenuto del feedback è variato durante il periodo di analisi: nella prima metà dell'esperimento (periodi 1-30) gli utenti venivano informati, all'inizio di ogni iterazione, del tempo di percorrenza che si era verificato su entrambe le alternative di percorso disponibili, mentre nei periodi da 31 a 60 è stato fornito un feedback parziale, contenente l'informazione riguardante il solo percorso indicato dall'utente nell'ultima scelta.

Al termine del periodo di analisi è stato somministrato agli utenti un questionario in cui, oltre a domande riguardanti le caratteristiche personali, veniva loro richiesto di fornire indicazioni sul comportamento di scelta adottato durante l'esperimento. Nel questionario, oltre ad esprimere un'eventuale preferenza per un percorso in particolare (con l'obiettivo di svolgere analisi aggiuntive sulle preferenze dichiarate e rivelate del campione), si richiedeva di indicare quale fosse l'intervallo di ripetizioni precedenti su cui si basava la scelta per la  $(n+1)$ esima iterazione. Inoltre, gli utenti sono stati invitati ad esprimere, su una scala da 1 a 10, un giudizio soggettivo sulla utilità e sulla affidabilità delle informazioni ricevute.

## 3.2 Performance di rete e meccanismi di scelta di percorso: evoluzione temporale

### 3.2.1 Flussi e tempi di percorrenza

Vengono presentati in questa sezione i principali risultati relativi all'evoluzione inter-periodale delle variabili che identificano le performance della rete, in particolare flussi e tempi di percorrenza.

L'evoluzione temporale del numero di partecipanti sui due percorsi è illustrata in Fig. 4. I valori  $n_C = 13$  utenti sulla strada centrale (C) e  $n_T = 20$  utenti sulla strada tangenziale (T) corrispondono ai valori di equilibrio (UE), non noti ai partecipanti all'inizio dell'esperimento: le maggiori oscillazioni rispetto ai valori di equilibrio si osservano nei primi periodi. I valori dei flussi raggiungono le condizioni di UE diverse volte nel corso delle 60 ripetizioni dell'esperimento, soprattutto nella seconda metà del periodo di analisi, ma non permangono come stato stabile e persistono oscillazioni consistenti fino alla fine dell'esperimento.

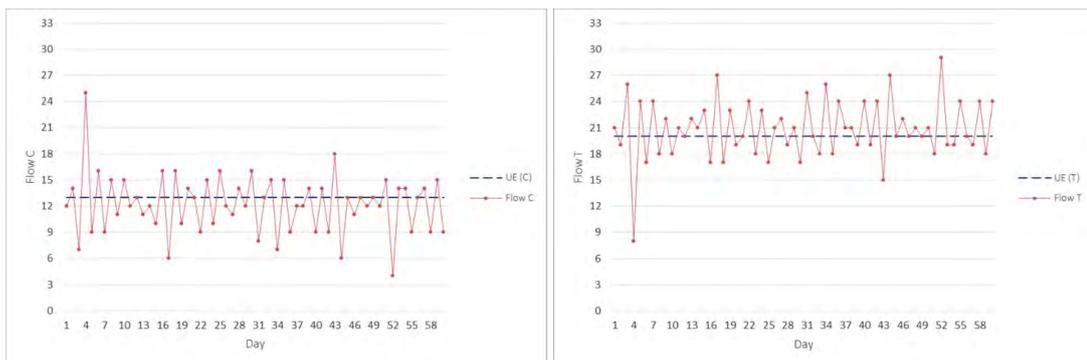


Fig. 4 - Evoluzione inter-periodale dei flussi

Analoghe considerazioni possono essere fatte con riferimento alla variabile tempo di percorrenza, riportata in Fig. 5 per entrambe le alternative di percorso, insieme al valore di equilibrio ( $T_C = T_T = 36$  min). Si rilevano

fluttuazioni durante tutto l'esperimento e dall'osservazione diretta del grafico non risulta un trend decrescente.

E' però interessante sottolineare che nella seconda parte dell'esperimento (periodi 31-60), l'ampiezza delle oscillazioni decresce rapidamente anche dopo una perturbazione significativa. Durante il periodo di analisi si sono registrati due *outlier* degni di nota: il primo all'iterazione 4 ( $n_c = 25$ ,  $TT_C = 643.3 \text{ min}$ ) e il secondo all'iterazione 43 ( $n_c = 18$ ,  $TT_C = 134.2 \text{ min}$ ). Dall'evoluzione dei tempi di percorrenza risulta che nel primo caso sono necessarie sei iterazioni perché i valori ritornino ad approssimarsi a quelli di equilibrio, pur non raggiungendoli; mentre nel secondo caso il sistema, dopo due sole iterazioni, raggiunge l'equilibrio. Una possibile spiegazione è riconducibile al fatto che gli utenti, provvisti nella prima metà dell'esperimento di un'informazione di *feedback* completa, riguardante entrambe le alternative di percorso, grazie all'esperienza acquisita sono in grado, nella seconda parte del periodo di analisi, di redistribuirsi efficacemente nei percorsi nel giro di poche iterazioni, pur ricevendo soltanto un *feedback* parziale.

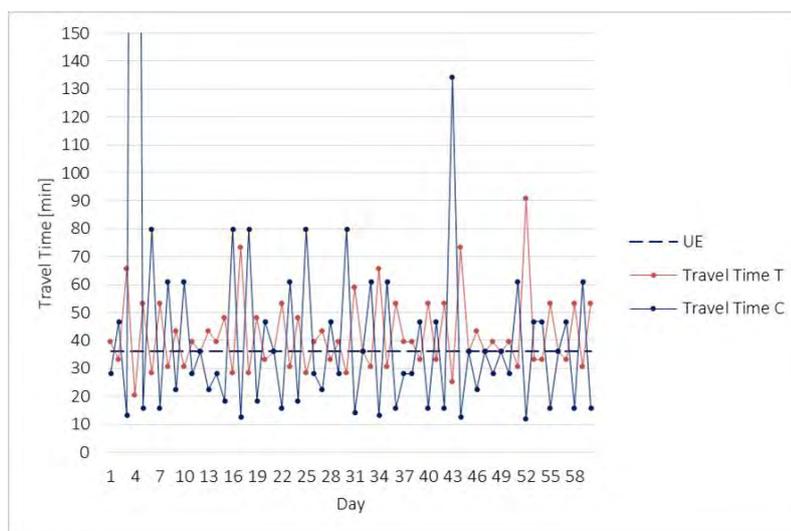


Fig. 5 - Evoluzione del tempo di viaggio su C e T nel periodo di analisi

L'evoluzione nel tempo delle variabili flusso e tempo di percorrenza presenta un andamento oscillatorio per tutta la durata del periodo di analisi e non esibisce la tendenza ad avvicinarsi stabilmente all'equilibrio. Osservando invece l'evoluzione temporale del tempo medio di rete (*Mean system travel time*), in Fig. 6, si rileva un andamento decrescente, seppure non marcato, che è stato evidenziato aggiungendo una linea di trend. Tale risultato sperimentale è in linea con quanto evidenziato in diversi studi presenti in letteratura (ad esempio Knorr et al., 2014). E' possibile identificare diversi intervalli in cui il sistema si trova in condizioni di relativa stabilità, che si mantengono in gruppi di iterazioni successive soprattutto nella seconda metà del periodo di analisi.

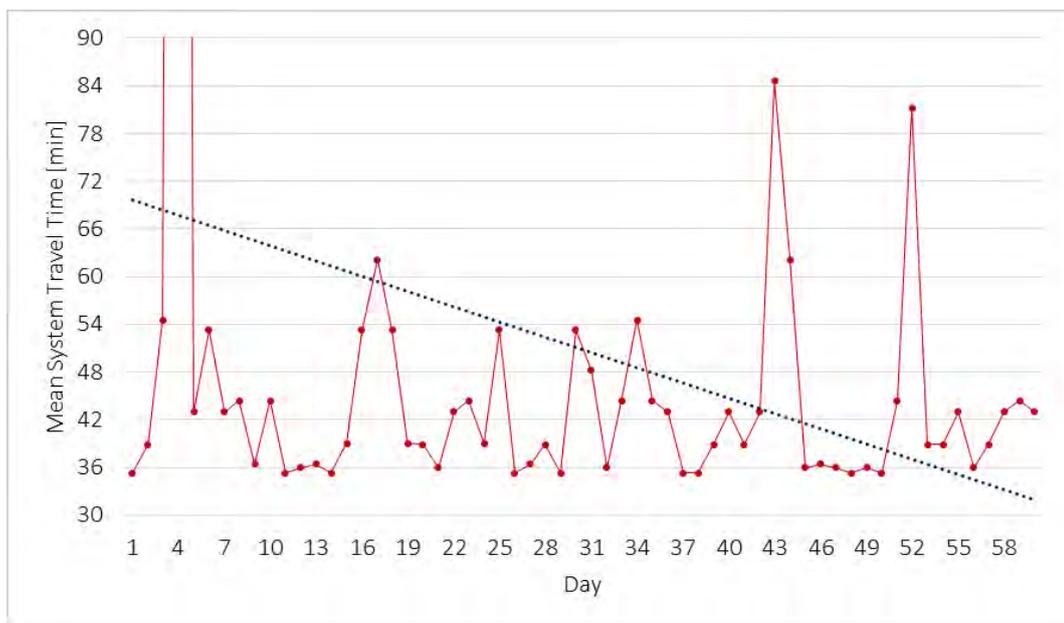


Fig. 6 - Tempo medio di rete

L'osservazione ricorrente del raggiungimento di stati di equilibrio relativamente stabili nella seconda metà dell'esperimento, ha indotto a confrontare le medie delle variabili finora prese in considerazione calcolate separatamente sui due gruppi di periodi. I risultati sono riportati in Tabella 2.

	<i>UE</i>	<i>Media (periodi 1-60)</i>	<i>Media (periodi 1-30)</i>	<i>Media (periodi 31-60)</i>
<i>Flusso C</i>	13	12.20	12.70	11.70
<i>Flusso T</i>	20	20.80	20.30	21.30
<i>Tempo C (min)</i>	36	47.46	59.13	35.79
<i>Tempo T (min)</i>	36	41.60	39.82	43.37
<i>T medio di rete (min)</i>	36	50.79	<b>57.63</b>	<b>43.94</b>

*Tabella 2 - Valori medi dei descrittori di performance del sistema nel periodo di analisi*

I valori medi dei descrittori sono stati calcolati sia riferiti all'intero periodo di analisi sia prendendo come riferimento temporale la prima e la seconda metà dell'esperimento. La tendenza decrescente verso valori di equilibrio della variabile tempo medio di rete, già osservabile dal grafico in Fig. 6, che ne riporta l'evoluzione temporale, trova ulteriore rispondenza confrontando la media nei due periodi successivi di analisi: la diminuzione riscontrata è circa del 24%.

La media dei tempi di percorrenza sull'alternativa di percorso C decresce tra il primo e il secondo periodo dell'esperimento; una tendenza opposta si verifica sul percorso T, pur con una variazione, in valore assoluto, minore, dovuta alla maggiore capacità dell'infrastruttura, in grado di assorbire variazioni di flusso senza apprezzabili incrementi in termini di congestione, e quindi di tempi di percorrenza. Tali variazioni dei valori medi sono riconducibili al trattamento informativo cui è sottoposto il campione: nella prima parte (periodi 1-30) è stato fornito un *feedback* sui tempi di percorrenza relativo a entrambe le alternative di percorso, mentre nella seconda fase (periodi 31-60) gli utenti hanno ricevuto soltanto un'informazione riguardante il tempo di percorrenza sull'ultimo percorso scelto, scenario che corrisponde al contesto reale in cui gli utenti non ricevono informazioni esterne e si affidano alle sole esperienze precedenti. Osservando i valori medi delle variabili, si

ipotizza che l'informazione di *feedback* completa che i partecipanti ricevono nella prima fase sia bastevole a fornire loro una conoscenza della rete e delle sue performance sufficiente, nella fase successiva, a organizzarsi in configurazioni di scelta più efficienti in termini di prestazioni complessive. Tale ipotesi, che nasce dalla osservazione di un indicatore statistico puramente descrittivo, ha trovato conferma in analisi più approfondite, riportate nei paragrafi successivi del presente capitolo.

