



L'eredità di Carl Adam Petri: dagli automi alla comunicazione

Luca Bernardinello - Felice Cardone - Lucia Pomello


Sommario

L'articolo rivisita i fondamenti concettuali della teoria delle reti di Petri, discutendo tra l'altro il contributo cruciale di Anatol Holt al suo sviluppo. L'esposizione punterà soprattutto su alcuni aspetti che sono stati trascurati ma che, a parere degli autori, mantengono ancora oggi un interesse sia culturale sia pratico. In particolare si discuterà la nozione di "pragmatica formale", e il ruolo del calcolatore come mezzo per la comunicazione organizzata, che deve accompagnarsi, secondo Petri, a una teoria generale del flusso di informazione. Si farà cenno anche alle relazioni fra la teoria petriana delle reti e l'apparato formale assiomatico di alcune teorie fisiche, un tema al quale Petri era particolarmente affezionato.

Abstract

This paper takes a look at the conceptual foundations of Petri's net theory, including the crucial contribution by Anatol Holt to its development. We focus on several aspects which, although neglected in the mainstream of the literature on Petri nets, still bear, in our opinion, a value, both theoretically and in applications. Specifically, we deal with the notion of "formal pragmatics", and with the role of computers as a medium for organized communication, which should, in Petri's view, be paired with a general theory of information flow. A section will be devoted to the relations between Petri's theory and the formal apparatus of physics, a topic to which Petri gave special importance.

Keywords: Petri nets, concurrency theory, automata theory, formal pragmatics, communication, information flow



1. Introduzione

Carl Adam Petri pose le basi della teoria di quelle che oggi chiamiamo “reti di Petri” negli anni '60 del secolo scorso. Alcune delle idee centrali della teoria, prima fra tutte la posizione privilegiata della “concorrenza”, suonavano allora eterodosse, ma sono state poi riscoperte più volte da autori diversi. Gli sviluppi successivi hanno privilegiato soprattutto il lato modellistico e analitico (con notevoli risultati nella messa a punto di strumenti formali di analisi), mentre alcune intuizioni di Petri, di portata più generale, sono state trascurate. Oggi le reti di Petri sono uno strumento familiare per molti informatici e ingegneri, e sono spesso comprese nel curriculum formativo dei relativi corsi di laurea.

Dopo la scomparsa di Petri, nel 2010, diversi testi ne hanno ricostruito la storia personale e scientifica. Einar Smith, che ha collaborato con Petri, ha pubblicato una vera e propria biografia ([1]). Segnaliamo poi [2] per un approccio tradizionale e un panorama complessivo sullo sviluppo della teoria e delle sue applicazioni, [3] per una ricostruzione sintetica ma completa della carriera scientifica di Petri, e [4] per un'interpretazione del suo contributo dal punto di vista epistemologico.

In questo articolo, dopo avere brevemente richiamato i fondamenti e gli elementi principali della teoria, ci concentriamo su un nucleo di temi che, pur non avendo ricevuto grande attenzione, ci sembrano significativi sia sul piano strettamente teorico sia su quello delle applicazioni. La scelta è inevitabilmente parziale e l'articolo non pretende di dare un quadro completo, per il quale rimandiamo ai riferimenti bibliografici.

2. Origini e fondamenti concettuali

Lo sviluppo della teoria delle reti di Petri ha avuto origine dalla tesi di dottorato di Carl Adam Petri [5], in cui vengono messi in luce i limiti del modello classico della computazione rispetto alla sua effettiva realizzabilità in base ai principi della fisica moderna: in particolare l'esistenza di un limite superiore alla velocità di trasmissione dei segnali e alla densità con cui l'informazione può essere memorizzata.

A partire dalla teoria delle reti logiche, nella sua tesi Petri specifica alcuni circuiti combinatori *asincroni*, il cui funzionamento non dipende né dall'esistenza di un *clock* comune per il coordinamento degli elementi (ottenuto mediante esplicita organizzazione della comunicazione tra di essi), né dall'assunzione di uno stato globale: infatti ogni singolo elemento del circuito si trova di volta in volta in un proprio stato locale e può evolvere in maniera in parte indipendente.

Gran parte della dissertazione è dedicata quindi a mostrare come questi circuiti combinatori asincroni possono essere utilizzati per costruire effettivamente qualsiasi macchina di Turing e in particolare anche una macchina di Turing universale, mostrando così come la teoria classica della computazione basata sul modello sincrono (automi sincroni) risulti inclusa in una teoria più generale.

L'obiettivo ultimo è quello di fondare una nuova teoria della comunicazione basata sull'utilizzo dei computer, visti non come semplici strumenti di

elaborazione numerica ma come mezzi generali per “il flusso di informazione strettamente organizzato”. Il titolo della dissertazione, “Kommunikation mit Automaten” (“Comunicazione con gli automi”), volutamente può infatti essere interpretato come comunicazione *con* gli automi o *con l'aiuto* di automi.

Il modello di base della teoria dei sistemi distribuiti asincroni, che è stata così sviluppata, vede fin da subito come ingredienti elementari per la descrizione sia della struttura del sistema che del suo comportamento gli stati locali (o *condizioni*) e le transizioni locali (o *eventi*), interconnessi da una relazione di *flusso*. Quest'ultima specifica per ogni evento quali sono le condizioni che lo causano (o *pre-condizioni*), che sono cioè vere prima che l'evento occorra e che diventano false quando l'evento occorre, e quali le condizioni che sono l'effetto dell'evento (*post-condizioni*), che quindi da false diventano vere all'occorrenza dell'evento.

Stati locali ed eventi sono così due concetti complementari, o meglio duali come Petri stesso afferma, che hanno uguale importanza nella modellazione del sistema. Nei lavori successivi alla dissertazione sono state sviluppate varie notazioni formali, comprese una notazione grafica intuitiva, una formulazione algebrica e una topologica [6-8].

