

Controllo di sistemi manifatturieri riconfigurabili

Davide Bossi, Emanuele Carpanzano, Vincenzo Cattaneo Della Volta, Dawn Tilbury

Si illustra una metodologia di progettazione modulare del controllo logico per Sistemi Manifatturieri Riconfigurabili basata sulle Reti di Petri. Il metodo presentato garantisce la raggiungibilità, la limitatezza, la vivezza, e la reversibilità delle Reti di Petri definite. Inoltre sono introdotte delle regole per implementare le funzioni logiche di controllo ottenute tramite il linguaggio grafico dei Diagrammi Funzionali Sequenziali, compreso nello standard Iec 61131. Le diverse fasi della metodologia proposta sono presentate con riferimento ad esempi illustrativi ed applicativi.

Parole Chiave

Metodologia di Progettazione,
Controllo Logico, Reti di Petri.

Oggi giorno le aziende devono affrontare frequenti ed imprevedibili cambiamenti del mercato dovuti alla continua variazione della domanda. Quindi, per rimanere competitive, esse devono dotarsi di sistemi di produzione innovativi che sono in grado di rispondere adeguatamente a tali cambiamenti, quali i Sistemi Manifatturieri Riconfigurabili (indicati con l'acronimo Rms, derivante dall'inglese Reconfigurable Manufacturing Systems) [1]. In particolare, sistemi di controllo affidabili e flessibili costituiscono un elemento fondamentale per ridurre i costi ed i tempi necessari per progettare e realizzare un nuovo sistema produttivo o per modificarne uno già esistente [2]. In tale contesto, è di estrema importanza la definizione di metodologie di sviluppo che supportino la progettazione strutturata e la verifica del sistema di controllo e supervisione di un Rms [3,4]. Essendo i controllori logici modellabili tramite sistemi ad eventi discreti, le Reti di Petri (indicate nel seguito con l'acronimo PN, dall'inglese Petri Nets) sono considerate uno strumento appropriato per l'analisi del loro comportamento dinamico [1,5]. Il formalismo matematico delle PN, caratterizzato da una notazione grafica costituita da posti, transizioni, archi orientati e gettoni, è adatto per la modellazione di sistemi concorrenti, asincroni, distribuiti, e paralleli [6]. Nell'approccio proposto viene utilizzata la teoria delle Reti di Petri Ordinarie al fine di garantire importanti proprietà formali della soluzione di controllo logico progettata [7].

La soluzione progettata tramite l'ausilio delle PN è successivamente implementata tramite un linguaggio di programmazione standard per i controllori logici programmabili (Plc, Programmable Logic Controllers): il diagramma funzionale

sequenziale (Sfc, Sequential Function Chart) [8,9]. In particolare, sono introdotte semplici regole di traduzione per passare da PN ad Sfc. L'Sfc è un linguaggio grafico derivante direttamente dal formalismo delle Reti di Petri, e basato anche esso su posti e transizioni [10]. Nello specifico l'Sfc è uno dei linguaggi definiti dallo standard Iec 61131 parte 3°, che definisce cinque linguaggi di programmazione per i Plc industriali [11]. Un approccio simile è stato presentato in [7,9] con riferimento al controllo logico di linee manifatturiere dedicate, mentre nel presente lavoro si considerano sistemi riconfigurabili. Nel seguito, dapprima sono introdotti gli elementi essenziali relativi ai formalismi adottati (nel prossimo paragrafo). Poi, è illustrata la metodologia di progettazione proposta con riferimento ad un esempio illustrativo. Nel penultimo paragrafo si discute l'applicazione della tecnica presentata ad un impianto manifatturiero innovativo per la produzione di calzature. Infine, si traggono le conclusioni sui problemi ancora aperti e sugli sviluppi futuri del lavoro.

Formalismi adottati: Reti di Petri e Sfc

Le Reti di Petri sono uno strumento ben conosciuto per l'analisi e la modellazione di sistemi ad eventi discreti caratterizzati da fenomeni concorrenti ed asincroni. Una Rete di Petri è definita come una 5-tupla: $PN = (P, T, F, W, M_0)$ dove:

$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$	è un insieme finito di posti;
$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$	è un insieme finito di transizioni;
$F = (P \times T) \cup (T \times P)$	è un insieme di archi orientati (relazione di flusso);
$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$	è una funzione di peso;
$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$	è la marcatura iniziale;
$P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$.	

Una Rete di Petri $PN = (P, T, F, W)$ senza una marcatura iniziale specifica è denotata da PN , mentre una Rete di Petri con una marcatura iniziale nota M_0 si indica con (PN, M_0) . La correttezza di algoritmi di controllo logico modellati tramite

D. Bossi, E. Carpanzano, V. Cattaneo Della Volta, Ingegneri e Ricercatori presso l'Istituto di tecnologie Industriali e Automazione; Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano; D. Tilbury Professoressa presso Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Usa

Reti di Petri può essere studiata verificando se, per le reti considerate, valgono le proprietà di Raggiungibilità, Sicurezza, Vivezza e Reversibilità. Tali proprietà ed i loro significati sono descritti nel seguito [6-9].