Considerando la variabile flusso, nonostante essa presenti un'evoluzione temporale oscillante (Fig. 4), mostra valori medi, riferiti all'intero periodo di analisi (ripetizioni 1-60), prossimi a quelli di equilibrio, riportati in tabella nella prima colonna. Per visualizzare più chiaramente le differenze tra le distribuzioni della variabile nei due periodi di analisi, è stato costruito un box-plot, riportato in Fig. 7. In entrambi i periodi la tendenza centrale della distribuzione è maggiore sulla strada tangenziale, mentre appare evidente una riduzione della variabilità nei campioni riferiti alla seconda fase: pur non emergendo un andamento decrescente delle oscillazioni dall'osservazione diretta dell'evoluzione temporale dei flussi (Fig. 4), la ridotta intensità della dispersione dei dati indica che l'ampiezza delle fluttuazioni diminuisce nel secondo periodo.

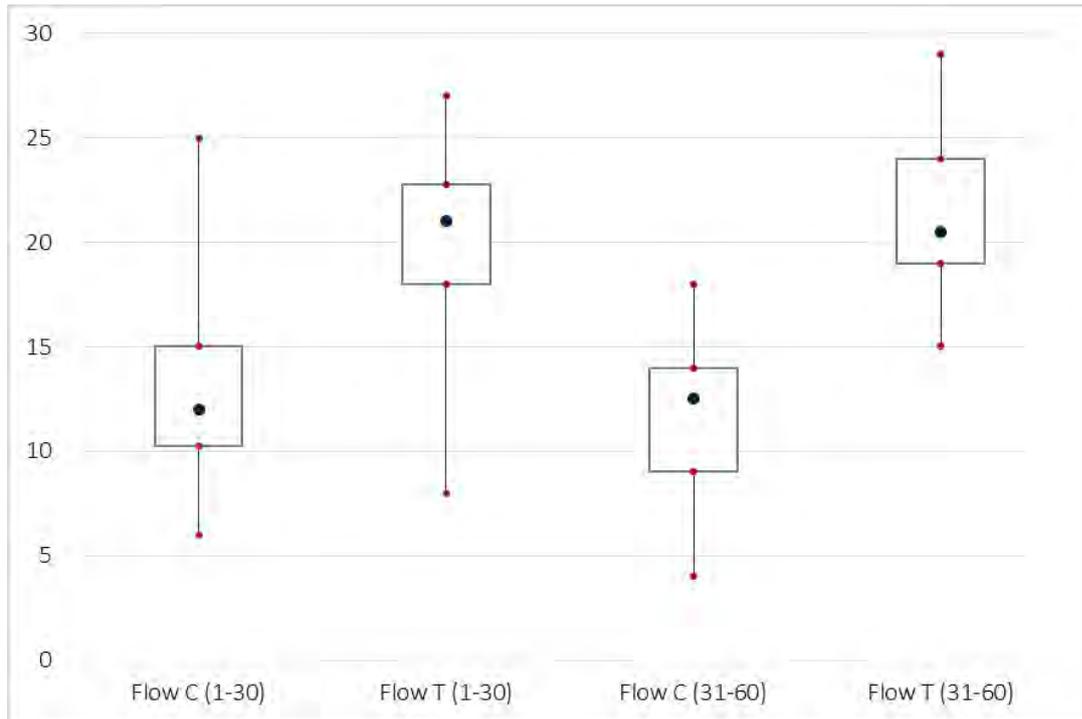


Fig. 7 - Box plot relativo ai flussi sui due percorsi alternativi nei due periodi di analisi

### 3.2.2 Cambiamenti di percorso giornalieri

Le grandezze finora considerate (flussi e tempi di percorrenza) sono descrittive delle performance del sistema: la principale risposta alle prestazioni variabili della rete sono i meccanismi di cambiamento di percorso attuati dal campione, che vengono descritti in questo paragrafo.

Osservando la Fig. 8, che riporta l'evoluzione temporale del cambiamenti di percorso giornalieri nell'intero periodo di analisi, emerge in modo evidente un andamento decrescente nel tempo, sottolineato dalla linea di trend in figura. Questo risultato è in linea con altri riportati in letteratura (ad esempio Selten et al., 2006), e viene generalmente ricondotto al fatto che una crescente esperienza, acquisita durante il corso dell'esperimento, riduce la necessità di raccogliere direttamente informazioni, attuando frequentemente cambi di percorso. Nel presente lavoro, l'incidenza dell'esperienza è ulteriormente amplificata dal fatto che nelle prime trenta ripetizioni

dell'esperimento venga fornito un *feedback* riguardante i tempi di viaggio su tutti i percorsi disponibili: la completezza dell'informazione storica a disposizione degli utenti nel primo periodo di analisi accelera il processo di apprendimento e, nel periodo successivo, modera i cambiamenti di percorso volti a collezionare informazioni sulle performance dell'alternativa di percorso non scelta.

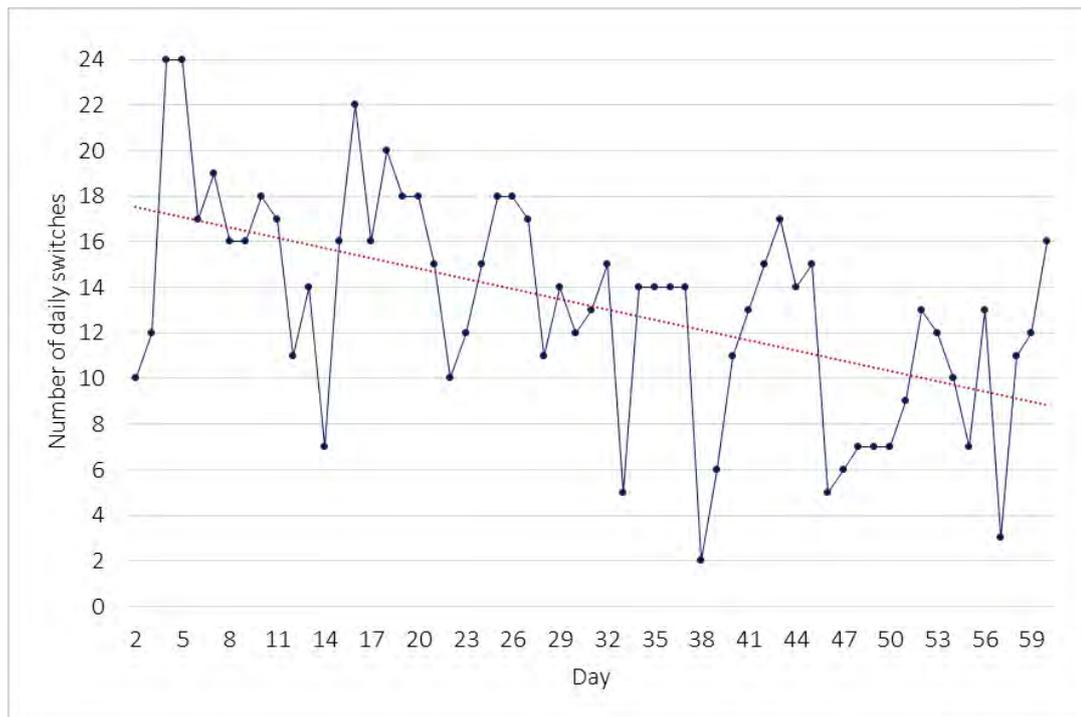


Fig. 8 – Evoluzione temporale dei cambiamenti di percorso giornalieri

In Fig. 9 e in Fig. 10 sono riportati gli istogrammi di frequenza dei cambiamenti di percorso giornalieri sia con riferimento all'intero periodo di analisi sia con riferimento ai due sotto-periodi. L'andamento decrescente, che appare dal grafico che riporta l'evoluzione temporale dei cambiamenti di percorso giornalieri, emerge chiaramente anche dalle distribuzioni di frequenza della variabile nei due periodi di analisi. Le frequenze assolute dei cambiamenti di percorso risultano essere maggiori nei periodi 1-30 e decrescono nei periodi successivi.

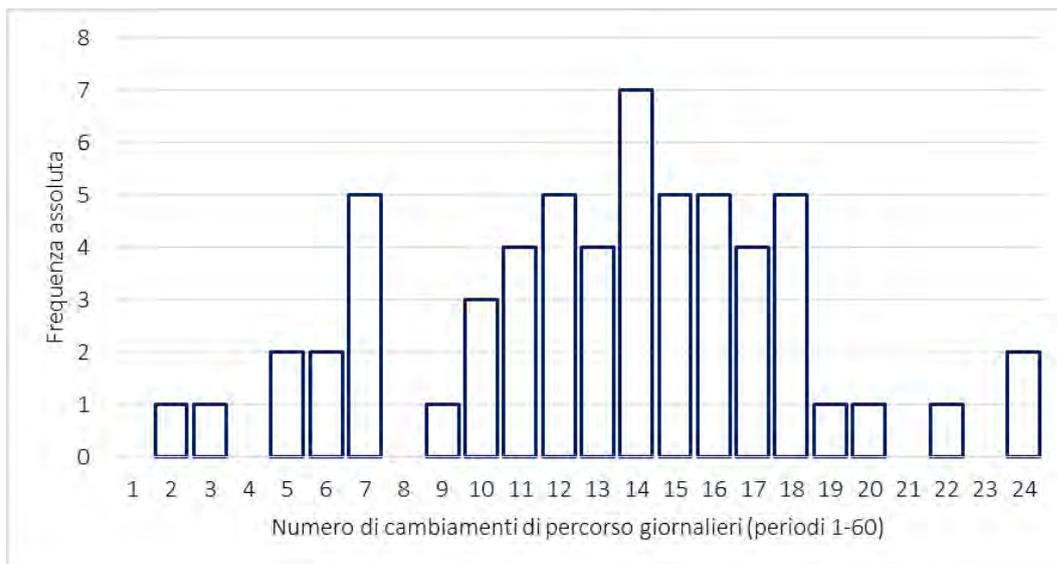


Fig. 9 - Istogramma di frequenza dei cambiamenti di percorso giornalieri per l'intero periodo di analisi

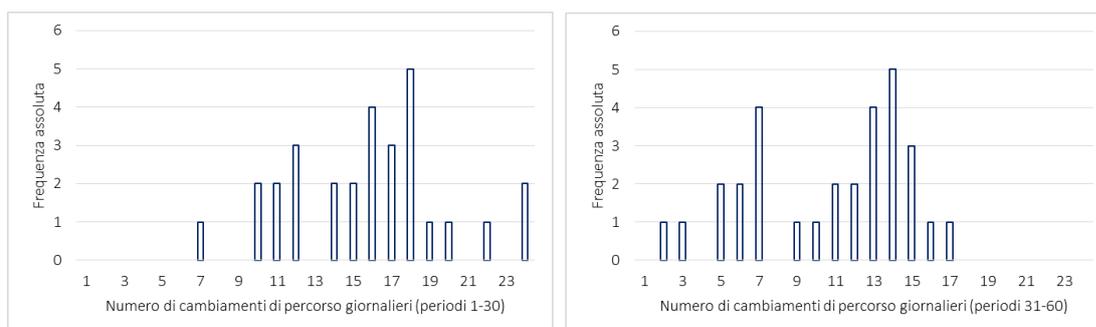


Fig. 10 - Istogramma di frequenza dei cambiamenti di percorso giornalieri nei due sotto-periodi

L'evoluzione temporale della variabile rappresentativa delle variazioni di percorso giornaliera mostra un andamento decrescente nel tempo. Con l'intento di valutare se esista un trend temporale statisticamente significativo, che indichi una tendenza strutturale del sistema ad avvicinarsi, nel lungo periodo, a uno stato di equilibrio, i dati sperimentali sono stati sottoposti ad un test non parametrico, conosciuto come test di Daniels sulle medie mobili (Daniels, 1950). Maggiori dettagli sono riportati in Appendice 1.

In Fig. 11 è riportato l'andamento della variabile cambiamenti di percorso giornalieri detrendizzata tramite le medie mobili calcolate su intervalli di diverse dimensioni. Emerge chiaramente un trend decrescente,

sempre più evidente all'aumentare dell'ampiezza degli intervalli di periodi successivi su cui le medie mobili vengono calcolate.