Graficamente un sistema modellato da una rete di Petri è rappresentato da un grafo orientato bipartito, costituito cioè da due tipi di nodi: le condizioni sono rappresentate come cerchi che contengono una marca se la corrispondente condizione è vera, mentre le transizioni locali, o eventi, sono rappresentate da rettangoli connessi da archi orientati alle rispettive pre-condizioni e post-condizioni. Lo stato globale del sistema è definito così dalla collezione di condizioni vere e rappresentato dalla distribuzione di marche nei cerchi relativi. La dinamica del comportamento può essere simulata spostando le marche dalle pre-condizioni delle transizioni abilitate alle loro post-condizioni, dove una transizione è abilitata se le precondizioni sono vere e le post-condizioni false.



Figura 1. Occorrenza di un evento (prima e dopo)

L'estensione di un evento è quindi completamente definita dalle sue pre- e post-condizioni; inoltre se due eventi sono indipendenti, hanno cioè pre- e post-condizioni completamente disgiunte e sono entrambi abilitati, allora possono occorrere in maniera *concorrente*, e ciò a prescindere da qualsiasi scala temporale.

Se invece una post-condizione di un evento è pre-condizione di un altro evento, allora tra i due c'è una relazione di *dipendenza causale*: il secondo evento non può occorrere se non dopo l'occorrenza del primo.

In questo modo l'ordinamento temporale è sostituito dall'ordinamento causale e la possibilità di esecuzione di eventi in qualsiasi ordine è rimpiazzata dalla loro concorrenza, la loro mutua indipendenza causale. La *simultaneità* è possibile solo come sincronizzazione così come nell'applauso in cui la mano destra batte sulla sinistra, che batte simultaneamente sulla destra.

Un altro tipo di relazione tra eventi che Petri analizza già nella sua dissertazione è la relazione di *conflitto*, che si verifica quando due eventi abilitati condividono una pre-condizione ("conflitto in avanti", si veda l'esempio a sinistra della Figura 2). In questo caso l'occorrenza dell'uno disabilita l'altro, ma a priori non è specificato quale evento occorrerà; uno qualunque tra essi potrebbe occorrere e solo dopo tale occorrenza il sistema contiene l'informazione relativa. Per Petri la presenza di un conflitto è dovuta al fatto che la rete in questione è in realtà una sottorete di una rete più grande che contiene le condizioni necessarie a risolvere il conflitto e che ne rappresenta l'ambiente. La soluzione di un conflitto è il risultato di un flusso di informazione dall'ambiente del sistema verso il sistema modellato. Questa interpretazione rispecchia la visione deterministica del mondo che Petri ribadisce fino nei suoi ultimi interventi ed è del tutto in sintonia con alcune linee di ricerca della fisica contemporanea.

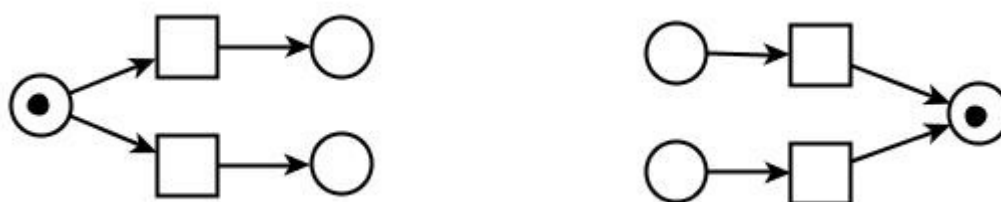


Figura 2. Conflitto in avanti e conflitto all'indietro

Petri esclude non solo la creazione di informazione ma anche la distruzione di informazione. Tale situazione è esemplificata dal "conflitto all'indietro": se due eventi come nell'esempio a destra della Figura 2 condividono una post-condizione e tale post-condizione è vera ciò significa che si è persa l'informazione relativa a quale tra i due eventi era abilitato e la cui occorrenza ha resa vera la post-condizione. In questo caso non vi è reversibilità se non considerando la rete più grande di cui quella in oggetto è sottorete e che contiene l'informazione necessaria.

L'idea di reversibilità della computazione spinse Petri alla ricerca di una teoria della conservazione dell'informazione che esprima una legge analoga alla legge di conservazione dell'energia in fisica (su questo aspetto torneremo nel paragrafo 5).

Un'altra situazione che può verificarsi in un modello basato sulle reti di Petri è la *confusione*, cioè la combinazione di un conflitto tra due eventi con la concorrenza di uno di questi con un altro evento in modo tale che, nel momento in cui i due eventi concorrenti occorrono, non è possibile stabilire oggettivamente se è stato risolto il conflitto e come. La confusione corrisponde quindi a situazioni in cui la causalità e l'indipendenza non possono essere distinte chiaramente.