Raggiungibilità. Una marcatura M_n si dice *raggiungibile* da una marcatura M_0 se esiste una sequenza di scatti che porta da M_0 a M_n . La Raggiungibilità è una proprietà che dipende dalla marcatura iniziale. Un aspetto importante nella progettazione del controllo logico per un impianto manifatturiero è di stabilire se esso può raggiungere uno specifico stato o meno, per questo motivo la proprietà di raggiungibilità risulta essere di interesse per una tale applicazione.

Limitatezza. Durante l'evoluzione di una Rete di Petri ogni posto può contenere uno o più gettoni. Una Rete di Petri (PN, M_0) è detta *k-limitata* o semplicemente *limitata* se il numero di gettoni in ogni posto non eccede le k unità per ogni marcatura raggiungibile da M_0 : $M(p) \leq k$ per ogni posto p ed ogni marcatura $M \in R(M_0)$. Per $k=1$ una Rete di Petri è detta binaria. Quando un sistema di controllo è modellato per mezzo di una Rete di Petri, la limitatezza garantisce ad esempio che non ci sono tentativi di richiedere l'esecuzione di operazioni già in corso.

Vivezza. Una Rete di Petri (PN, M_0) è detta essere *viva* (o equivalentemente M_0 è detta essere una *marcatura viva* per PN) se, indipendentemente dalla marcatura iniziale M_0 , è possibile attivare tutte le transizioni della rete procedendo attraverso una successione di scatti. Questo significa che una Rete di Petri viva garantisce l'assenza di *blocchi critici* indipendentemente dalla sequenza di scatti operata. Questa proprietà garantisce che tutte le transizioni possono scattare e che tutti gli stati del sistema di controllo logico modellato dalla rete, rappresentati dai posti, possono essere raggiunti.

Reversibilità. Una Rete di Petri (PN, M_0) è detta reversibile se, per ogni marcatura M in $R(M_0)$, M_0 è raggiungibile da M . Dunque, in una rete di Petri reversibile è sempre possibile tornare allo stato iniziale. Quando si descrive un sistema di controllo logico la reversibilità implica che il sistema è caratterizzato da un comportamento ciclico, ed esegue le sue funzioni ripetutamente. Inoltre la reversibilità garantisce la possibilità di ricovero allo stato iniziale da ogni stato del sistema. Il formalismo degli Sfc, in passato conosciuto come Grafcet, è stato definito partendo dalle Reti Petri, e presenta quindi notevoli aspetti comuni ad esse [10]. In particolare, un Sfc può essere definito formalmente come un a 4-tupla $Sfc = (S, T, F, M_0)$, dove:

- $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}$ è un insieme finito di passi;
- $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ è un insieme finito di transizioni;
- $F = (S \times T) \cup (T \times S)$ sono gli insiemi delle connessioni tra passi e transizioni e viceversa;
- $M_0: S \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ è la marcatura iniziale;
- $S \cap T = \emptyset$ e $S \cup T \neq \emptyset$.

A causa delle similitudini tra Reti di Petri e Sfc le proprietà di *Raggiungibilità*, *Vivezza* e *Reversibilità* possono essere applicate direttamente al formalismo Sfc. Per la *Limitatezza*, che indica che in una Rete di Petri il numero di gettoni in ogni posto non deve superare un valore prefissato k , si ha che essa può essere assunta come sempre verificata in un Sfc. Infatti,

in un Sfc ogni passo può essere solo attivo (contiene un gettone) o inattivo (nessun gettone), cioè si ha uno stato Booleano associato al passo (vero/falso, on/off, 1/0), per cui qualsiasi Sfc è limitato, in particolare binario, per definizione.

Metodologia di progettazione modulare del controllo logico

Per progettare il controllo logico di un Rms si propone un approccio modulare e distribuito. La modularità consente di ridurre la complessità dell'intero problema di progettazione suddividendolo in sotto-problemi più facilmente trattabili [2,9]. I differenti moduli funzionali del controllo sono inoltre distribuiti secondo precise relazioni gerarchiche sui differenti componenti software e hardware del sistema di controllo. Un tale approccio semplifica la progettazione e facilita il ri-uso e la ri-configurabilità delle soluzioni di controllo sviluppate [3,12]. In particolare, secondo l'approccio proposto, il codice di controllo logico è strutturato su tre livelli gerarchici: siste-