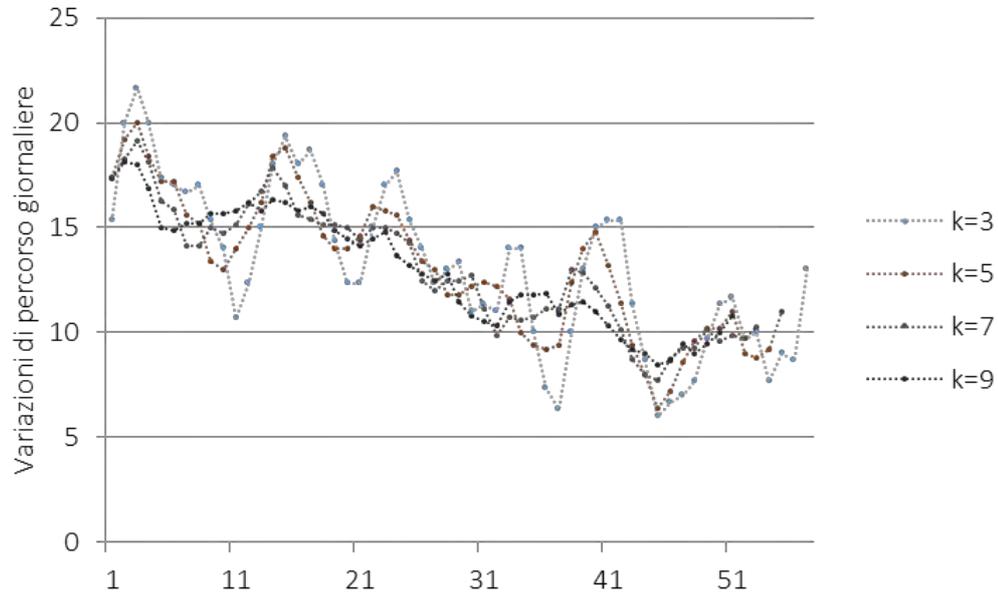


Fig. 11 - Medie mobili della variabile cambiamenti di percorso giornalieri calcolate su intervalli di diverse dimensioni

I risultati del test per differenti periodi ( $k$ ) usati nel calcolo delle medie mobili sono riportati in Tabella 3. Assumendo un livello di significatività del 5%, l'ipotesi nulla di inesistenza di trend viene rigettata per ogni valore di  $k$ . L'indice di correlazione per ranghi di Spearman ( $\rho$ ) è sempre negativo, indicando una tendenza del sistema verso l'equilibrio, con i valori della variabile Cambiamenti di percorso giornalieri che tende, nel lungo periodo, allo zero.

$K$	$N$	$\rho$	$N-2$	$Student's t$	$t_{cr}$
3	57	-0,9271	55	-18,3435	1,67
5	55	-0,7433	53	-8,0900	1,67
7	53	-0,6831	51	-6,6792	1,67
9	51	-0,6827	49	-6,5402	1,68

Tabella 3 - Risultati del test di Daniels sulle medie mobili dei cambiamenti di percorso giornalieri ( $\alpha = 0,05$ )

### **3.3 Modelli di regressione su variabili descrittive delle performance globali di rete e delle performance individuali**

#### *3.3.1 Modello di regressione sulle variabili Deviazione standard dei tempi di percorrenza giornalieri e Numero di cambiamenti giornalieri di percorso*

Nel precedente paragrafo è stata descritta l'evoluzione nel tempo delle variabili che caratterizzano le performance della rete. L'obiettivo di questa sezione dell'elaborato è, invece, di valutare le correlazioni tra tali variabili, mediante la costruzione di modelli di regressione.

La prima relazione che è stata analizzata è quella che intercorre tra la deviazione standard dei tempi di viaggio giornalieri al giorno n-esimo e il numero complessivo di variazioni di percorso alla (n+1)esima ripetizione.

E' stata scelta come variabile la deviazione standard (SD), che fornisce una misura della variabilità dei dati di un campione, offrendo un'indicazione sul grado di oscillazione dei valori rispetto alla loro tendenza centrale. Si è ritenuto lecito, dunque, utilizzare la deviazione standard come indice di distanza dalle condizioni di equilibrio del sistema: nelle iterazioni in cui il divario tra i tempi di percorrenza sui due percorsi alternativi è molto ampio, SD assume dei valori elevati, mentre il suo valore si avvicina a zero quando il sistema è prossimo all'equilibrio (nella configurazione di equilibrio  $SD = 0$  e  $t_C = t_T = 36 \text{ min}$ ).

La regressione mira a valutare gli effetti che valori crescenti della variabilità giornaliera dei tempi di percorrenza hanno sulla numerosità delle variazioni di percorso all'iterazione successiva. La variabile numero di cambiamenti di percorso giornalieri misura a livello macroscopico la reazione del campione alle performance della rete nella ripetizione precedente

dell'esperimento: in una condizione di equilibrio ( $SD=0$ ), in accordo con il primo principio di Wardrop, i cambiamenti di percorso dovrebbero essere assenti, perché gli utenti non sono incentivati a variare il loro percorso con l'obiettivo di ridurre il costo del viaggio.

In Fig. 12 è riportata la regressione lineare ottenuta a partire dal campione da cui è stata rimossa l'osservazione relativa all'iterazione 4, che rappresenta un dato anomalo rispetto al campione dei dati. L'output di regressione è riportato in tabella 4. Il valore del coefficiente di determinazione è relativamente basso, ma il valore della statistica test associata al coefficiente angolare della retta di regressione risulta molto maggiore del valore critico associato ad un livello di significatività  $\alpha = 0.05$  ( $gdl = 58$ ,  $t_{cr} = 1.67$ ).

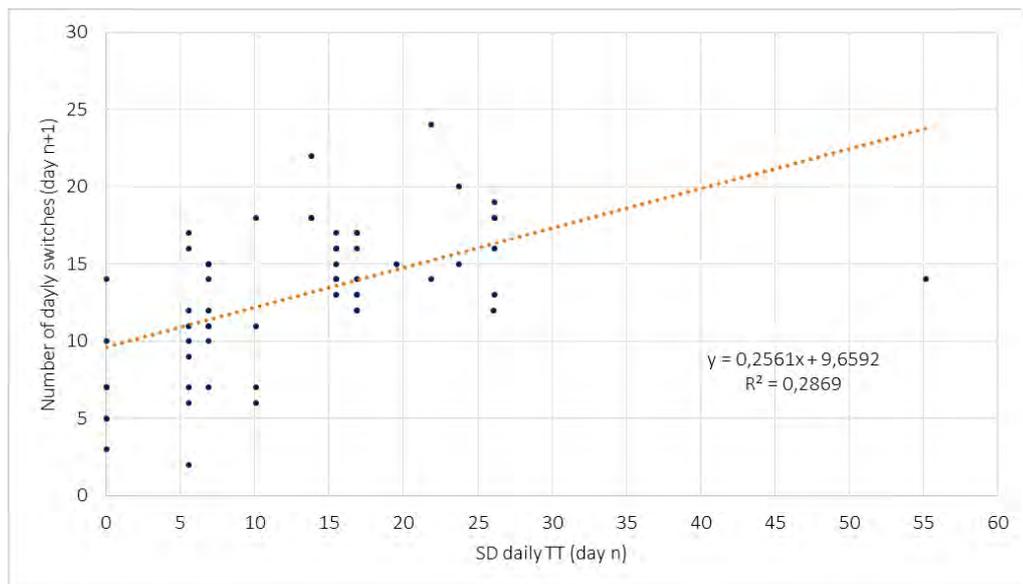


Fig. 12 - Relazione tra la SD del tempo di percorrenza giornaliero (day n) e il numero di cambi di percorso giornalieri (day n+1)

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	9,659	0,873	11,063	0,000
X Variable 1	0,256	0,054	4,746	0,000

Tabella 4 - Output di regressione per il modello lineare riportato in Fig. 12

E' stata poi realizzata un'interpolazione aggiuntiva di tipo polinomiale (grado 2) per valutare eventuali effetti sul coefficiente di determinazione. I risultati sono riportati in Fig. 13. Il valore dell' $R^2$  risulta effettivamente aumentato, e quindi l'equazione polinomiale riportata in figura si rivela più efficace a spiegare la relazione tra le variabili considerate. In Fig. 14 è riportato parte dell'output di regressione ottenuto con il software R, da cui è emersa una elevata significatività di tutti i coefficienti di regressione.