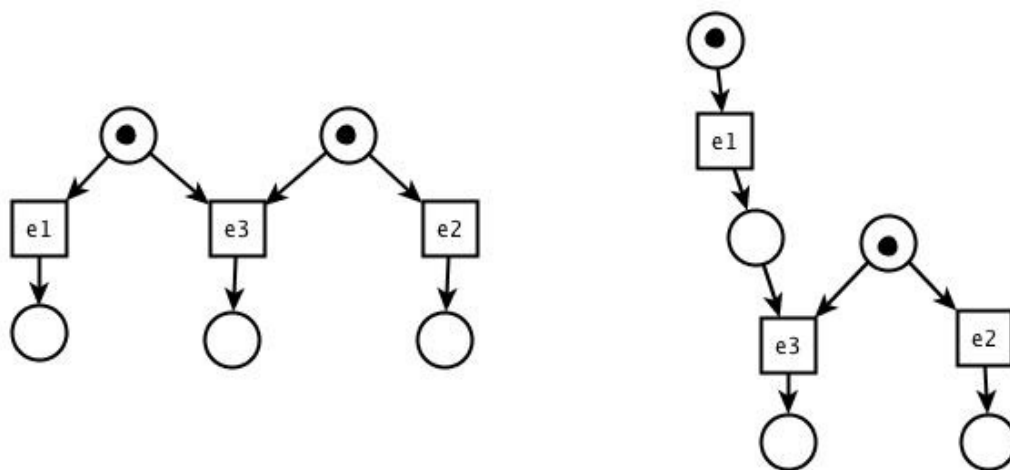


Figura 3. Due casi tipici di confusione

Ad esempio se l'evento e1 nella Figura 3 a sinistra corrisponde all'azione "A va in tram", e3 all'azione "A e B vanno in auto assieme", mentre e2 corrisponde a "B va da solo in auto", nel modello non è specificato chi dei due tra A e B prende la decisione di proseguire da solo forzando l'azione dell'altro. Nel secondo esempio in Figura 3 a destra supponiamo invece che e1 rappresenti l'evento "A diventa disponibile ad andare in auto assieme", allora il fatto che si passi dalla configurazione iniziale attraverso lo scatto concorrente di e1 ed e2 alla situazione in cui A è disponibile e B è partito da solo non consente di stabilire se è stato risolto un conflitto, cioè se B ha deciso di andare da solo e non assieme, oppure se in assenza della disponibilità di A, B ha proseguito da solo perché era la sua unica alternativa possibile.

Le situazioni di confusione modellano in genere interazioni tra componenti in cui le scelte nel comportamento non sono locali e non è quindi chiaramente specificato a quale componente viene attribuita la responsabilità di decisione.

Einar Smith ha mostrato che situazioni di confusione sono spesso inevitabili nei modelli di sistemi reali costituiti da diverse componenti che si sincronizzano, come ad esempio nel caso dell'utilizzo in mutua esclusione di una risorsa condivisa (si vedano [1] e [3] per una discussione intuitiva). A differenza di altri linguaggi per modellare i sistemi concorrenti, le reti di Petri permettono di identificare precisamente e formalmente queste situazioni.

3. La meccanica del coordinamento

L'idea che il coordinamento sia una dimensione fondamentale della vasta gamma di utilizzi di un calcolatore è una caratteristica di quello che si potrebbe considerare il contributo epistemologico delle reti di Petri. È abbastanza frequente trovare riferimenti a problemi relativi al coordinamento fin dai primi lavori di Petri sulle reti. Ma il coordinamento diventa in modo esplicito oggetto principale di studio soltanto nei lavori di Anatol W. Holt, pioniere americano dell'informatica che dalla metà degli anni '60 contribuì allo sviluppo teorico delle reti di Petri ed alla loro diffusione in svariati ambiti applicativi, dalla teoria dei circuiti asincroni alla modellizzazione delle procedure legali (si veda [9] per una panoramica dei contributi di Holt). È proprio Holt che raccoglie il primo frammento dell'eredità di Petri, reinterpretando le reti e utilizzandole nella descrizione delle attività umane organizzate attraverso l'invenzione della *meccanica del coordinamento*. Senza entrare in definizioni formali, possiamo cercare di capire attraverso alcuni esempi di cosa si tratta.

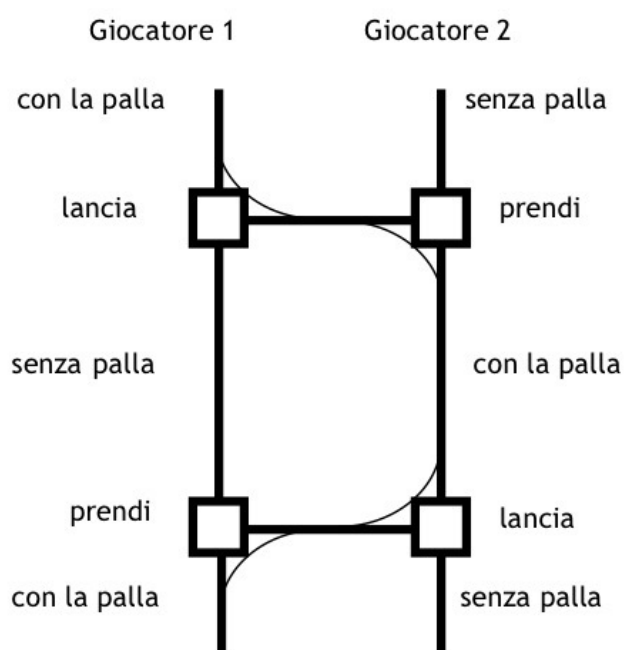


Figura 4. Il gioco della palla: diagramma di ruoli e attività

Immaginiamo due bambini che giocano a lanciarsi una palla: ciascuno di loro, quando è in possesso della palla, la lancia all'altro e poi aspetta, preparandosi a prenderla quando ritorna, lanciata dal compagno. Per quanto semplice, questa attività mette in evidenza alcune caratteristiche universali di situazioni in cui è richiesto il coordinamento tra partecipanti ad una attività organizzata. Per esempio, dal punto di vista strutturale non c'è distinzione tra i due compagni:

abbiamo uno stesso *ruolo* di giocatore che entrambi ricoprono svolgendo le stesse *attività* di lanciare la palla e prenderla, passando attraverso stati intermedi in cui hanno, o no, la palla. La vita dei due giocatori è descritta dallo sviluppo infinito del diagramma in Figura 4, dove la palla è rappresentata dalla linea continua che passa da un giocatore all'altro nelle *interazioni* in cui un giocatore lancia la palla e l'altro la prende.

Una diagramma simile potrebbe anche descrivere la struttura di una conversazione, o di un dibattito, con il relativo alternarsi dei partecipanti nel prendere la parola. Il formalismo grafico è parte della teoria dei diagrammi di ruoli e attività, introdotti da Holt come notazione per un tipo particolare di rete di Petri, e oggi ampiamente utilizzato (si pensi ai diagrammi di sequenza di UML).