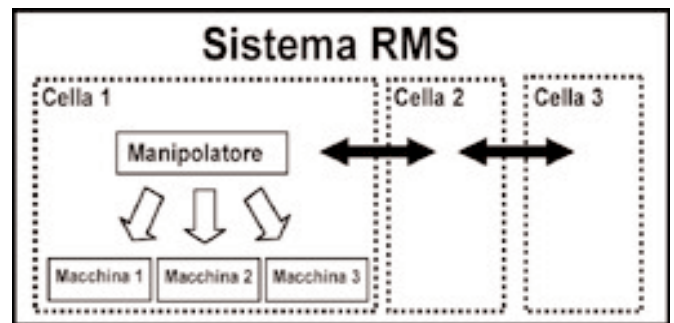


Figura 1 - Struttura gerarchica del controllo logico di un Rms

ma, cella e macchina (Figura 1). Il livello di controllo sistema è composto dall'aggregazione di più moduli di controllo cella conformemente al layout del sistema. Il modulo di controllo cella è costituito a sua volta dall'aggregazione di più moduli di controllo macchina. Nello specifico le celle sono composte sia da macchine di lavorazione che da macchine dedicate al trasporto e alla movimentazione delle parti (ad esempio: nastri trasportatori, tavole rotanti, manipolatori).

La metodologia di sviluppo proposta segue un approccio di tipo bottom-up: prima sono definite le Reti di Petri che descrivono il controllo logico delle singole macchine; poi, sono definite le Reti di Petri dei sistemi di controllo delle celle aggregando appropriatamente le Reti di Petri delle macchine che compongono la cella; infine, è definita la rete di Petri che descrive il controllo logico dell'intero sistema aggregando le reti di tutte le celle. Tutte le Reti di Petri vengono progettate in modo tale da garantire che le proprietà formali di raggiungibilità, vivezza, limitatezza e reversibilità siano soddisfatte, come illustrato nel seguito. I passi della metodologia presentata sono descritti in dettaglio nel seguito con riferimento ad un sistema di produzione costituito da due celle manifatturiere identiche, ognuna composta da due stazioni di lavorazione (A e B) ed un manipolatore, connesse tra loro da nastri trasportatori (Figura 2). Per ogni cella il ciclo di lavoro è il seguente: quando arriva un semilavorato nuovo sul nastro trasportatore

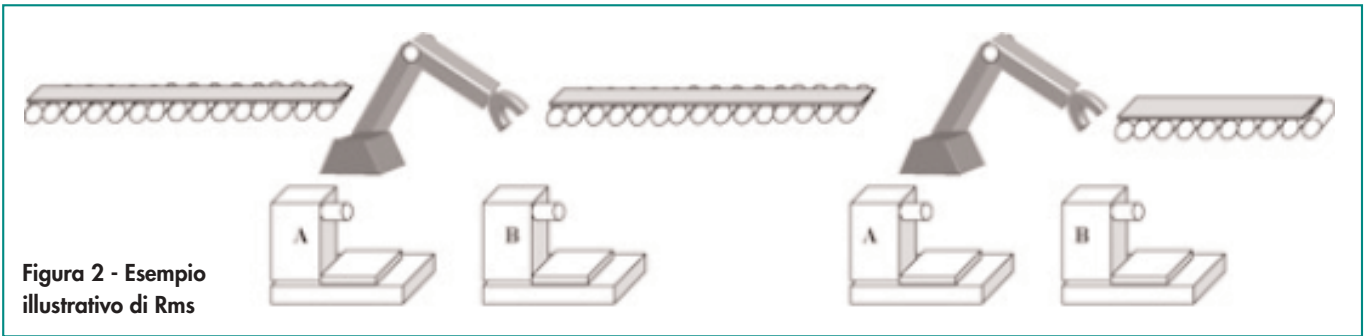


Figura 2 - Esempio illustrativo di Rms



Figura 3 - Nastro trasportatore e corrispondente rete di Petri del controllo logico

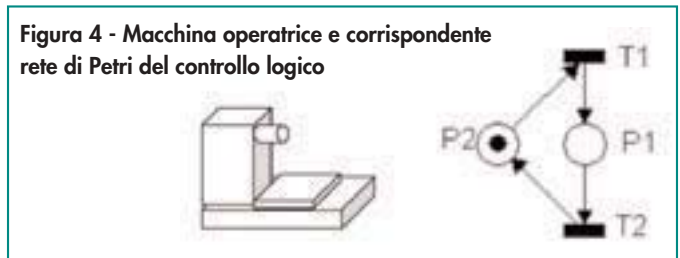


Figura 4 - Macchina operatrice e corrispondente rete di Petri del controllo logico

in ingresso, il robot prende tale semilavorato e lo carica sulla macchina A o B a seconda del tipo di lavorazione richiesta. Quando la lavorazione è terminata, il robot riprende il semilavorato e lo colloca sul nastro trasportatore in uscita.