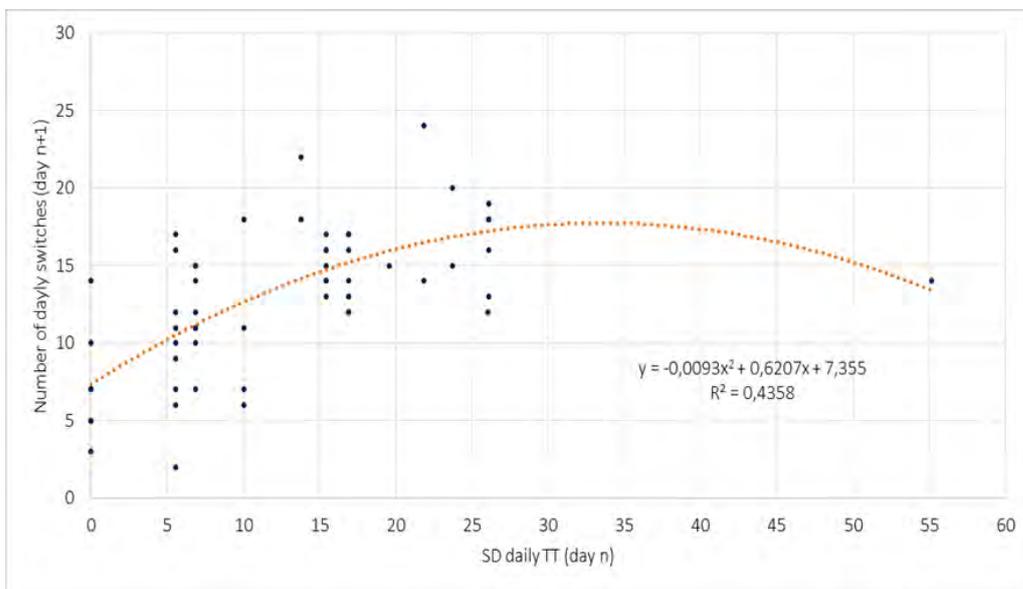


Fig. 13 - Relazione tra la SD del tempo di percorrenza giornaliero (day n) e il numero di cambi di percorso giornalieri (day n+1) [esclusione outlier 4° iterazione]

```

Residuals:
  Min    1Q  Median    3Q   Max
-8.515 -2.197 -0.274  1.803  7.853

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.355106   0.989831   7.431 7.43e-10 ***
SD           0.620736   0.107245   5.788 3.53e-07 ***
I(SD^2)     -0.009270   0.002433  -3.810 0.000352 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Fig. 14 - Output di regressione riferito al modello polinomiale di grado 2 riportato in Fig. 13

Un aumento di poco inferiore del coefficiente di determinazione si ottiene eseguendo una regressione lineare sul campione da cui viene rimosso anche l'outlier costituito dall'osservazione riferita alla ripetizione 43 dell'esperimento. I risultati sono riportati in Fig. 15, e il relativo output di regressione è riportato in Tabella 5. Eliminando questo outlier si ottiene un valore più alto dell' $R^2$ , anche mantenendo una forma lineare per il modello di regressione.

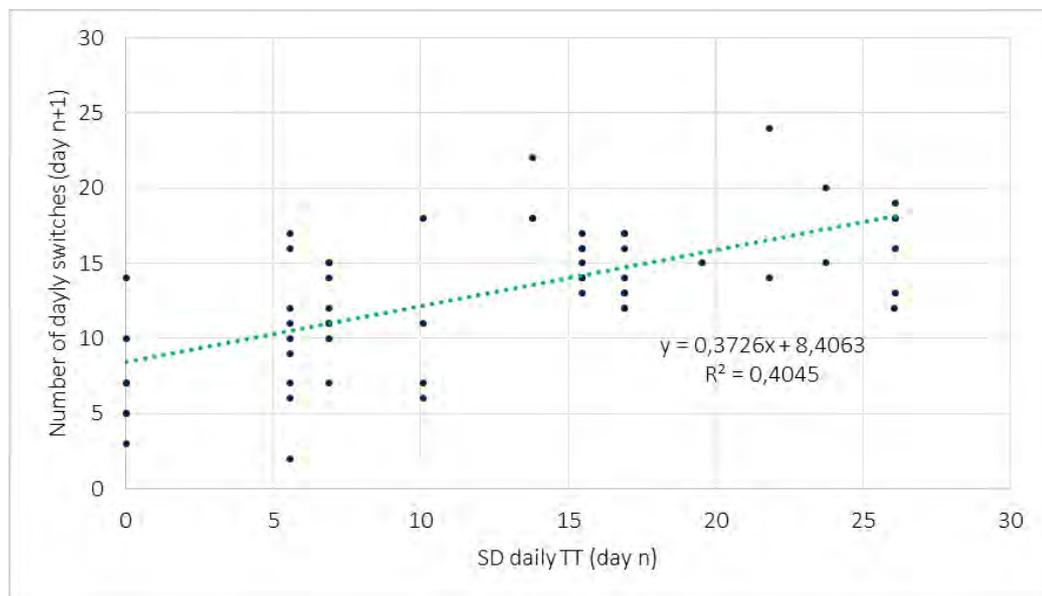


Fig. 15 - Relazione tra la SD del tempo di percorrenza giornaliero (day n) e il numero di cambi di percorso giornalieri (day n+1) [esclusione outlier 4° e 43° iterazione]

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	8,406	0,890	9,449	0,000
X Variable 1	0,373	0,061	6,112	0,000

Tabella 5 - Output di regressione per il modello lineare riportato in Fig. 15

Il modello di regressione in Fig. 15 mostra una relazione lineare e crescente tra la variabile indipendente (deviazione standard del campione costituito dai tempi di percorrenza all'n-esimo giorno) e la variabile dipendente (variazioni di percorso al giorno n+1). La pendenza positiva della

retta di regressione conferma quanto parzialmente ipotizzato all'inizio del paragrafo: un aumento della variabilità in termini di tempi di percorrenza percepita dagli utenti corrisponde ad un aumento dei volumi di variazione di percorso il giorno successivo.

### 3.3.2 *Modello di regressione sulle variabili Numero di cambiamenti di percorso individuali e Tempo medio di percorrenza individuale*

Viene di seguito presentata un'analisi volta a determinare una possibile correlazione tra il numero di cambiamenti di percorso individuali (*Number of Individual Switches*, indicato di seguito con la sigla NIS) e il tempo medio di percorrenza individuale (*Average Individual Travel Time*, di seguito denominato AITT). Tale analisi è stata intrapresa prendendo spunto da diversi lavori presenti in letteratura, in particolare lo studio di Meneguzzer e Olivieri (2013) e quello di Selten et al. (2007), in cui la correlazione tra il numero di cambi di percorso e la performance ottenuta (che a sua volta è in relazione inversa con AITT) risulta sempre negativa.

La regressione presentata nel paragrafo precedente era riferita a variabili descrittive delle performance globali di rete, mentre questa è invece mirata a valutare la relazione tra due variabili che esprimono le performance individuali degli utenti.

Si riporta in Fig. 16 la relazione lineare ottenuta tramite regressione sui dati sperimentali riferiti all'intero periodo di analisi, con l'obiettivo di valutare quanto la variabile NIS incida sulla variabile dipendente (AITT). Il valore del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) è molto basso, e il valore della statistica test associato al coefficiente angolare della retta, confrontato con il valore critico per un livello di significatività  $\alpha = 0.05$  ( $t_{cr} = 1.70$  per una

distribuzione con  $gdl = 31$ ), porta a non poter rifiutare l'ipotesi nulla di non significatività della regressione (vedi Tabella 6).

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	47,823	2,810	17,017	0,000
X Variable 1	0,126	0,105	1,197	0,240

Tabella 6 - Output di regressione per il modello AITT-NIS (day 1-60)

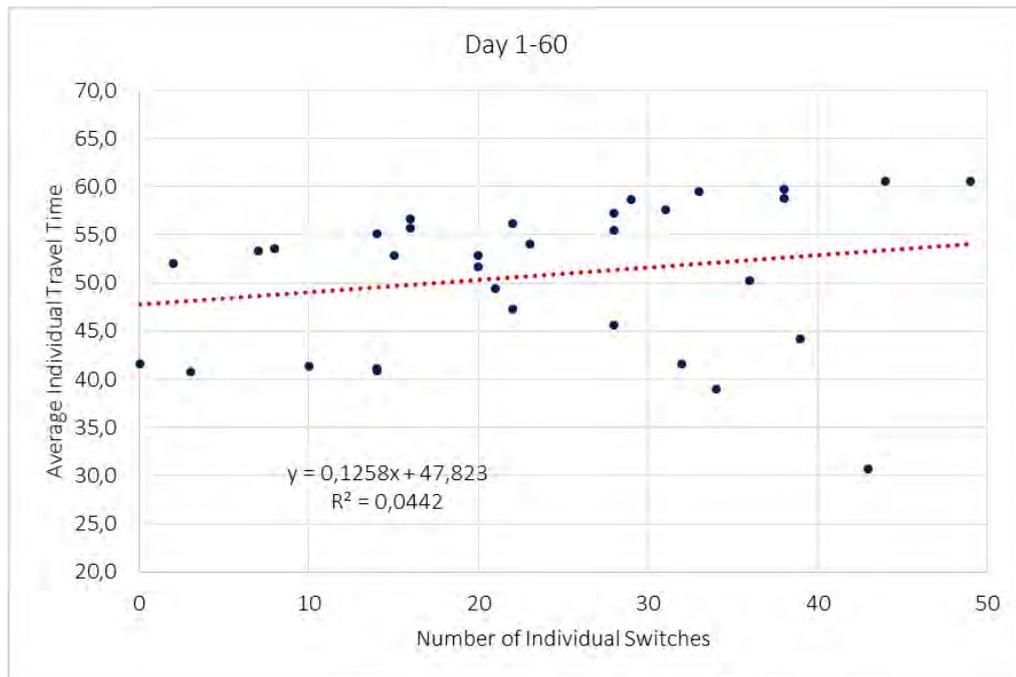


Fig. 16 - Relazione lineare tra AITT e NIS stimata a partire dai dati sperimentali

Il risultato ottenuto porta ad escludere una correlazione tra le variabili considerate: tuttavia, per completezza di analisi si è esaminata la stessa relazione con riferimento alle due fasi dell'esperimento. I risultati ottenuti sono riportati di seguito. Nel primo periodo (*day 1-30*), la correlazione tra le due variabili oggetto di studio (Fig. 17) è debole, ma più marcata rispetto a quella ottenuta con riferimento a tutto il periodo di analisi, infatti il valore del coefficiente di determinazione è leggermente maggiore ( $R^2 = 0.1043$ ). Osservando gli output di regressione (Tabella 7) e in particolare la statistica test associata al coefficiente angolare, risulta che, assumendo un livello di significatività  $\alpha = 0.05$  ( $t_{cr} = 1.70$  per una distribuzione t con  $gdl = 31$ ),

L'ipotesi nulla non possa essere rifiutata in favore dell'ipotesi alternativa: consegue che, per il livello di significatività adottato, la variabile indipendente (NIS) non ha un effetto sulla variabile dipendente AITT. Il *P-value* è, infatti, superiore al livello di significatività assunto, confermando così la debolezza della relazione tra le due variabili. E' stato fatto un tentativo aggiuntivo utilizzando una regressione polinomiale di secondo grado (Fig. 17), ma la ridotta variazione del valore del coefficiente  $R^2$  ha indotto a non approfondire ulteriormente l'analisi.

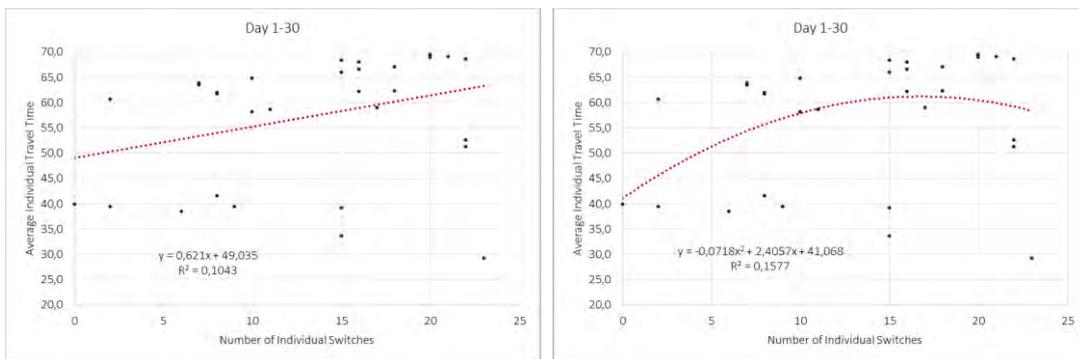


Fig. 17 - Relazione lineare e parabolica tra AITT e NIS (day 1-30)

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	49,035	4,989	9,828	0,000
X Variable 1	0,621	0,327	1,900	0,067

Tabella 7 - Output di regressione per il modello AITT-NIS (day 1-30)

La relazione tra i cambiamenti di percorso giornalieri e le performance individuali, espresse dalla variabile AITT, è invece inesistente nel secondo periodo dell'esperimento (Fig. 18): la regressione, sia lineare che polinomiale, appare assolutamente priva di significatività, con valori dei coefficienti di determinazione praticamente nulli. L'output di regressione riferito all'interpolazione lineare è riportato in Tabella 8 e conferma quanto si evince dall'osservazione diretta dei grafici.

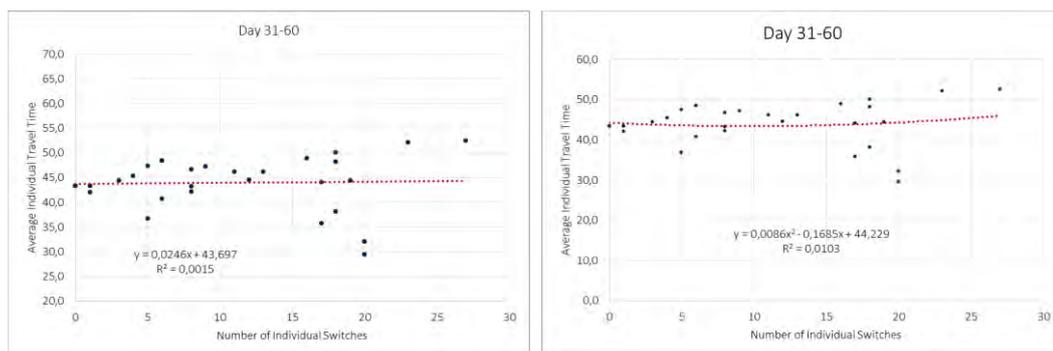


Fig. 18 - Relazione lineare e parabolica tra AITT e NIS (day 31-60)

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	43,697	1,432	30,507	0,000
X Variable 1	0,025	0,115	0,214	0,832

Tabella 8 - Output di regressione per il modello AITT-NIS (day 31-60)

La correlazione tra le due variabili in esame risulta quindi complessivamente non significativa, anche se in modo differente nei due periodi di analisi. Nelle prime trenta ripetizioni il segno della relazione lineare tra le variabili è in linea con quelli presenti in letteratura, ed esprime una, seppur molto debole, relazione crescente tra AITT e NIS: un aumento del numero di cambiamenti non produce un effetto positivo sulla performance individuale, ma al contrario, induce un peggioramento in termini di tempi di percorrenza medi. Queste conclusioni non possono invece essere tratte con riferimento alle successive trenta ripetizioni, in cui il valore assunto dalla variabile NIS non produce apprezzabili effetti in termini di tempo di percorrenza medio individuale.

### 3.4 Effetto delle caratteristiche personali dei partecipanti sulle variabili descrittive delle performance individuali

Diversi articoli in letteratura riportano analisi finalizzate a valutare se le caratteristiche personali del campione influenzino le performance individuali e

il comportamento di scelta di percorso. Ad esempio, nel già citato studio di Meneguzzer e Olivieri (2013) non vengono riscontrate differenze statisticamente significative nelle variabili NIS e AITT confrontando sotto-campioni di utenti suddivisi in base alle caratteristiche personali, ma gli autori suggeriscono che la ragione sia da attribuire alle ridotte dimensioni dei sotto-campioni analizzati. Uno studio di Shiftan et al. (2010), focalizzato sul comportamento di scelta di utenti cui vengono fornite informazioni pre-viaggio, riporta, tra le altre, un'interessante conclusione relativa a differenze di genere nei meccanismi di scelta di percorso, rilevando che gli utenti di sesso maschile rivelano una preferenza per i percorsi più "rischiosi" in termini di variabilità dei tempi di percorrenza. Una conclusione molto simile è riportata nello studio di Knorr et al. (2014), descritto nel Cap. 2: l'avversione al rischio degli utenti di genere femminile si traduce, nell'esperimento condotto dagli autori, in una marcata preferenza per la strada a pedaggio che, pur essendo mediamente più costosa in termini di costo generalizzato di viaggio, assicura una migliore affidabilità in termini di variabilità dei tempi di percorrenza.

Nel presente lavoro sono stati confrontati sotto-campioni di utenti per valutare se le loro performance (esprese dalla variabile Tempo medio individuale di viaggio, AITT) e il loro comportamento di scelta (in parte legato alla variabile Numero di cambiamenti di percorso individuali, NIS) fossero legate a caratteristiche personali.

Il campione è stato diviso in sotto-campioni con riferimento alle caratteristiche personali: le caratteristiche di interesse sono il genere, l'età, il tipo di spostamenti prevalentemente effettuati nella vita reale (pendolari o non pendolari), il tipo di occupazione (lavoratori o studenti) e il numero di chilometri annui mediamente percorsi. In Tabella 9 sono riportati i diversi

sotto-campioni analizzati, insieme ai valori medi delle variabili in esame per ciascun sotto-campione.

	<i>Genere</i>		<i>Età</i>		<i>Pendolari</i>		<i>Lavoratori</i>		<i>Km annui</i>	
	F	M	< 25	≥ 25	NO	SI	NO	SI	≤ 5000	> 5000
Dimensione campione	17	16	16	17	18	15	21	12	19	14
Media NIS	21,71	25,50	21,06	25,88	19,83	28,00	19,95	29,83	20,16	28,14
Media AITT (min)	52,77	48,68	48,46	52,97	47,49	54,74	48,53	54,73	50,06	51,76

*Tabella 9 - Dimensione e valori medi delle variabili NIS e AITT dei sotto-campioni analizzati*

Si è condotta una preliminare analisi volta ad accertare eventuali differenze statisticamente significative tra le medie delle variabili NIS e AITT delle coppie di sotto-campioni attraverso t-Test. Laddove i risultati abbiano fornito evidenza statistica di effettive differenze, si è provveduto ad effettuare regressioni separate rispetto ai sotto-campioni correlando le due variabili.