Consideriamo ora l'attività organizzata eseguita da un impiegato che deve separare moduli di due colori, rosa e azzurro: i moduli sono posti in due pile separate, quelli azzurri a sinistra e quelli rosa a destra [10]. Lo smistamento dei moduli si svolge secondo regole (modulo azzurro a sinistra, modulo rosa a destra) che ne costituiscono l'aspetto meccanico. Tuttavia, è parte della nozione di attività organizzata il fatto che sia eseguita da *attori* umani da cui traggono origine gli interessi e le responsabilità delle azioni coinvolte. Le macchine, in quanto tali, non possono eseguire azioni perché non se ne possono assumere la responsabilità. Questo esempio, apparentemente banale, se considerato dal punto di vista della meccanica del coordinamento ne esemplifica alcuni degli ingredienti fondamentali.

In primo luogo, l'attività coinvolge entità di due specie: i moduli (con lo spazio che questi occupano), e le azioni che vengono eseguite sui moduli. Mentre i primi sono *corpi*, entità che occupano spazio, le seconde sono *operazioni*, entità che prendono tempo. Questa è l'interpretazione degli elementi di una rete di Petri che sta alla base della teoria del coordinamento, introdotta da Holt come disciplina scientifica di un nuovo tipo, che possa essere assunta come fondamento degli utilizzi del *computer* quale dispositivo per il coordinamento di azioni all'interno di attività organizzate.

La natura dello spazio e del tempo considerati in questo specifico contesto, e più in generale nel contesto di qualsiasi attività organizzata, è del tutto diversa da quella dello spazio e del tempo della fisica: si parla, appunto, di *spazio* (e *tempo*) *organizzativo*. Nel caso di un ufficio, lo spazio organizzativo non è immediatamente riducibile al volume della stanza che lo ospita, ma consiste di quegli elementi spaziali che hanno pertinenza con le attività svolte nell'ufficio: le scrivanie, i cassetti, gli armadi, ma anche i corridoi e i passaggi tra aree diverse della stanza, che probabilmente corrispondono ad attività tra le quali occasionalmente possono manifestarsi interazioni. È l'attività organizzata nel suo complesso che determina la topologia dello spazio organizzativo, in funzione della connessione tra le varie sottoattività secondo il principio generale che attività che interagiscono debbano essere fisicamente vicine, cioè topologicamente connesse. Questa interpretazione operativa della connessione topologica, e più in generale l'idea che l'architettura del luogo in cui si svolge un'attività organizzata debba avere una relazione stretta con la

struttura di quell'attività, è un tema ricorrente del lavoro di Holt, il quale parlava a volte dei *computer* come di "edifici elettronici".

Nell'esempio delle pile di moduli, descriviamo l'attività dell'impiegato con una rete di Petri che mostra l'azione di smistamento dei moduli di colori diversi in zone distinte dello spazio organizzativo:

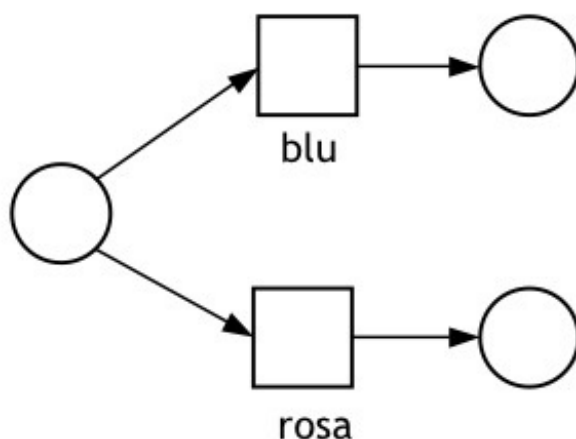


Figura 5. Decidere dove mettere i moduli

Questo spazio organizzativo è articolato da una linea di divisione immaginaria (cioè, non fisica ma organizzativa) tra la pila dei moduli azzurri, quella dei moduli rosa e la pila originale dalla quale provengono i moduli da ordinare. Le azioni dell'impiegato trasformano lo *stato* dei moduli, identificato con la loro posizione nello spazio organizzativo (a sinistra/a destra).

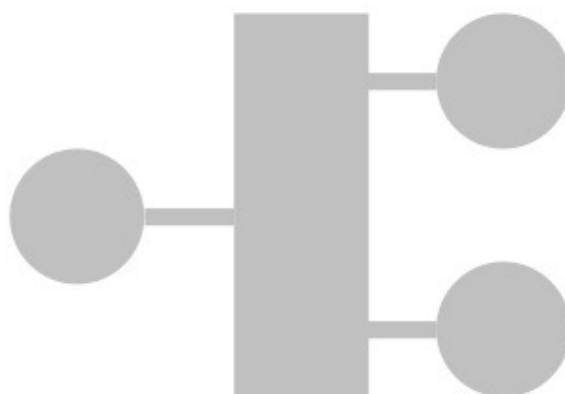


Figura 6. Connessione tra luoghi dello spazio organizzativo

Possiamo ora sovrapporre le due reti per esprimere in modo visuale la relazione tra i due aspetti, spaziale e temporale, dell'attività di smistamento dei moduli. Il confine tra gli spazi entro i quali l'attività si svolge, associati alle tre pile, coincide con una decisione dell'impiegato, determinata dal colore del modulo:

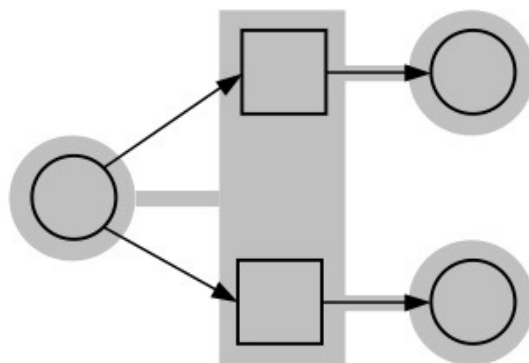


Figura 7. Spazio e tempo nell'attività dell'impiegato

Nei primi anni '70 Petri si era accorto che la sovrapposizione di reti come quella che abbiamo appena utilizzato corrisponde all'esistenza di una funzione continua rispetto ad una topologia che può essere definita su ogni rete di Petri, e che di fatto caratterizza le reti (non orientate) come spazi topologici (si veda [11]). Si possono così utilizzare le trasformazioni continue tra reti di Petri per formalizzare le relazioni tra viste di un processo o di un sistema a diversi livelli di astrazione, o tra un processo ciclico ed il suo sviluppo infinito nel tempo.