T1= Start P1= Rotazione
T2= Stop P2= Attesa

Tabella 1 - Condizioni e azioni associate alle transizioni e ai posti della rete di Petri di Figura 3

T1= Start P1= Operation
T2= End P2= Stand by

Tabella 2 - Condizioni e azioni associate alle transizioni e ai posti della rete di Petri di Figura 4

Passo 1/B. Se una macchina è una risorsa condivisa, allora è importante aggiungere un posto che rappresenta la disponibilità della stessa per le differenti operazioni. Ad esempio, il manipolatore è una risorsa condivisa, quindi la rete di Petri che ne rappresenta il controllo logico deve verificare la sua disponibilità prima di avviare un'operazione. In particolare, le quattro possibili operazioni che il braccio robotico deve eseguire sono le seguenti:

- Caricare un semilavorato sulla macchina A
- Caricare un semilavorato sulla macchina B
- Scaricare un semilavorato sulla macchina A
- Scaricare un semilavorato sulla macchina B

Definizione dei moduli di controllo delle macchine

La rete di Petri di ogni macchina è realizzata attraverso le seguenti due operazioni:

Passo 1/A. Prima si progettano le reti di Petri del controllo logico delle operazioni di lavorazione da eseguire, in modo tale che esse soddisfino le proprietà formali desiderate per costruzione. Ad esempio, il nastro trasportatore è modellato con la struttura mostrata in Figura 3 e Tabella 1. Analogamente, i controllori delle stazioni di lavorazione sono rappresentati tramite le strutture di Figura 4 e Tabella 2.

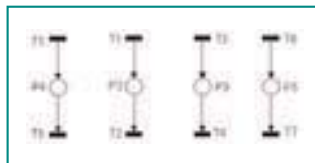


Figura 5 - Operazioni svolte dal manipolatore

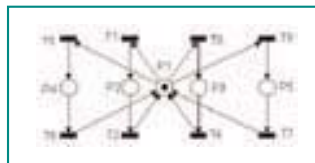


Figura 6 - Rete di Petri completa del controllo logico del manipolatore

Tali operazioni possono essere rappresentate con le quattro strutture di base riportate in Figura 5 e Tabella 3. Dato che il manipolatore può eseguire una sola operazione per volta è necessario introdurre un posto (P1) per rappresentare la disponibilità del manipolatore stesso, come mostrato in Figura 6.

Connessioni tra moduli di controllo delle macchine: il controllo di cella

Passo 2. Il sistema di controllo del livello cella è realizzato per aggregazione dei moduli di controllo delle macchine componenti. In particolare tali moduli sono connessi tra loro se le macchine corrispondenti si scambiano dei semilavorati. In tal caso, è introdotto un posto addizionale tra le corrispondenti reti di Petri, in modo tale da connettere la transizione di un modulo di controllo macchina che rappresenta lo scarico di un

Connessioni tra moduli di controllo delle macchine: il controllo di cella

Il sistema di controllo del livello cella è realizzato per aggregazione dei moduli di controllo delle macchine componenti. In particolare tali moduli sono connessi tra loro se le macchine corrispondenti si scambiano dei semilavorati. In tal caso, è introdotto un posto addizionale tra le corrispondenti reti di Petri, in modo tale da connettere la transizione di un modulo di controllo macchina che rappresenta lo scarico di un

T1= Start Load Machine A	P2= Loading Machine A
T2= End Load Machine A	P3= Unloading Machine A
T3= Start Load Machine B	P4= Unloading Machine B
T4= End Load Machine B	P5= Loading Machine B
T5= Start Unload Machine A	
T6= End Unload Machine A	
T7= End Unload Machine B	
T8= Start Unload Machine	

Tabella 3 - Condizioni e azioni associate alle transizioni e ai posti della rete di Petri di Figure 5

semilavorato a quella che rappresenta il carico nel modulo di controllo della macchina successiva. Tali connessioni sono realizzate attraverso archi orientati rappresentanti il flusso dei semilavorati, come illustrato in Figura 7, ove i posti addizionali sono evidenziati con cerchi più larghi (P3, P9, P14, P18).

Autorizzazioni

Passo 3. Al fine di garantire un corretto comportamento del sistema è importante introdurre posti e transizioni addizionali per sincronizzare le operazioni in modo appropriato, ciò può essere fatto tramite il meccanismo delle autorizzazioni qui presentato. Per esempio, prima di consentire lo scarico di un semilavorato da una macchina operatrice è necessario che la macchina stessa, su cui è stata eseguita la lavorazione prevista, abbia terminato il suo processo di lavorazione; mentre per consentire il carico di un semilavorato su una macchina operatrice perché esso possa essere lavorato occorre valutare la disponibilità della macchina stessa.

È quindi necessario introdurre delle autorizzazioni adeguate nelle reti di Petri in modo tale da eseguire le operazioni in modo corretto e coerente. In Figura 7 le differenti azioni di controllo sono state correttamente sincronizzate per mezzo del meccanismo delle autorizzazioni. Ad esempio, una macchina può essere scaricata da un manipolatore solo quando il suo processo di lavorazione è terminato (posti aggiuntivi P22 e P23), mentre può essere caricata con un nuovo semilavorato solo quando è stato scaricato il semilavorato appena trattato (posti aggiuntivi P20 e P21).