I risultati dei test sono riportati nelle tabelle da 10 a 14. In accordo con quanto riportato nello studio di Meneguzzo e Olivieri (2013), le variabili in esame non rivelano differenze statisticamente significative in relazione al genere, all'età e ai chilometri mediamente percorsi in un anno (Tabelle 10, 11 e 14). Diversamente, confrontando la coppia di sotto-campioni connessi al tipo di spostamenti prevalentemente effettuati nella vita reale, il valore della statistica test riferito alla variabile AITT porta a rifiutare l'ipotesi nulla di uguaglianza fra le medie dei due sotto-campioni. La stessa considerazione viene fatta riguardo al confronto tra i due sotto-campioni relativi al tipo di occupazione: le medie sia della variabile NIS che della variabile AITT risultano diverse nei due sotto-campioni analizzati.

	Femmine / Maschi	
	<b>A I T T</b>	<b>N I S</b>
<i>t Stat</i>	1,543	-0,842
<i>t critico (due code)</i>	2,052	2,040
<i>P-value</i>	0,135	0,406

*Tabella 10 – Risultati del t-Test per valutare l'effetto del genere sulle variabili NIS e AITT*

	Età ≤ 25 / Età > 25	
	<b>A I T T</b>	<b>N I S</b>
<i>t Stat</i>	-1,723	-1,079
<i>t critico (due code)</i>	2,045	2,040
<i>P-value</i>	0,096	0,289

*Tabella 11 - Risultati del t-Test per valutare l'effetto dell'età sulle variabili NIS e AITT*

	Pendolari / Non pendolari	
	<b>A I T T</b>	<b>N I S</b>
<i>t Stat</i>	-3,062	-1,886
<i>t critico (due code)</i>	2,040	2,042
<i>P-value</i>	0,005	0,069

*Tabella 12 - Risultati del t-Test per valutare l'effetto del tipo di spostamenti prevalentemente effettuati sulle variabili NIS e AITT*

	Studenti / Lavoratori	
	<b>A I T T</b>	<b>N I S</b>
<i>t Stat</i>	-2,514	-2,211
<i>t critico (due code)</i>	2,052	2,074
<i>P-value</i>	0,018	0,038

*Tabella 13 - Risultati del t-Test per valutare l'effetto dell'occupazione sulle variabili NIS e AITT*

	Km annui ≤ 5000 / > 5000	
	<b>A I T T</b>	<b>N I S</b>
<i>t Stat</i>	-0,599	-1,736
<i>t critico (due code)</i>	2,064	2,069
<i>P-value</i>	0,555	0,096

*Tabella 14 - Risultati del t-Test per valutare l'effetto del numero di Km annui mediamente percorsi sulle variabili NIS e AITT*

Analizzando i risultati, emerge che il sotto-campione degli utenti che compiono prevalentemente viaggi di tipo pendolare ha ottenuto delle

performance, in termini di tempo di percorrenza, peggiori rispetto al sotto-campione degli utenti che compiono prevalentemente spostamenti di tipo occasionale: il valore medio della variabile AITT risulta significativamente più alto nel campione dei pendolari. Dal confronto tra i sotto-campioni riferiti al tipo di occupazione (lavoratori o studenti), emergono differenze statisticamente significative sia nelle medie della variabile NIS sia nelle medie della variabile AITT, e le medie di entrambe le variabili sono più alte nel sotto-campione dei lavoratori.

Con l'intento di approfondire ulteriormente questi risultati, sono state svolte delle regressioni per valutare la relazione tra le variabili NIS e AITT, con riferimento si due sotto-gruppi per cui le medie di queste variabili sono risultate significativamente differenti. Le regressioni riferite ai sotto-campioni degli utenti pendolari e non pendolari sono riportate in Fig. 19, mentre quelle riguardanti i sotto-campioni relativi al tipo di occupazione sono riportate in Fig. 20.

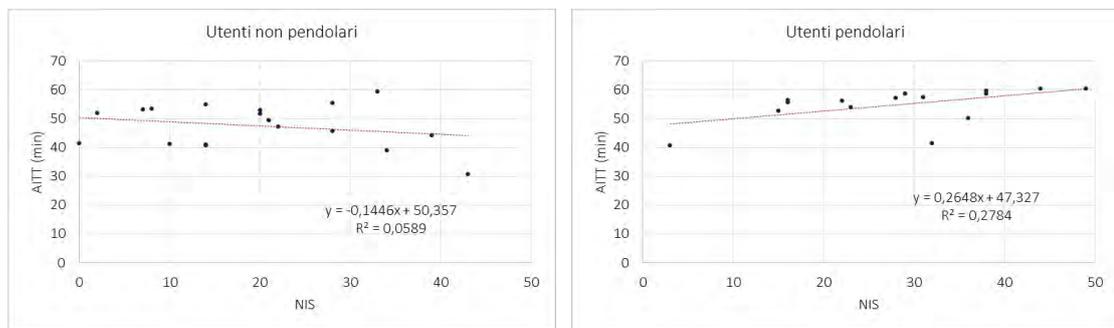


Fig. 19 - Modelli di regressione delle variabili NIS e AITT riferiti ai sotto-campioni catalogati in base alla tipologia di spostamenti prevalenti nella vita reale

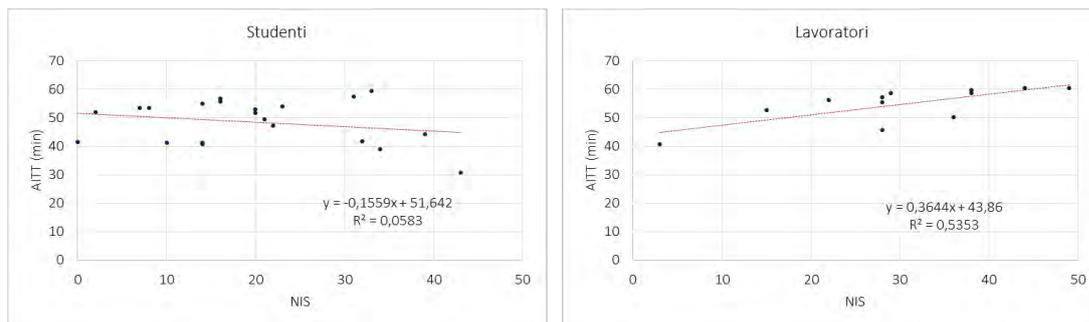


Fig. 20 - Modelli di regressione delle variabili NIS e AITT riferiti ai sotto-campioni catalogati in base all'occupazione

Le regressioni riferite ai sotto-campioni degli utenti non pendolari e degli studenti mostrano andamenti molto simili, e per entrambe il valore del coefficiente di determinazione, molto prossimo allo zero, induce ad affermare che le variabili oggetto di regressione non presentino alcuna correlazione tra loro: il numero di cambiamenti di percorso non influisce sulle performance espresse dal tempo medio individuale di percorrenza totalizzato nel corso dell'esperimento. Similitudini si riscontrano anche nell'andamento della retta di regressione dei modelli riferiti agli utenti pendolari e ai lavoratori: per entrambe la relazione è di tipo crescente, con un aumento dei tempi medi individuali (AITT) al crescere del numero di cambiamenti di percorso effettuati; il coefficiente di determinazione è, però, sensibilmente maggiore nella regressione effettuata sul sotto-campione dei lavoratori. Gli output di regressione per i modelli lineari riferiti ai sotto-campioni dei pendolari e dei lavoratori sono riportati in Tabelle 15 e in Tabella 16. Il valore del *P-Value* associato al coefficiente angolare della retta di regressione del modello riferito al sotto-campione dei lavoratori conferma una elevata significatività della correlazione tra le variabili NIS e AITT, in accordo con il valore piuttosto elevato del coefficiente di determinazione  $R^2$ .

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	47,327	3,598	13,155	0,000
X Variable 1	0,265	0,118	2,239	0,043

*Tabella 15 - Output di regressione riferiti al modello di regressione lineare tra le variabili NIS e AITT per il sotto-campione dei pendolari*

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	43,860	3,456	12,691	0,000
X Variable 1	0,364	0,107	3,394	0,007

*Tabella 16 - Output di regressione riferiti al modello di regressione lineare tra le variabili NIS e AITT per il sotto-campione dei lavoratori*

Il fatto che i sotto-campioni degli studenti e quello dei non pendolari presentino andamenti simili (non significatività della relazione tra le due variabili) e, allo stesso modo, l'andamento delle regressioni sia simile per il campione dei pendolari e per quello dei lavoratori (sia pure con una notevole differenza di  $R^2$ ), è facilmente spiegabile considerando che i sotto-campioni in esame contengono più o meno gli stessi partecipanti, cioè i lavoratori che hanno partecipato all'esperimento sono tutti utenti pendolari, mentre quasi tutti gli studenti partecipanti compiono spostamenti di tipo prevalentemente occasionale nella vita reale.

L'andamento delle regressioni nei sotto-campioni dei pendolari e dei lavoratori presenta un relazione crescente tra le variabili in esame. In diversi studi presenti in letteratura è riportato, con riferimento a tutto il campione, un andamento di tipo crescente tra le variabili NIS e AITT: i sotto-campioni dei pendolari e dei lavoratori presentano quindi un andamento assolutamente in linea con le aspettative, per cui cambiamenti frequenti di percorso aumentano le spese di viaggio complessive, espresse dai tempi medi di percorrenza.

Diversamente, i campioni degli utenti non pendolari e degli studenti mostrano un'assenza di relazione tra le variabili in esame, che risulta in un

andamento praticamente costante della retta di regressione, con un coefficiente angolare prossimo allo zero: la performance in termini di tempo medio individuale (AITT) risulta indipendente dal numero di variazioni di percorso effettuate (NIS).

In un contesto sperimentale di questo tipo, in cui tutti gli utenti vengono provvisti di informazioni di *feedback* complete nella prima fase di analisi, si ipotizza che la frazione del campione composta da utenti lavoratori/pendolari abbia utilizzato con maggiore diffidenza le informazioni, in linea con quanto riportato da diversi studi in letteratura, che affermano che gli utenti pendolari mostrano generalmente una *compliance* minore alle informazioni fornite.

Nel presente lavoro le informazioni non avevano contenuto previsionale, quindi, più che di *compliance*, è corretto parlare di utilizzo dell'informazione *feedback* riferita all'alternativa di percorso non scelta all'iterazione precedente. Dai valori medi della variabile NIS (variazioni di percorso individuali), riportati in Tabella 9 con riferimento a tutti i sottocampioni considerati nell'analisi, emerge che i gruppi di lavoratori e di pendolari hanno cambiato percorso, in media, circa 10 volte in più rispetto ai sotto campioni corrispondenti (studenti e non pendolari).

Si ipotizza che i valori medi della variabile NIS riflettano comportamenti di scelta di percorso differenti: i pendolari/lavoratori hanno tenuto in minor considerazione il *feedback* fornito nella prima metà del periodo di analisi, utilizzando i cambiamenti di percorso come mezzo per approfondire la conoscenza spaziale e prestazionale della rete. Gli studenti/non pendolari, invece, hanno utilizzato le informazioni di *feedback* complete, fornite nel primo periodo di analisi, come mezzo per evitare i percorsi che più probabilmente

avrebbero potuto essere soggetti a congestione nelle iterazioni successive. Questo comportamento di scelta si riflette in valori medi delle variabili NIS e AITT più bassi, ma soprattutto in un modello di regressione tra le stesse che si dimostra non significativo: ad un numero maggiore di cambiamenti non sono associati valori medi del tempo di percorrenza individuale più alti.

Il modello di regressione tra le variabili NIS e AITT per i sotto-campioni dei pendolari e dei lavoratori è invece significativo (o comunque presenta una correlazione più marcata tra le variabili): si segnala che questo andamento è molto simile a quello riportato nel già citato studio di Meneguzzer e Olivieri (2013), costruito in un contesto sperimentale in cui gli utenti non erano provvisti di informazioni *feedback* sulle alternative di percorso non scelte. I sotto-campioni dei pendolari e dei lavoratori hanno fatto un minor affidamento sulle informazioni fornite e hanno effettuato un numero di variazioni di percorso maggiore; le loro scelte risultano in una retta di regressione con andamento paragonabile a quelle determinate in contesti sperimentali in cui le informazioni non venivano fornite, e gli utenti potevano contare su informazioni ricavate dalla sola esperienza personale.

### **3.5 Effetto dei diversi livelli di informazione sulle performance individuali**

#### *3.5.1 Variazioni delle performance individuali nei due periodi di analisi*

Nel paragrafo 3.2 del presente capitolo è stata presentata l'evoluzione, durante l'intero periodo di analisi, di variabili indicatrici delle performance di sistema (flussi, tempo di percorrenza, tempo medio di rete). L'obiettivo era quello di analizzare gli effetti che i differenti trattamenti informativi

(informazioni complete nel primo periodo di analisi e parziali nel secondo), combinati con l'esperienza progressivamente acquisita dagli utenti, hanno avuto sul sistema da un punto di vista macroscopico e globale.

In questa sezione dell'elaborato vengono invece presentate le variazioni degli indicatori di performance individuali durante il periodo di analisi, valutando nel dettaglio come questi mutano nelle due fasi dell'esperimento. In linea con il resto delle analisi svolte, gli indicatori delle performance individuali adottati sono le variabili AITT (Tempo di percorrenza individuale medio) e NIS (Numero di cambiamenti di percorso individuali).