Complichiamo ora la situazione immaginando di avere una "catena di montaggio" in cui i moduli entrano, vengono sottoposti all'esame dell'impiegato che li separa in base al colore, e attraversano una serie di uffici successivi fino ad arrivare ad un ufficio dove vengono reimmessi in un'unica pila. Tuttavia, si richiede che un modulo non possa essere ricevuto da un ufficio se questo non ha ancora inoltrato il modulo ricevuto prima di quello. La rappresentazione di un particolare stato di questa attività è data dalla rete di Petri della Figura 8, dove un modulo rosa (r) è pronto per essere trasferito dal primo al secondo ufficio della catena, che è libero (l), mentre il terzo ufficio è occupato con l'elaborazione di un modulo azzurro (a), ed un nuovo modulo sta aspettando (n) di entrare nella catena. È importante che ogni trasferimento di un modulo da un ufficio al successivo sia autorizzato dal verificarsi di una precondizione che esprime che l'ufficio successivo è libero, come (l), in modo che un ufficio non si trovi ad elaborare più di un modulo per volta: a questo servono gli archi rivolti in senso opposto al flusso dei moduli. Si tratta di uno schema di coordinamento che è caratteristico della *bucket brigade* vista in molte scene di film *western*, ma anche del controllo di una *pipeline* (che trasporta bit, qui rappresentati dai moduli azzurri e rosa) che non richiede il controllo del ritmo di trasmissione da parte di un orologio centralizzato, ma che procede in modo del tutto asincrono ([12]).

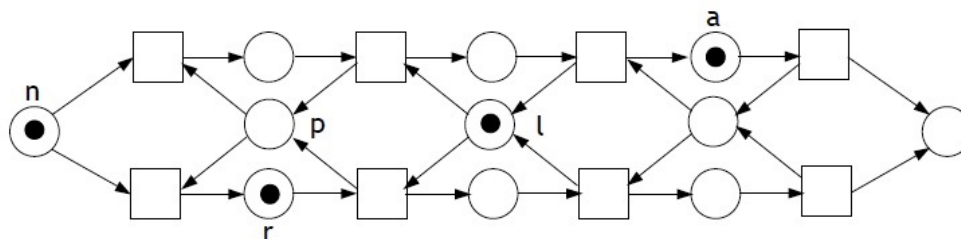


Figura 8. La storia dei moduli

La meccanica del coordinamento di Holt nasce dall'intuizione che questi esempi rappresentino situazioni universali in cui la composizione di regole semplici, espresse in modo formale attraverso reti di Petri o formalismi da esse derivate, dà luogo a fenomeni di coordinamento che possono essere studiati attraverso questi formalismi.

4. Discipline della comunicazione e pragmatica formale

La comunicazione è essa stessa una particolare attività organizzata, che richiede un elevato livello di coordinamento. Pensiamo ad esempio alla disperata ricerca di Lucia da parte di Renzo nella Milano colpita dalla peste, descritta in alcune delle pagine più celebri de *I Promessi Sposi*. E se Renzo e Lucia avessero avuto entrambi un cellulare? D'altra parte, quante nuove trame sono possibili con le attuali possibilità di comunicazione? Dai segnali di fumo degli indiani dei film *western* ai *gadget* delle vicende di spionaggio, la possibilità di avere l'informazione a disposizione quando e dove questa serve ha giocato un ruolo fondamentale nel definire la forma delle attività umane organizzate.

Le regole che sono alla base degli atti comunicativi permettendo che questi vadano a buon fine dovrebbero essere alla base della progettazione degli strumenti informatici di comunicazione. Ma esiste veramente una teoria della comunicazione che prenda in considerazione questi aspetti? Molti dei contributi di Petri e Holt possono essere interpretati come sforzi verso l'obiettivo di far venire alla luce questa teoria in aggiunta alla più classica teoria matematica della comunicazione.

Infatti quest'ultima, attraverso i risultati di Nyquist, Hartley e specialmente di Shannon, è una teoria dell'efficienza della trasmissione di segnali su un canale disturbato. Il problema di "riprodurre in modo esatto o approssimativo in un punto un segnale scelto in un altro punto" [13] si basa su un'idea di comunicazione che è soddisfacente dal punto di vista fisico, ma che non fornisce alcun aiuto sistematico a capire gli aspetti essenziali dell'uso del *computer* per la comunicazione nel contesto delle attività umane organizzate. Dal punto di vista di queste ultime, le domande rilevanti riguardano piuttosto *chi* produce l'informazione, *quando*, *dove*, e *che cosa* l'informazione rappresenta. Serve allora una nuova metafora della comunicazione su cui basare la costruzione di una teoria in cui queste domande trovino una naturale collocazione.

Questa teoria considera il *computer* come macchina per la comunicazione (Holt) ed in particolare come mezzo per l'organizzazione del flusso

dell'informazione (Petri). Quali sono gli aspetti rilevanti dell'informazione in questo contesto? L'informazione è una *risorsa*, più precisamente “quel tipo di risorsa che è utilizzata per risolvere i conflitti” ([7], p. 9). Riprendendo l'esempio dei moduli, nella Figura 8 la condizione n determina un conflitto la cui soluzione (da parte dell'impiegato) introduce nel sistema nuova informazione che corrisponde alla scelta: modulo azzurro vs modulo rosa. Questa è la concezione dell'informazione utilizzata da Holt e Commoner [14], e da Petri [15], come *risorsa*, cioè come qualcosa di cui ci possa essere scarsità.