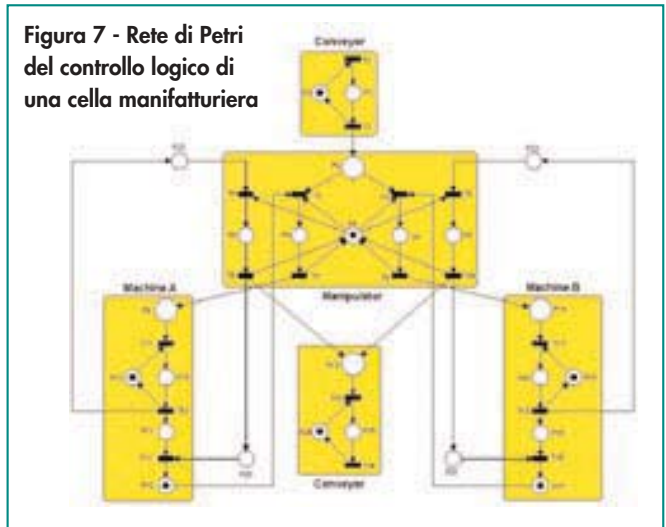
Connessioni tra moduli di controllo delle celle: il controllo di sistema

Passo 4. Le celle manifatturiere sono tipicamente connesse tramite macchine dedicate al trasporto ed alla manipolazione dei semilavorati (nastri trasportatori, tavole rotanti e manipolatori). Quindi le connessioni tra i moduli di controllo di celle contigue possono essere realizzate come le connessioni tra moduli di controllo di macchine contigue (vedi Passo 1). Così operando si ottiene la rete di Petri che rappresenta il controllo logico dell'intero sistema manifatturiero considerato, come illustrato in Figura 8.

Traduzione da reti di Petri a Sfc

Passo 5. Per implementare le funzioni di controllo logico sviluppate tramite reti di Petri su Plc industriali, si genera il corrispondente codice tramite un formalismo supportato dallo Standard Iec 61131 parte 3°, ovvero tramite il linguaggio Sfc. A tal fine si sono definite delle regole di traduzione per generare in modo automatico gli schemi Sfc direttamente dalle reti di Petri corrispondenti. Le regole di corrispondenza per gli elementi grafici di base dei due formalismi sono rappresentate in Tabella 4, mentre in Figura 9 sono presentati a titolo esemplificativo una rete di Petri e l'Sfc equivalente. Il lettore interessato può trovare ulteriori approfondimenti riguardo alle regole di traduzione in [1]. Si osservi che le regole di costruzione e di traduzione definite garantiscono che le proprietà formali desiderate - introdotte nel secondo paragrafo - siano verificate anche per le strutture Sfc ottenute.

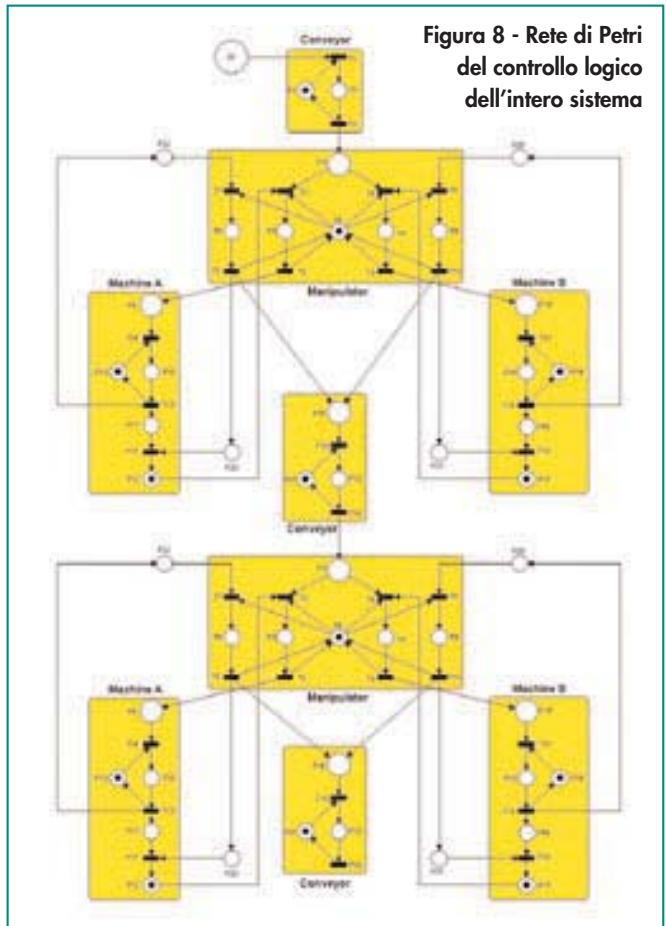
Figura 7 - Rete di Petri del controllo logico di una cella manifatturiera