In Tabella 17 sono riportati i valori medi delle variabili prese in considerazione riferiti alle due metà del periodo di analisi. La riduzione della variabile AITT tra la prima e la seconda fase dell'esperimento è del 24%: gli utenti sperimentano, in media, un risparmio di circa 14 minuti negli spostamenti. La variazione della variabile NIS è altrettanto rilevante (-30%): gli utenti hanno cambiato percorso, in media, 4 volte in meno nella seconda fase rispetto alla prima. Questi decrementi nelle variabili individuali si rispecchiano, a livello globale, nel generale miglioramento delle prestazioni di rete nella seconda fase (ad esempio, la media della variabile tempo medio di rete diminuisce, così come i tempi medi di percorrenza su entrambe le alternative di percorso).

	<i>Day 1-30</i>	<i>Day 31-60</i>	<i>Variazione %</i>
<i>Media NIS</i>	13,8	9,7	-30%
<i>Media AITT (min)</i>	57,6	43,9	-24%

*Tabella 17 - Valori medi delle variabili NIS e AITT nei due periodi di analisi e loro variazione percentuale*

Per accertare se le variazioni sopra citate siano statisticamente significative, è stato condotto un t-Test accoppiato per verificare l'ipotesi

alternativa di disuguaglianza tra le medie delle variabili in esame. I risultati, riportati in Tabella 18, portano a rifiutare l'ipotesi nulla per entrambe le variabili.

	Periodo 1-30 / Periodo 31-60	
	AITT	NIS
<i>t Stat</i>	3,543	6,923
<i>t critico (due code)</i>	2,037	2,037
<i>P-value</i>	0,001	0,000

Tabella 18 - Test T accoppiato di confronto tra le variabili NIS e AITT riferite alla prima e alla seconda fase di analisi

Le variazioni ottenute sono dovute alla crescente esperienza acquisita dagli utenti durante l'esperimento, combinata alle informazioni di *feedback*, relative a tutte le alternative di percorso, che essi ricevono nella prima fase, che indubbiamente accelera la conoscenza e la familiarità degli utenti con la rete, e consente un miglioramento delle performance individuali nella seconda fase, in cui l'informazione fornita è parziale.

Ulteriori considerazioni possono essere fatte riguardo alla convenienza di fornire informazioni solo nel primo periodo di analisi. In letteratura diversi autori analizzano la *compliance* degli utenti alle informazioni ricevute da fonti esterne: si cita, ad esempio, uno studio di Bonsall (1992) che analizza l'influenza di un sistema informativo esterno sul comportamento di scelta degli utenti, rilevando che la *compliance* degli utenti dipende, tra gli altri fattori, dalla familiarità dei viaggiatori con la rete. Quanto maggiore è il numero di viaggi in una rete, tanto maggiore è la confidenza degli utenti nelle proprie capacità di scelta e di previsione, e, conseguentemente, l'importanza data alle informazioni ricevute, sia di carattere storico che previsionale, ne risulta fortemente ridimensionata. I risultati ottenuti nel presente lavoro sono in linea con queste considerazioni: evidentemente, l'informazione di *feedback*

completa ricevuta nella prima fase del periodo di analisi ha un impatto molto positivo sul miglioramento delle performance personali. Si demanda a studi futuri una valutazione più precisa sul ruolo della *compliance* alle informazioni, ad esempio eseguendo sperimentazioni in parallelo su campioni diversi, sottoposti a trattamenti informativi differenti, ma continuativi durante l'intero periodo di analisi.

A queste considerazioni si deve aggiungere il fatto che, nel questionario sottoposto al campione alla fine dell'esperimento, il 61% degli utenti ha dichiarato, con riferimento al secondo periodo di analisi, di aver ritenuto sufficiente l'informazione relativa al solo percorso scelto nella ripetizione precedente dell'esperimento: la maggior parte del campione ha quindi ritenuto sufficiente, ai fini di una conoscenza esaustiva della rete e delle sue prestazioni, un trattamento informativo completo limitato soltanto alla prima metà dell'esperimento.

### *3.5.2 Differenza nelle variazioni delle performance individuali in diversi sotto-campioni*

Nella sezione 3.4 del presente capitolo è stato osservato che sussistono differenze statisticamente significative tra sotto-campioni di utenti, suddivisi in base al tipo di spostamento prevalentemente effettuato nella vita reale (pendolari *vs* non pendolari) e al tipo di occupazione (lavoratori *vs* studenti). Con riferimento a queste coppie di sotto-campioni sono state rilevate delle differenze nelle medie, su tutto il periodo di analisi, delle variabili NIS e AITT.

Per questi sotto-gruppi del campione complessivo, suddivisi in base a caratteristiche personali, si è ritenuto interessante valutare l'impatto delle informazioni, analizzando le variazioni delle variabili in esame tra i due periodi di analisi con riferimento al singolo sotto-campione. Le variazioni degli

indicatori nei due periodi di analisi per le coppie di sotto-campioni in esame sono riportati in Tabella 19 e in Tabella 20.

	<i>Non Pendolari</i>			<i>Pendolari</i>		
	Day 1-30	Day 31-60	Var %	Day 1-30	Day 31-60	Var %
<i>Media NIS</i>	9,3	7,9	-14,38%	16,2	11,8	-27,16%
<i>Media AITT (min)</i>	48,9	42,0	-14,07%	63,25	46,23	-26,91%

*Tabella 19 - Valori medi delle variabili NIS e AITT nei due periodi di analisi e loro variazione percentuale, riferite ai sotto-campioni divisi per tipo di spostamenti prevalentemente effettuati nella vita reale*

	<i>Studenti</i>			<i>Lavoratori</i>		
	Day 1-30	Day 31-60	Var %	Day 1-30	Day 31-60	Var %
<i>Media NIS</i>	12,7	7,3	-42,48%	15,9	13,9	-12,57%
<i>Media AITT (min)</i>	48,5	43,2	-11,03%	64,2	45,3	-29,51%

*Tabella 20 - Valori medi delle variabili NIS e AITT nei due periodi di analisi e loro variazione percentuale, riferite ai sotto-campioni divisi per tipo di occupazione*

Confrontando la coppia di sotto-campioni Non pendolari *vs* Pendolari con la coppia Studenti *vs* Lavoratori, emergono dei dati simili, soprattutto con riferimento alla variabile AITT: come si è già accennato precedentemente, il campione dei lavoratori è costituito interamente da utenti che compiono abitualmente spostamenti di tipo pendolare, mentre gli studenti sono quasi tutti utenti occasionali nella realtà. Per snellire l'analisi si preferisce condurre una trattazione dettagliata della sola coppia di sotto-campioni Studenti *vs* Lavoratori (Tabella 20), che si ritiene essere sufficientemente rappresentativa per entrambe.

Il sotto-campione degli studenti presenta valori medi più bassi di quello dei lavoratori: fatto che rientra nelle aspettative, dal momento che anche le medie delle variabili su tutto il periodo di analisi erano più basse. La

variazione percentuale dei cambiamenti di percorso tra le due fasi è molto elevata (-42.48%): il sotto-campione studenti cambia percorso mediamente 5 volte in meno nel secondo periodo. Differentemente, la variazione della variabile AITT è relativamente bassa, il risparmio in termini di tempo di percorrenza individuale medio è di 5.3 minuti.

L'altro sotto-campione (Lavoratori), presenta una variazione bassa del numero di cambiamenti di percorso (2 cambiamenti in meno nel secondo periodo rispetto al primo), mentre il decremento nei tempi di percorrenza è vistoso, con un risparmio di tempo di quasi 19 minuti nel secondo periodo di analisi.

Gli studenti, nella fase in cui ricevono meno informazioni, adottano una strategia più prudente, diminuendo significativamente le variazioni di percorso, e mantenendo comunque delle buone prestazioni in termini di tempi di percorrenza, come confermato dal risparmio nel tempo medio di viaggio individuale. I lavoratori (pendolari) effettuano un numero di variazioni di percorso sempre elevato, se confrontato con l'altro sotto-campione (infatti la variazione della variabile NIS tra il primo e il secondo periodo è bassa), ma conseguono delle prestazioni in termini di risparmio di tempo molto buone. Come già accennato nei precedenti paragrafi, si ipotizza che la bassa predisposizione ad utilizzare, nella prima fase dell'analisi, le informazioni di feedback, da parte degli utenti che eseguono spostamenti reali prevalentemente pendolari, li porti ad ottenere delle prestazioni basse. Quando totalizzano un'esperienza sufficiente, si rivelano in grado di ottenere risultati, in termini assoluti, comparabili a quelli degli utenti (Studenti) che si suppone abbiano utilizzato dall'inizio tutte le informazioni a disposizione. Questo fatto risulta in una sostanziale omogeneità dei tempi di percorrenza medi individuali tra i due sotto-campioni: per entrambi il valore medio nella

seconda fase dell'esperimento supera di poco i 40 minuti, ed è abbastanza vicino al valore del tempo di UE (36 minuti).

Riassumendo, nel lungo periodo i due sottogruppi ottengono risultati simili in termini di performance. Si ipotizza che i migliori risultati conseguiti nel breve periodo dal sotto-campione Studenti siano dovuti ad una maggiore predisposizione ad utilizzare immediatamente le informazioni fornite. Nel medio periodo, le performance del sotto-campione Lavoratori sono relativamente buone, fatto imputabile ad una maggiore esperienza acquisita nel corso dell'esperimento.

Parallelamente all'analisi svolta sul campione nella sua interezza, è stato eseguito un test T accoppiato sulle medie dei valori degli indicatori nelle due metà dell'esperimento. I risultati sono riportati in Tabella 21. I risultati del test T sono tutti significativi e presentano *P-value* molto bassi, con l'eccezione della variabile NIS (variazioni di percorso individuali) del sotto-campione Lavoratori che presenta infatti una variazione percentuale bassa tra il primo e il secondo periodo di analisi.

L'effetto combinato di informazioni ed esperienza accumulata nel corso di viaggi ripetuti in una rete di trasporto si conferma essere proficua nel migliorare le prestazioni individuali, diminuendo i tempi di viaggio sperimentati dagli utenti.

	<i>Studenti (periodo 1 vs periodo 2)</i>		<i>Lavoratori (periodo 1 vs periodo 2)</i>	
	AITT	NIS	AITT	NIS
<i>t Stat</i>	4,142	3,853	7,636	0,985
<i>t critico (due code)</i>	2,086	2,086	2,201	2,201
<i>P-value</i>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	0,346

*Tabella 21 - Test T accoppiato di confronto tra le variabili NIS e AITT riferite alla prima e alla seconda fase di analisi nei sotto-campioni di utenti Studenti e Lavoratori*