L'informazione come risorsa è alla base di una concezione del processo comunicativo alternativa a quella classica. L'informazione diventa parte di un processo di natura economica di produzione, scambio e consumo con aspetti che il modello della teoria dell'informazione classica non riesce a prendere in considerazione. Per esempio, poiché una risorsa è sempre da qualche parte, l'informazione può essere presente in un sistema ma può non essere posseduta dall'attore che ne ha bisogno. Una parte importante nella progettazione di attività organizzate consiste proprio nel fare in modo da portare l'informazione nella parte del sistema in cui serve e nel momento in cui è necessario disporre (“Parlando astrattamente, la limitazione artificiale e ben strutturata delle risorse è uno dei principali modi per stabilire un'organizzazione — forse l'unico” [7, p. 10]). Questo aspetto di località dell'informazione entra in gioco anche quando si deve fare in modo che l'informazione resti nascosta ad altre parti del sistema, come in una vicenda di spionaggio. In questo contesto sono significative le limitazioni sulla riproducibilità dei segnali, la possibilità di copiarli e di condividerli. L'accessibilità di una risorsa varia con il tempo. Così l'informazione può diventare obsoleta o essere rimpiazzata da una sua versione aggiornata. Per questo, in alcuni casi le risorse sono immagazzinate, ma quando lo sono, si rende anche necessaria una forma di manutenzione. Come in un grande magazzino le merci sono classificate sia per inventariarle che per trovarle più facilmente, così classifichiamo l'informazione per renderla più facilmente reperibile. Queste sono solo alcune delle osservazioni suggerite dalla concezione dell'informazione sviluppata nell'ambito della teoria dell'attività organizzata di Holt ([10]).

Seguendo l'idea della comunicazione come scambio di risorse, diventa naturale disciplinare gli atti comunicativi considerandone l'analogia con le transazioni economiche, dando così origine ad una economia ed una giurisprudenza generalizzate che potrebbero essere considerate la base per l'elenco, suggerito da Petri [15], delle *Discipline della Comunicazione*, “discipline di una scienza della comunicazione che deve ancora essere creata e discipline nel senso di un insieme di regole che devono essere seguite perché la comunicazione abbia successo”.

Poiché la comunicazione si basa sul linguaggio, è utile ricordare che lo studio generale dei segni, noto come *semiotica*, ha tradizionalmente accettato la distinzione, formulata dal filosofo Charles Morris, di tre aspetti di un linguaggio in senso semiotico, cioè un sistema di segni e convenzioni per il loro utilizzo negli atti comunicativi. La *sintassi* è l'aspetto relativo alle regole di combinazione dei segni del linguaggio nella produzione di testi significativi. La *semantica* riguarda il significato delle combinazioni sintatticamente ammissibili di segni e

delle relazioni di sinonimia che tra esse si instaurano. Infine, la *pragmatica* si occupa dei fenomeni relativi all'utilizzo dei testi, in quanto veicoli di significato nel contesto di concrete situazioni comunicative.

Le discipline della comunicazione suggerite da Petri si collocano nell'ambito di una *pragmatica formale*: la comunicazione in un contesto organizzativo prende sempre la forma di trasmissione di *documenti*, intesi come testi dotati di uno stato pragmatico all'interno di un sistema di persone che interpretano ruoli che fanno parte della struttura dell'organizzazione.

Petri ha elencato dodici discipline della comunicazione, basandosi su esempi concreti di problemi che possono essere classificati come difetti di comunicazione. Così, per esempio, abbiamo discipline per *copiare* e *cancellare* i documenti coinvolti nell'atto comunicativo: un esempio che motiva la necessità di queste discipline è il cambiamento di valore pragmatico tra una banconota e una sua copia. Un altro genere di fenomeni è oggetto delle discipline dell'*identificazione*, *indirizzamento* e dell'*assegnazione di nomi*, rilevanti in particolare in ambiti organizzativi basati su *computer*, in cui la facilità di proliferazione dei dati rende indispensabile disporre di metodi sistematici per associare ad essi degli identificatori unici. Analogamente, Petri elenca discipline di *sincronizzazione*, *composizione*, *modellazione*, *autorizzazione*, *valutazione*, *delegazione* e *riorganizzazione*.

Le indicazioni date da Petri in merito allo sviluppo di queste discipline sono purtroppo estremamente frammentarie e costituiscono a nostro parere un importante aspetto dell'eredità di Petri, che ha già ispirato alcune realizzazioni concrete ([16]). È proprio a partire da uno sviluppo sistematico di questo ramo della *pragmatica formale* che potrà prendere le mosse una teoria (e forse anche un'etica) dei processi informativi adeguata al ruolo essenziale che al loro interno il *computer* gioca attualmente, e continuerà a giocare in misura sempre crescente.

5. I modelli combinatori fra discreto e continuo

Finora ci siamo occupati prevalentemente di quella che Petri ha chiamato "teoria speciale delle reti", cioè dell'impiego delle reti per modellare un singolo sistema, a un livello di astrazione specifico. Ma Petri ha sempre coltivato l'ambizione di costruire una teoria generale, nella quale ci si possa spostare, usando strumenti matematici rigorosi, fra diversi livelli di astrazione e di descrizione.

Nella concezione petriana di una tale teoria generale dei sistemi (e delle sue applicazioni) la relazione di concorrenza fra gli elementi di un modello ha un ruolo fondamentale. Questa circostanza ha spinto Petri a tentare un'assiomatizzazione nella quale l'unico concetto primitivo sia proprio quella relazione. La tesi di fondo è che questa relazione, tra fenomeni fisici elementari opportunamente scelti, possa servire da base concettuale per una teoria dei processi e dei sistemi, e che la teoria corrispondente sia lo strumento per giungere a soluzioni corrette e realizzabili dei problemi tipici nei sistemi distribuiti ([17]).

Petri segue qui una via affine alle assiomatizzazioni classiche della geometria, come quella di Hilbert: gli assiomi sono puramente formali (anche se,

naturalmente, sono scelti in vista di una interpretazione privilegiata). In partenza, abbiamo quindi un insieme di elementi dotato di una relazione binaria, che viene chiamata *concorrenza*.