Applicazione ad un Rms industriale

Quale esempio applicativo è stato studiato un innovativo impianto calzaturiero caratterizzato da elevati livelli di flessibilità e riconfigurabilità. Lo scopo dell'impianto è di produrre scarpe su misura di modelli differenti in relazione alla domanda, riducendo il time-to-market e i costi, e cercando di mantenere elevati livelli di qualità del prodotto. In Figura 10 è rappresentato il lay-out dell'impianto situato presso il Laboratorio

Figura 8 - Rete di Petri del controllo logico dell'intero sistema



Elemento grafico	Rete di Petri	SFC
Posto Passo		
Transizione		
Sceita multipla		
Parallelismo		
Sincronizzazione		
Convergenza		

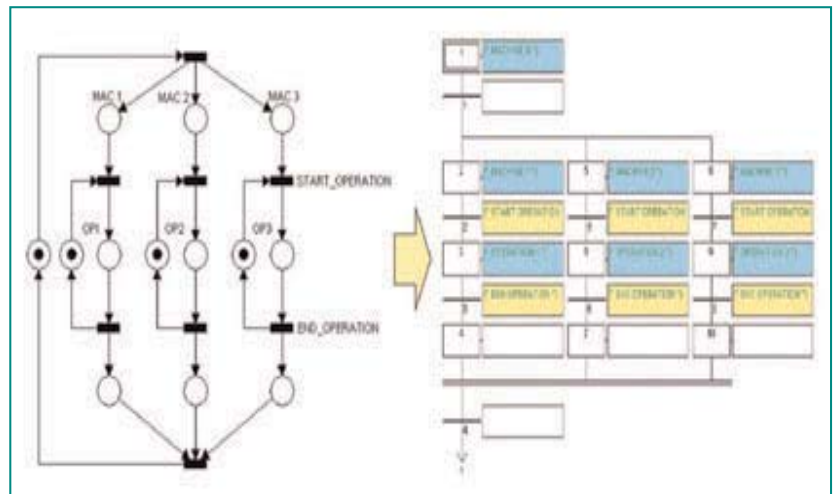


Tabella 4 - Regole di traduzione da reti di Petri a Sfc Figura 9 - Rete di Petri e corrispondente Sfc

rio di Vigevano dell'Itia Cnr [2,8], esso è caratterizzato da una linea di trasporto basata su un'architettura di tipo molecolare, composta da sei celle di trasporto, chiamate terne, in quanto costituite ognuna da tre dispositivi: una tavola, un'isola ed un manipolatore. Le terne movimentano i semilavorati, mentre le lavorazioni sono realizzate dalle macchine operatrici collocate intorno alle isole. Un magazzino iniziale inserisce le forme nel sistema, e un magazzino finale preleva le scarpe prodotte. Il controllo logico della linea di trasporto è stato progettato per mezzo della metodologia proposta. In particolare, la modularità dell'architettura molecolare è stata piena-

mente sfruttata nel progettare il controllo logico della singola terna, il quale è stato concepito come un agente intelligente in grado di reagire autonomamente alle condizioni al contorno in accordo con le specifiche del controllo. In tal modo lo stesso modulo di controllo logico può essere adottato per tutte le terne, salvo le parametrizzazioni del caso, massimizzando così il ri-uso, e minimizzando sforzi e tempi di sviluppo.

In dettaglio il controllo logico di una singola terna è stato ottenuto progettando le reti Petri del controllo per ogni macchina della terna - tavola, isola e manipolatore - (Passo 1) e connettendole adeguatamente in accordo alla procedura introdotta