### **3.6 Preferenze dichiarate e meccanismi di risposta alle informazioni**

#### *3.6.1 Preferenze dichiarate e preferenze rivelate: influenza sui meccanismi di variazione di percorso*

Nello studio di Shiftan et al., (2011) viene utilizzato un metodo indiretto di stima delle preferenze, assumendo come preferenza degli utenti il percorso scelto nella prima ripetizione dell'esperimento: nel presente lavoro si è preferito condurre un'indagine diretta tramite un questionario somministrato al campione alla fine dell'esperimento, in cui era richiesto di esprimere un'eventuale preferenza per un particolare percorso della rete sperimentale.

Circa il 40% del campione ha dichiarato una preferenza per un percorso della rete. Tra gli utenti che hanno dichiarato una preferenza, il 92% ha asserito di preferire la strada Tangenziale, che presenta una capacità maggiore e che assicura quindi dei ritardi mediamente minori. Per verificare se la preferenza dichiarata è stata rispettata, ossia se effettivamente il percorso è stata preferito al percorso alternativo, è stato stimato, in termini percentuali, quante volte il percorso è stato scelto. E' risultato che chi ha dichiarato una preferenza per un percorso l'ha scelto, in media, nel 79% delle ripetizioni: possiamo quindi asserire che, per la frazione del campione che ha dichiarato una preferenza, le preferenze dichiarate tendono a coincidere con le preferenze rivelate nel corso dell'esperimento.

La restante parte del campione (circa 60%) non ha dichiarato una preferenza. Facendo una stima per ciascun utente delle scelte di percorso tra le due alternative disponibili, in termini percentuali, sono state stimate le preferenze rivelate. La soglia scelta è stata il 60%: chi ha scelto un percorso per

più del 60% delle ripetizioni è stato inserito nel sotto-campione che, pur non avendo dichiarato una preferenza nel questionario, ha di fatto rivelato una preferenza. Sulla totalità del campione, è risultato che il 30% degli utenti ha rivelato una preferenza di percorso, avendolo scelto per più del 60% delle ripetizioni.

La rimanente parte del campione (30%) non ha evidenziato alcuna preferenza per un percorso in particolare. In Tabella 22 sono riportate le percentuali di utenti che hanno dichiarato o rivelato una preferenza, insieme alle percentuali di scelta del percorso preferito; nella tabella è riportato anche il numero medio della variabile NIS (Numero di cambiamenti di percorso individuali) riferito ai sotto-campioni di utenti.

	<i>P. dichiarata</i>	<i>P. rivelata</i>	<i>Nessuna p.</i>
<b>% Utenti</b>	39,4%	30,3%	30,3%
<b>% Scelta</b>	79%	78%	-
<b>Media NIS</b>	15,7	21,2	36,1

*Tabella 22 - Preferenze dichiarate e rivelate: percentuali del campione e percentuali di scelta di percorso*

E' stata verificata tramite test T l'ipotesi nulla di uguaglianza tra le medie della variabile NIS nei sotto-campioni di utenti. I risultati sono riportati in Tabella 23. Quanto emerge dai test T è assolutamente in linea con le aspettative: il numero medio dei cambiamenti di percorso individuali del gruppo che ha dichiarato una preferenza non differisce in modo statisticamente significativo da quello del gruppo che, pur non avendo dichiarato espressamente una preferenza, l'ha rivelata nel corso dell'esperimento. Il test T di confronto delle medie della variabile NIS tra il sotto-campione di utenti che ha dichiarato una preferenza e il sotto-campione che non ha rivelato preferenze risulta invece significativo: il valore della statistica test porta a rifiutare l'ipotesi nulla di uguaglianza delle medie. Il

sotto-campione di utenti che ha dichiarato una preferenza mostra effettivamente una sorta di inerzia nelle scelte di percorso, infatti il valore medio della variabile NIS di questo sotto-campione è meno della metà di quello del sotto-campione che non ha rivelato alcuna preferenza.

	NIS	
	P. dichiarata vs P. rivelata	P. dichiarata vs Nessuna preferenza
<i>t Stat</i>	-1,254	-5,266
<i>t critico (due code)</i>	2,086	2,080
<i>P-value</i>	0,224	<b>0,000</b>

Tabella 23 - Risultati del t Test sulle medie della variabile NIS nei sotto-campioni di utenti divisi in base alle preferenze dichiarate e rivelate

### 3.6.2 Meccanismi di risposta diretti e indiretti: coefficiente di Yule

Di seguito viene presentata un'analisi dei meccanismi di risposta alle informazioni da parte del campione, mirata a studiare il comportamento che gli utenti adottano nella scelta di percorso a seguito delle informazioni di *feedback* che vengono loro fornite. L'analisi trae spunto dal lavoro di Selten et al. (2007), in cui sono state individuate due modalità alternative di risposta: diretta e indiretta.

Le informazioni fornite agli utenti ad ogni ripetizione dell'esperimento, nel presente lavoro, riguardavano i tempi di percorrenza realizzatisi sulle alternative di percorso nell'iterazione precedente: tali informazioni erano complete nella prima fase dell'esperimento (prime trenta ripetizioni), mentre riguardavano solo il percorso scelto all'ultima iterazione nella seconda fase. I tempi di viaggio all'equilibrio sono uguali su entrambi i percorsi disponibili:  $t_C = t_T = 36$  min. Nella presente analisi viene adottato come *payoff* di soglia il tempo di percorrenza di equilibrio: il *payoff* rappresenta l'esito, in termini di tempo di percorrenza, della scelta effettuata dall'utente. Un *payoff* positivo corrisponde ad un tempo di percorrenza, sull'alternativa di percorso scelta,

minore o uguale a 36 minuti, mentre un *payoff* negativo corrisponde ad un tempo maggiore di 36 minuti.

Si classifica come comportamento di scelta diretto, quello attuato dall'utente che, a seguito di un *payoff* positivo, decide di confermare la sua scelta nella successiva ripetizione dell'esperimento, mentre, a seguito di un *payoff* negativo, nella ripetizione successiva cambia percorso. Nel meccanismo di scelta diretto, un cambiamento di percorso è tanto più probabile quanto peggiore è il *payoff*.

Al contrario, un comportamento di scelta indiretto prevede che i cambiamenti di percorso vengano più probabilmente attuati quanto migliore è il *payoff* ottenuto: gli utenti che attuano questa modalità di risposta si aspettano che un *payoff* positivo su un percorso fungerà da attrattore, incentivando, nella ripetizione successiva, la scelta di quel percorso, su cui si formerà più probabilmente congestione.

Per valutare quantitativamente le due modalità di risposta ipotizzate, è stato calcolato, per ciascun utente, il coefficiente Q di Yule (Yule, 1900), definito come segue. In Tabella 23 è indicato il significato dei simboli utilizzati nel calcolo.

$$Q = \frac{c_{-}s_{+} - c_{+}s_{-}}{c_{-}s_{+} + c_{+}s_{-}} \quad (\text{Formula di calcolo del coefficiente Q di Yule})$$

	<i>Change</i>	<i>Stay</i>
Payoff > 36	c-	s-
Payoff ≤ 36	c+	s+

Tabella 24 – Tabella per il calcolo del coefficiente di Yule (Q)

Il coefficiente di Yule varia tra -1 e +1: in questo caso, un coefficiente di Yule elevato riflette una tendenza verso risposte di tipo diretto, mentre valori negativi corrispondono ad un comportamento di tipo indiretto. Nell'esperimento non è stato possibile determinare il coefficiente di Yule relativo a uno dei partecipanti, che non ha mai effettuato variazioni di percorso: il soggetto non è stato dunque considerato nell'analisi di seguito riportata.

Vengono riportate di seguito la media e la deviazione standard dei coefficienti di Yule del campione. Il valore medio, maggiore di zero, fa supporre una prevalenza del meccanismo di risposta diretta.

$$\mu_Q = 0.35$$

$$\sigma_Q = 0.66$$

Un'evidenza più dettagliata riguardo all'importanza di entrambe le modalità di risposta può essere ricavata dalla distribuzione di frequenza del coefficiente di Yule: se i due meccanismi di risposta non sono presenti, ci aspettiamo una distribuzione dei coefficienti di Yule concentrata intorno allo zero.

In Fig. 21 è riportata la distribuzione di frequenza del coefficiente: il numero di soggetti che presenta un coefficiente di Yule inferiore a -0.5 o superiore a +0.5 risulta maggiore rispetto al numero di soggetti con coefficiente compreso nell'intervallo.

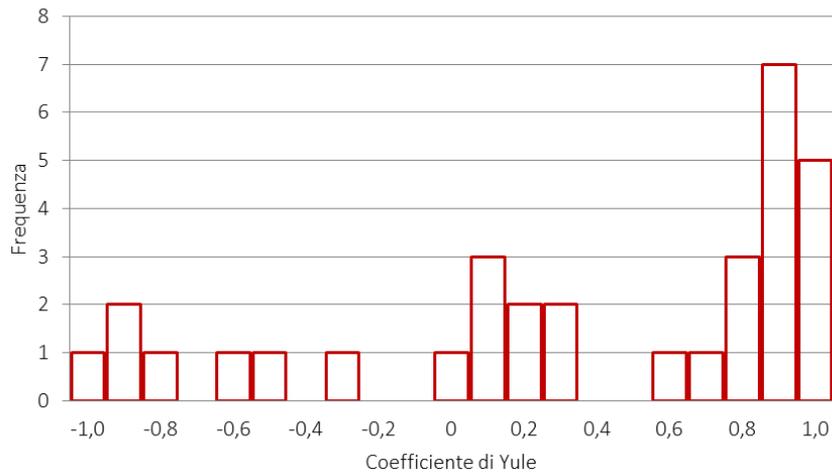


Fig. 21 - Distribuzione di frequenza del coefficiente di Yule nell'esperimento

Classificando i soggetti che presentano un coefficiente di Yule compreso nell'intervallo  $(+0,5; +1]$  come utenti che attuano una modalità di risposta diretta, mentre indicando come risposta indiretta quella degli utenti con coefficiente di Yule compreso nell'intervallo  $[-1; -0,5)$ , si può classificare nel sotto-gruppo di risposta diretta il 53% del campione e nel sotto-gruppo di risposta indiretta il 16% del campione. Solo il 31% del campione rimane quindi escluso da questo tipo di classificazione. La Fig. 22 riporta la suddivisione del campione per classi con riferimento ai valori del coefficiente di Yule.

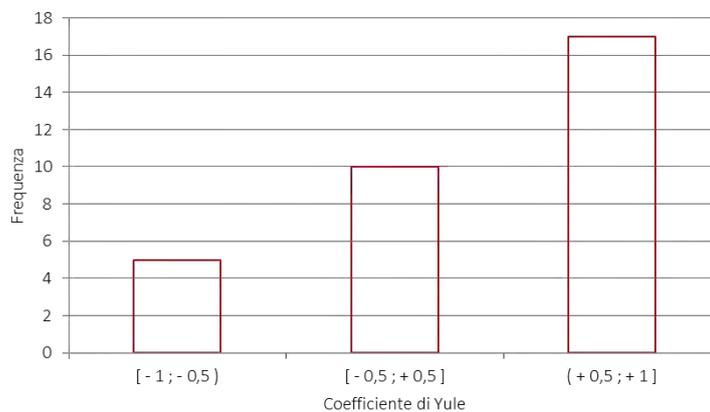


Fig. 22 - Distribuzione di frequenza del coefficiente di Yule per classi

## 4 Conclusioni

Nel presente lavoro è stata sviluppata un'analisi empirica della dinamica inter-periodale di scelta di percorso nelle reti stradali in un contesto in cui gli utenti sono provvisti di diversi livelli di informazioni esterne. Nell'esperimento, 33 utenti hanno attuato scelte di percorso in una rete costituita da due percorsi alternativi, con caratteristiche di capacità differenti, per un periodo di analisi costituito da 60 ripetizioni, che simulano i viaggi di utenti pendolari tra una data origine ed una data destinazione. Nelle prime trenta ripetizioni dell'esperimento gli utenti erano provvisti di informazioni di *feedback* riguardanti i tempi di percorrenza realizzatisi, all'iterazione precedente, su entrambe le alternative di percorso disponibili, mentre nella seconda parte del periodo di analisi sono state fornite a ciascun utente le informazioni riguardanti solamente il tempo di viaggio realizzatosi sul percorso scelto all'iterazione precedente. Al termine dell'esperimento è stato chiesto ai partecipanti di rispondere ad un questionario mirato a raccogliere informazioni riguardanti le caratteristiche personali e indicazioni relative al comportamento di scelta adottato durante l'esperimento.

La prima parte del lavoro è stata volta a valutare se, durante il periodo di analisi, sia stato raggiunto uno stato di equilibrio, analizzando l'evoluzione temporale di variabili descrittive delle performance del sistema. L'evoluzione temporale dei flussi e dei tempi di percorrenza presenta oscillazioni consistenti fino alla fine dell'esperimento, anche se leggermente più smorzate nella seconda metà del periodo di analisi. L'evoluzione temporale della variabile tempo medio di rete, che rappresenta una media dei tempi di percorrenza sui