L'assunto di base è che la relazione binaria di concorrenza sia riflessiva e simmetrica ma, in generale, non transitiva: il fatto che A sia concorrente con B e B sia concorrente con C non esclude che A e C siano in relazione di dipendenza causale. Le relazioni di questo tipo sono spesso chiamate relazioni di *similarità*, e appaiono in diverse discipline, fra le quali la teoria dell'utilità ([18]), nella quale è rilevante la relazione di *preferenza*, che si suppone sia applicata da un individuo nel compiere certe scelte, e l'associata relazione di *indifferenza*. Già dagli anni '50 si era osservato che questa relazione non è transitiva, come si potrebbe ingenuamente ritenere; si tratta quindi di una similarità, nel senso indicato sopra.

Le reti, così come presentate nei paragrafi precedenti, saranno derivate come modelli privilegiati della teoria. Più esattamente, i postulati scelti da Petri selezionano una classe ristretta di reti, che devono servire da fondamento per i livelli successivi di modellazione, secondo uno schema a strati, discusso in [17], che riassumiamo nel seguito.

L'idea di *stratificazione* è ben radicata nell'informatica: dall'*hardware* al *software* di sistema, fino a quello applicativo, è comune presentare una scala di strati, ognuno dei quali si appoggia sui "servizi" forniti dallo strato sottostante. Nel suo sforzo di fondare una teoria generale dei sistemi e dei processi, che si possa in particolare applicare all'informatica e alla computazione, Petri propone di incastrare i livelli tradizionali in una scala più ampia, della quale le reti costituiscono lo strumento matematico centrale.

Al gradino più basso della scala stanno gli assiomi della concorrenza; i modelli "naturali" della teoria sono le reti di occorrenze, cioè reti acicliche di stati locali (o condizioni) e eventi locali, che rappresentano processi concorrenti nel loro svolgersi nel tempo (simili al modello di scambio della palla illustrato in Figura 4). Queste reti sono, in linea di principio, infinite, ma si possono "ripiegare" su sé stesse per ottenere modelli finiti dei sistemi in grado di generare quei processi. Si ottengono in questo modo le classiche reti finite di cui abbiamo parlato in precedenza. Il loro impiego come specificazioni di sistemi, *software* e *hardware*, ne costituisce la principale applicazione. A un livello di astrazione ancora più alto, gli elementi di una rete si interpretano come *agenzie* e *canali*, *interessi* e *restrizioni*, entrando nel campo della pragmatica formale, discusso nel paragrafo precedente.

Il passaggio da un livello a quello successivo della gerarchia deve poggiare, secondo Petri, su una nozione di *omomorfismo*, cioè di corrispondenza definita formalmente tra elementi delle reti di livelli contigui.

Petri ha sempre sottolineato il ruolo che la fisica dovrebbe svolgere nello sviluppo formale e concettuale della sua teoria delle reti, e in generale, di ogni teoria dei processi e del flusso di informazione. Questo ruolo è duplice: da una parte, ogni processo si compie nella realtà fisica, e deve quindi sottostare ai vincoli determinati dalle leggi fisiche (la velocità di un segnale non può superare

quella della luce, la densità di immagazzinamento delle informazioni non può crescere indefinitamente); dall'altra le teorie fisiche, specialmente nella loro veste formalizzata, costituiscono un paradigma al quale ispirarsi.

La scelta degli assiomi citata sopra mette in particolare evidenza il debito di Petri verso certe presentazioni della fisica teorica; il riferimento forse più evidente, del resto esplicitamente riconosciuto già dalla sua tesi di dottorato, è quello a Rudolf Carnap e alla sua formalizzazione logica dello spaziotempo relativistico, ma per certi aspetti più interessante ci sembra l'idea secondo la quale un processo di computazione debba risultare *reversibile*; a questo proposito, osserviamo che l'adozione di componenti asincroni e reversibili nella progettazione di circuiti e dispositivi di calcolo è oggi considerata come una delle soluzioni ai problemi di efficienza energetica della computazione (si veda ad esempio [12]).

Nelle relazioni tra fisica e computazione emerge un tema che ha suscitato l'interesse di diversi autori: la relazione fra continuo e discreto. Petri avanza una proposta: una teoria combinatoria, discreta nella sostanza, ma nella quale introduce elementi propri del continuo, secondo una linea concettuale che possiamo far risalire a Henri Poincaré. In *La science et l'hypothèse*, Poincaré definisce un *continuum* come un sistema d'elementi sul quale è definita una relazione binaria di *indistinguibilità*, e tale che si possa, partendo da un elemento qualsiasi, raggiungere ogni altro elemento attraverso una serie di elementi intermedi, a due a due indistinguibili. Sostituendo la relazione di indistinguibilità con quella di concorrenza, otteniamo uno degli assiomi posti da Petri a fondamento della sua teoria.

L'idea di un modello discreto dei fenomeni fisici è stata indagata da diversi autori, con scopi e metodi diversi. Al momento, il tentativo più avanzato sembra quello basato sugli automi cellulari, su cui esiste una vasta letteratura, e in particolare l'ambizioso e controverso progetto portato avanti da Stephen Wolfram. Altri approcci sono stati proposti da Konrad Zuse (Calculating Space), che per un breve periodo collaborò con Petri, e da William Fredkin (Digital Philosophy, su cui vedi anche [19]).

Conclusioni

Ci sembra che l'eredità di Petri possa essere cercata in tre direzioni principali. In primo luogo c'è un lascito concettuale ormai ampiamente consolidato: il superamento del modello tradizionale di automa sequenziale. Le nozioni di stato locale e di trasformazione locale di stato fanno parte infatti del bagaglio di strumenti essenziali a chi oggi progetta, realizza, analizza sistemi distribuiti, anche se non utilizza il formalismo delle reti di Petri.

Accanto a ciò, in questo articolo abbiamo cercato di portare alla luce quella parte di eredità che non è stata ancora (pienamente) raccolta, e che si sostanzia nell'idea di una pragmatica formale e di una serie di discipline della comunicazione, fondate sull'intuizione che i «calcolatori» sono principalmente uno strumento per la comunicazione.

Infine, e ad un livello molto più generale, c'è il contributo epistemologico dell'opera di Petri, che si esprime nella sua concezione dei modelli nella scienza

e nella tecnica. In questo articolo non abbiamo trattato questo aspetto, il cui studio è iniziato solo di recente. Si veda a questo proposito [4]. Riteniamo che le reti di Petri con i loro sviluppi teorici siano solo una delle manifestazioni della ricchezza di questa concezione.

Bibliografia

- [1] Smith, Einar (2015). Carl Adam Petri. Life and Science, Springer.
- [2] Silva, Manuel (2013). "Half a century after Carl Adam Petri's Ph.D. thesis: A perspective on the field", *Annual Reviews in Control*, 37, 191-219.
- [3] Smith, Einar (2014). "Petri and how he saw the world", *Software & Systems Modeling*, 14 (2), 727-733.
- [4] De Michelis, Giorgio (2015). "The contribution of Carl Adam Petri to our understanding of 'computing'", HaPoC 2015: 3rd International Conference on the History and Philosophy of Computing, Pisa, ottobre 2015.
- [5] Petri, Carl Adam (1962). *Kommunikation mit Automaten*, Dissertation, Schriften des IIM 2, Rheinisch-Westfälisches Institut für Instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn (trad. ing. *Communication with Automata*, Technical report RADC-TR-65-377, Volume I, Final Report, Supplement I).
- [6] Petri, Carl Adam (1973). "Concepts of Net Theory", *Proc. of the Symposium and Summer School on Mathematical Foundations of Computer Science*, Strbské Pleso, High Tatras, Czechoslovakia, September 3-8, 1973, Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, 137-146.
- [7] Petri, C. A. (1980). "Introduction to General Net Theory", in W. Brauer (a cura di) *Net Theory and Applications*, Proc. of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, Hamburg, 1979, volume 84 di Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 1-19.
- [8] Genrich, H. J., Lautenbach, K., Thiagarajan P. S. (1980). "Elements of General Net Theory", in W. Brauer (a cura di) *Net Theory and Applications*, Proc. of the Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems, Hamburg, 1979, volume 84 di Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 21-163.
- [9] Cardone, F. (2015) "Computers and the mechanics of communication. Outline of a Vision from the Work of Petri and Holt", in Beckmann, Arnold et al. (a cura di), *Evolving computability. 11th conference on computability in Europe, CiE 2015, Bucharest, Romania, June 29 – July 3, 2015*, volume 9136 di Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 3-12.
- [10] Holt, Anatol W. (1997). *Organized Activity and its Support by Computer*, Kluwer.
- [11] Petri, C. A. (2001). "Mathematical aspects of net theory", *Soft Computing*, 5, 146-151.
- [12] Sutherland, Ivan E., Ebergen, Jo (2002). "Computers Without Clocks", *Scientific American*, 287(2), 62-69.
- [13] Shannon, C. E. (1948). "A mathematical theory of communication", *The Bell System Technical Journal*, 27, 379-423.

- [14] Holt, A. W., Commoner, F. (1970). "Events and conditions" in J. B. Dennis, (a cura di), *Record of the Project MAC conference on concurrent systems and parallel computation*, ACM, New York, NY, USA, 3-52.
- [15] Petri, C. A. (1977). "Communication disciplines" in B. Shaw, (a cura di), *Computing System Design*, University of Newcastle upon Tyne, 171-183.
- [16] De Cindio, F., De Michelis, G., Simone, C. (1987). "The communication disciplines of CHAOS", in Voss, K., Genrich, H. J., Rozenberg, G. (a cura di), *Concurrency and nets: advances in Petri nets*, Springer-Verlag, 115-139.
- [17] Petri, C. A. (1979). "Concurrency as a Basis of Systems Thinking", *Proc. of the 5th Scandinavian Logic Symposium*, 143-162.
- [18] Luce, R. D. (1956). "Semiordeers and a Theory of Utility Discrimination", *Econometrica*, vol. 24 n. 2 (Apr. 1956), pp 178-191.
- [19] Longo, G. O., Vaccaro, A. (2014). "La Nascita della Filosofia Digitale", *Mondo Digitale*, Anno XIII, n. 52, 1-19.

Biografie

Lucia Pomello, laureata in Matematica, ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Informatica nel 1988. È professore associato di Informatica presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca. L'attività di ricerca è prevalentemente nell'ambito dell'informatica teorica e riguarda i modelli formali per il disegno, l'analisi e la sintesi di sistemi concorrenti e distribuiti. Dal 2004 fa parte del 'Petri Nets Steering Committee' e dal 2008 dell'Editorial Board della rivista *ToPNoC: Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency*, Springer.

Email: lucia.pomello@unimib.it

Felice Cardone, laureato in Filosofia nel 1983, ha conseguito il Dottorato in Informatica nel 1990. Attualmente è professore associato presso il Dipartimento di Informatica dell'Università di Torino dopo avere insegnato nelle Università di Milano e di Milano-Bicocca. I suoi interessi scientifici si concentrano sui fondamenti dell'informatica, sia nei loro aspetti logici che in quelli storici e filosofici. È membro del consiglio direttivo dell'AILA, Associazione Italiana di Logica e Applicazioni.

Email: felice.cardone@unito.it

Luca Bernardinello si è laureato in Scienze dell'informazione presso l'Università degli studi di Milano nel 1986, e ha conseguito il dottorato di ricerca in Informatica presso l'Université de Rennes I. Dal 2001 è ricercatore presso il Dipartimento di informatica dell'Università degli studi di Milano-Bicocca. Si occupa dei fondamenti della teoria della concorrenza e di modelli formali di sistemi concorrenti.

Email: luca.bernardinello@unimib.it