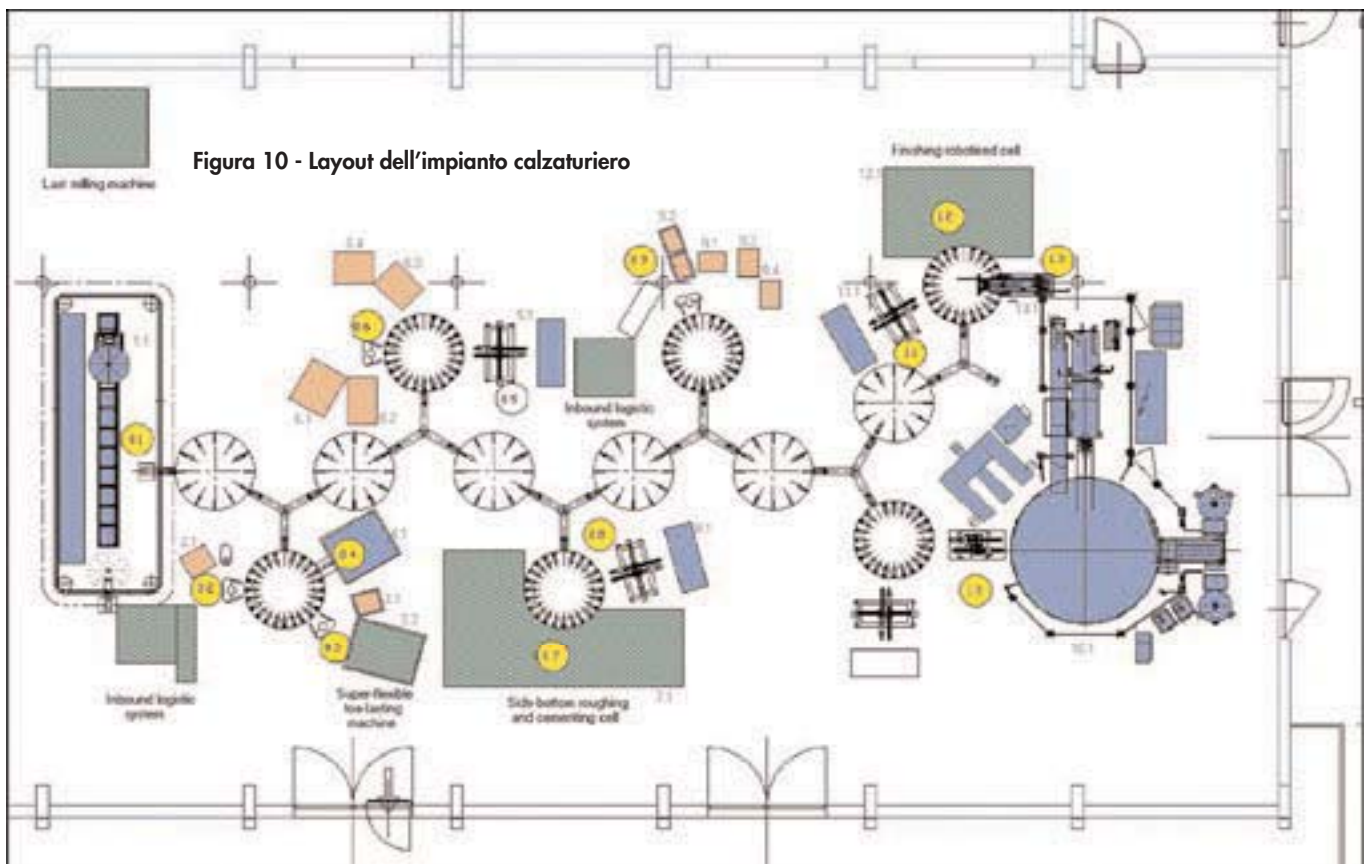


Figura 10 - Layout dell'impianto calzaturiero

nel paragrafo precedente (Passi 2 e 3) in modo da ottenere la rete di Petri del controllo di cella, i.e. di terna. Il controllo dell'intera linea di trasporto è poi ottenuto semplicemente connettendo le reti di Petri delle terne - le quali hanno tutte la stessa struttura - rispettando le regole definite (Passo 4). Infine, il codice Sfc corrispondente alla rete di Petri del controllo è stato derivato per mezzo delle regole di traduzione introdotte (Passo 5). Per motivi di spazio in Figura 11 sono mostrati solo la rete di Petri del controllo del manipolatore ed il corrispondente Sfc.

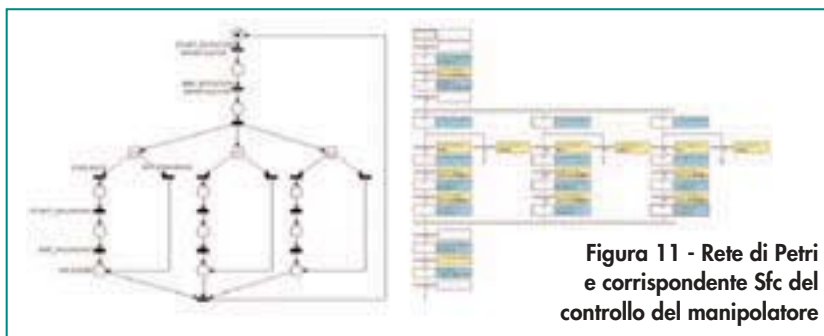


Figura 11 - Rete di Petri e corrispondente Sfc del controllo del manipolatore

Maggiori dettagli relativi a strutture ed algoritmi di controllo possono essere reperiti in [8]. La soluzione di controllo progettata è stata implementata in IsaGraf. Tale ambiente di sviluppo del controllo logico supporta tutti i linguaggi previsti dallo standard Iec 61131 parte 3° e fornisce funzionalità di simulazione ed animazione grafica 2D.

La correttezza delle funzioni di controllo definite è stata verificata in IsaGraf tramite simulazioni dinamiche in anello chiuso, nelle quali il comportamento ad eventi discreti del sistema controllato è stato rappresentato anch'esso per mezzo di opportuni modelli Sfc. In Figura 12 è mostrata l'interfaccia grafica di IsaGraf per l'analisi dei risultati di simulazione. Si noti che per motivi di semplicità è illustrato un sistema ridotto costituito dai magazzini e da due sole terne.

Conclusioni

E' stata presentata una metodologia di sviluppo del controllo logico di Rms. Tale metodologia adotta le reti di Petri come formalismo per la modellazione e progettazione del controllo logico al fine di garantire le proprietà di raggiungibilità, limitatezza, vivezza e reversibilità delle funzioni di controllo progettate; mentre il linguaggio Sfc è utilizzato per implementare tali soluzioni di controllo su Plc industriali.

Nell'articolo sono anche discussi esempi illustrativi ed applicativi. Il lavoro futuro riguarderà l'applicazione della metodologia proposta ad altri sistemi manifatturieri, la definizione di regole di progettazione direttamente in formalismo Sfc che

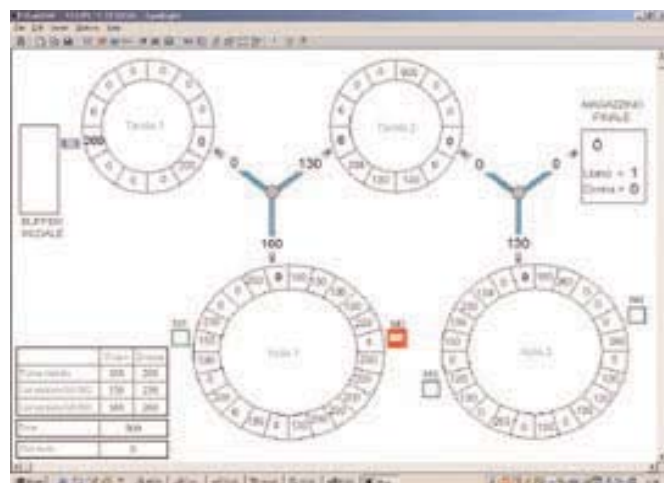


Figura 12 - Simulazione e animazione grafica 2D in IsaGraf

garantiscono le proprietà formali desiderate per il codice di controllo logico, e lo studio delle reti di Petri Colorate per estendere la metodologia proposta a sistemi più complessi.

Bibliografia

[1] M.C. Zhou e K. Venkatesh "Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach". New Jersey 1998 World Scientific.

[2] Carpanzano E. e A. Cataldo. "Modular design and simulation based verification of the logic control code for an agile shoe manufacturing system". Proc. Industrial Simulation Conference, Isc2003, Eurosis, Valencia, Spain, June 9-11, 2003, pp. 290-294.

[3] Ferrarini, L. e Carpanzano, E. "A Structured Methodology for the Design and Implementation of Control and Supervision Systems for Robotic Applications". Ieee Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, N° 2, 2002, pp. 272-279.

[4] Carpanzano E. e Ballarino A. "A structured approach to the design and simulation-based testing of factory automation systems". Proc. Ieee International Symposium on Industrial Electronics, Isie2002, L'Aquila, Italy, 8-11 July, 2002, pp. 181-186.

[5] Silva M. e R. Vanette, "Petri Nets and Flexible Manufacturing". In Advances in Petri Nets, Berlin, Springer Verlag, 1989, pp. 374-417.

[6] Murata T "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications". Proc. Of the Ieee, vol. 77, n. 4, 1988.

[7] Park, E., Khargonekar, P., e Tilbury D. "A Modeling and Analysis Methodology for Modular Logic Controllers of Machining Systems Using Petri Nets Formalism". Ieee Transactions on Control Systems Technology, Vol. 31, N° 2, May 2001, pp. 168-186.

[8] Bossi D. e Cattaneo della Volta V. "Modular Logic Control Design for Reconfigurable Manufacturing Systems through Petri nets and Sequential Function Charts". Master Thesis. Politecnico di Milano. April 2003.

[9] Park E. e Tilbury D. "Modular Logic Controllers for Machining Systems: Formal Representation and Performance Analysis using Petri Nets Formalism". Ieee Transactions on Control Systems Technology, Vol. 15, N° 6, December 1999, pp. 1046-1060.

[10] Renè David, "Grafcet: A Powerful Tool for Specification of Logic Controllers". Ieee Transactions on Control Systems Technology, Vol. N°3 September 1995.

[11] R.W. Lewis "Programming Industrial Control Systems using Iec 1131-3". Revised edition, The Institution of Electrical Engineers Usa, 1998.

[12] Carpanzano E., Dallefrate D. e Jatta F. "A Modular Framework for the Development of Self-reconfiguring Manufacturing Control Systems". Proc. Ieee International Conference on Intelligent Robots and Systems, Iros2002, Lausanne, Switzerland, September 30-October 4, 2002, Vol. 2, pp. 1960-1965.