percorsi disponibili, pesata con i valori dei flussi, mostra un andamento decrescente nel tempo. Va sottolineato che il sistema raggiunge in diversi momenti del periodo di analisi uno stato di equilibrio, caratterizzato dall'eguaglianza dei tempi di percorrenza su entrambi i percorsi, ma tale stato non permane nel tempo. Confrontando i valori medi delle variabili sopra citate, riferiti alle due fasi dell'esperimento, risulta, nella seconda fase, un avvicinamento a valori prossimi all'equilibrio, con una diminuzione significativa del tempo medio di rete. I valori dei flussi e dei tempi di percorrenza, mediati sulla totalità delle ripetizioni (periodi 1-60), si mostrano molto prossimi ai valori di equilibrio. Queste considerazioni portano a supporre un'evoluzione del sistema verso stati di equilibrio, anche se questo, entro il periodo di analisi, permane come stato relativamente stabile solo per pochi intervalli di ripetizioni successive.

In accordo con il principio di Wardrop (1952), si suppone che, in condizioni di equilibrio, non debba essere presente attività di variazione di percorso, perché gli utenti non hanno incentivo a cambiare percorso per migliorare le loro performance in termini di tempo di percorrenza. E' stata quindi considerata la variabile Variazioni di percorso giornaliera, che, pur non raggiungendo valori nulli in nessuna ripetizione dell'esperimento, mostra, nella sua evoluzione temporale, un andamento decrescente. Il trend decrescente è stato confermato dal test di Daniels sulle medie mobili della variabile: i risultati mostrano una tendenza strutturale a diminuire, avvicinandosi alle condizioni di equilibrio.

Alcuni modelli di regressione sono stati costruiti per valutare la correlazione di variabili descrittive sia delle performance globali del sistema sia di quelle individuali degli utenti. La regressione che correla la deviazione standard dei tempi di percorrenza giornalieri con il numero di variazioni di

percorso al giorno successivo mostra una relazione crescente. Un modello lineare si rivela adatto a descrivere la relazione tra le due variabili, con un coefficiente di determinazione sufficientemente elevato, se nell'analisi vengono rimossi i dati relativi a due ripetizioni che costituiscono degli outlier rispetto al resto del campione. La pendenza positiva della retta di regressione conferma le aspettative: ad un aumento della variabilità dei tempi di percorrenza corrispondono volumi crescenti di variazioni di percorso nella ripetizione successiva dell'esperimento.

Un modello di regressione che analizza le performance individuali, correlando la variabile NIS (Numero di cambiamenti di percorso individuali) e la variabile AITT (Tempo medio di percorrenza individuale), è stato costruito sia con riferimento all'intero periodo sperimentale, sia separatamente per le due fasi in cui il contenuto informativo a disposizione degli utenti era differente. Emerge una debole correlazione tra le due variabili nella regressione riferita alle ripetizioni 1-60. La correlazione, insieme al coefficiente di determinazione, si rivela più robusta con riferimento alla prima fase dell'esperimento (ripetizioni 1-30), mentre risulta assente nella seconda fase (ripetizioni 31-60).

Le stesse variabili, relative alle performance individuali, sono state analizzate per valutare l'eventuale influenza di caratteristiche personali sulle prestazioni degli utenti, attraverso dei test T di confronto tra sotto-campioni di utenti. Il genere, l'età e il numero di chilometri annui mediamente percorsi non si rivelano essere caratteristiche che influenzano le performance del campione. Diversamente, il tipo di spostamenti prevalentemente effettuati nella vita reale (pendolari oppure occasionali) e l'occupazione (lavoratori o studenti), rivelano un condizionamento sulle variabili considerate. In particolare gli utenti pendolari e lavoratori rivelano dei valori medi delle variabili NIS e AITT

significativamente superiori rispetto ai corrispondenti sotto-campioni (non pendolari e studenti). Inoltre, pendolari e lavoratori presentano una relazione significativa tra le due variabili, testata tramite regressioni sui singoli campioni, quindi per questi due sotto-campioni un numero elevato di variazioni di percorso individuali risulta effettivamente in performance peggiori.

Un approfondimento dell'effetto dei diversi livelli di informazione sulle prestazioni individuali e sui meccanismi di scelta di percorso attuati dal campione è stato svolto confrontando le medie delle variabili NIS e AITT nelle due differenti fasi dell'esperimento, tramite dei test T accoppiati. I valori medi di entrambe le variabili mostrano diminuzioni consistenti e statisticamente significative tra la prima e la seconda fase: si ipotizza che l'effetto dell'esperienza acquisita dagli utenti nelle ripetizioni dell'esperimento venga accelerato dalla disponibilità di informazioni di *feedback* complete nella prima metà del periodo di analisi.

Il confronto tra i valori medi delle due variabili nelle due metà dell'esperimento è stato approfondito con riferimento ai sotto-campioni degli utenti pendolari e non pendolari e dei lavoratori e degli studenti. Risulta una consistente variazione della variabile AITT, rappresentante le performance individuali, nel sotto-campione dei lavoratori/pendolari; la variazione della variabile è più contenuta nel sotto-campione degli studenti/non pendolari, anche se questi ultimi presentano dei valori medi della variabile più bassi (cioè delle performance migliori) in entrambe le fasi sperimentali. E' stata ipotizzata una possibile spiegazione legata al fatto che, come riportato da diversi autori in letteratura, utenti pendolari rivelano generalmente una *compliance* minore alle informazioni: in questo particolare scenario sperimentale, in cui informazioni di *feedback* complete sono disponibili solo nella prima fase

dell'esperimento, gli utenti non pendolari appaiono più sensibili alle informazioni fornite e quindi in grado di ottenere, già nel primo periodo, performance migliori rispetto a quelle degli utenti pendolari, che migliorano le loro performance (diminuendo i tempi medi di percorrenza individuali) solo nella seconda fase dell'esperimento, quando hanno raggiunto un buon livello di conoscenza delle prestazioni di rete acquisito tramite i ripetuti spostamenti.

L'ultima parte dell'analisi è stata volta a studiare aspetti comportamentali che influenzano i meccanismi inter-periodali di scelta di percorso. Nel questionario sottoposto ai partecipanti alla fine dell'esperimento veniva richiesto di dichiarare eventuali preferenze per un percorso in particolare: è stato condotto un test di confronto tra la media della variabile NIS del sotto-campione che ha dichiarato una preferenza e quella del sotto-campione che non ha rivelato, nel corso dell'esperimento, alcuna preferenza. La differenza tra le medie è risultata essere statisticamente significativa, con un valore medio decisamente inferiore nel primo sotto-campione, che dimostra effettivamente un meccanismo più inerziale nelle scelte di percorso.

Nel campione possono essere individuati due differenti meccanismi di risposta alle informazioni fornite: un meccanismo diretto, per cui una variazione di percorso è tanto più probabile quanto peggiore è il *payoff*, ovvero l'esito, in termini di tempi di percorrenza, della scelta all'iterazione precedente, e un meccanismo indiretto, per cui la variazione di percorso risulta più probabile a seguito di un *payoff* positivo. La presenza di entrambi i meccanismi di risposta è stata confermata costruendo la distribuzione di frequenza del coefficiente di Yule calcolato per tutti i partecipanti. Se il coefficiente assume valori positivi, riflette una tendenza verso meccanismi di risposta di tipo diretto, diversamente, rappresenta un comportamento di tipo

indiretto. Il valore medio del coefficiente sull'intero campione assume un valore positivo, indicando una prevalenza di meccanismi di risposta diretti.

Riassumendo, l'esperimento ha mostrato una tendenza del sistema ad avvicinarsi all'equilibrio, che però non permane come stato stabile, essendo presenti oscillazioni delle variabili descrittive del sistema per tutto il periodo sperimentale. L'esperimento dimostra, in concordanza con la letteratura esistente sull'argomento, che le condizioni di equilibrio non possono essere considerate, a priori, descrittive della dinamica inter-periodale di scelta di percorso.

L'aver provvisto gli utenti di informazioni di *feedback* complete nella prima fase dell'esperimento ha accelerato il processo di conoscenza delle prestazioni della rete, consentendo una distribuzione dei flussi più efficace nella seconda metà dell'esperimento, che è risultata in un valore del tempo medio di rete più basso, con un diradamento dei fenomeni estremi di congestione sui percorsi.

## Bibliografia

Adler J. L., (2001) *“Investigating the learning effects of route guidance and traffic advisories on route choice behavior”*, Transportation Research Part C 9 (2001) 1-14

Ben Elia E., Erev I., Shiftan Y., (2008) *“The combined effect of information and experience on drivers' route-choice behavior”*, Transportation 35 165–177

Bifulco G. N., Simonelli F., (2005) *“I sistemi stradali di trasporto nella società dell'informazione”*, ARACNE editrice S.r.l.

Bonsall P., (1999) *“The influence of route guidance advice on route choice in urban networks”* Transportation 19: 1-23

Iida Y., Uno N., Yamada T., (1994) *“Experimental Analysis Approach to Analyze Dynamic Route Choice Behavior of Driver with Travel Time Information”*, Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings

Iida Y., Akiyama T., Uchida T., (1992) *“Experimental analysis of dynamic route choice behavior”*, Transpn. Res.-B, Vol. 26B, No. 1, pp. 17-32

Knorr F., Chmura T., Schreckenberg M., (2014) *“Route choice in the presence of a toll road: The role of pre-trip information and learning”*, Transportation Research Part F 27 44–55

Mahmassani H. S., Liu Y., (1999) *“Dynamics of commuting decision behaviour under advanced traveller information systems”*, Transportation Research Part C 7 91-107

Meneguzzer C., Olivieri A., (2013) *“Day-to-day traffic dynamics: laboratory-like experiment on route choice and route switching in a simple network with limited feedback information”*, Procedia - Social and Behavioral Sciences 87 44 – 59

Selten R., Chmura T., Pitz T., Kube S., Schreckenberg M., (2007) "*Commuters route choice behaviour*", *Games and Economic Behavior* 58 394–406

Shifan Y., Bekhor S., Albert G., (2011) "*Route choice behaviour with pre-trip travel time information*", *IET Intell. Transp. Syst.*, Vol. 5, Iss. 3, pp. 183–189

Tawfik A. M., Hesham A. R., Miller S. D., (2010) "*Driver Route Choice Behavior: Experiences, Perceptions, and Choices*", 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium