

CONTROLUL PROCESELOR DE FABRICAȚIE. O NOUĂ PARADIGMĂ

Constantin B. Zamfirescu

(zbc@acm.org)

Sorin C. Negulescu

(sorin_negulescu@yahoo.com)

Boldur E. Bărbat

(bbarbat@rdslink.ro)

Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, Facultatea de Inginerie, Catedra de Calculatoare și Automatizări

Rezumat. Automatizarea și controlul distribuit al proceselor de fabricație constituite, în ultima decadă, o preocupare de vârf în domeniul sistemelor informatice. Încercând să răspundă factorilor economici incerti și dinamici în care acestea operează, soluțiile de automatizare cad pradă incapacității intrinseci de adaptabilitate. Fără a rezolva problema, chiar și soluțiile distribuite modelează mediul întreprinderii ca parte integrantă a cunoștințelor entităților implicate în procesul decizional. Coordonarea acestora rămâne însă deconectată de contextul operațional al problemei, conducând la soluții particulare cu costuri considerabile în diseminarea și aplicarea lor în mediul industrial. Cu toate că tendințele recente în arhitectura programelor informatice ne duc către utilizarea pe scară largă a agenților inteligenți, unii cercetători proiectează agenții în aceeași manieră în care au fost implementate sistemele tradiționale. Articolul introduce o nouă abordare, inspirată din comportamentul sistemelor multiagent naturale (coloniile de furnici), apărută în ultimii ani în controlul proceselor de fabricație. Accentul cade, în special, pe ingineria unui astfel de sistem, cu avantajele sale reale de utilizare și instruire. Exemplele detaliate în lucrare prezintă experiența autorilor în implementarea și utilizarea unui astfel de sistem în primul rând ca sistem de sprijinire a deciziilor, iar în al doilea rând, de automatizare parțială a unor echipamente de producție.

Cuvine cheie: controlul proceselor de fabricație (CPF), sisteme multiagent (SMA), stigmergie, sistem suport pentru decizii (SSD).

1. Introducere

Pentru a-și menține competitivitatea, întreprinderile sunt nevoite să implementeze sisteme de CPF capabile să opereze cât mai eficient în condiții sporite de instabilitate și incertitudine. Acești factori de natură *endogenă* (reconfigurarea atelierului de producție, deprecierea și reabilitarea utilajelor, variații ale performanțelor operatorilor, introducerea unor echipamente adiționale etc.) sau *exogenă* (modificări ale structurii și frecvenței comenzilor de producție, a relațiilor cu furnizorii și clienții etc.) sunt de cele mai multe ori tratați în CPF din perspectiva îmbunătățirii continue, ce fundamentează practicile managementului calității totale în majoritatea atelierelor de producție. În acest context, orice sistem de CPF, automatizat sau nu, trebuie să funcționeze în strânsă legătură cu practicile de lucru deja existente în mediul organizațional în care este implementat.

O caracteristică importantă a oricărui sistem avansat de CPF constă în capacitatea acestuia de a optimiza în mod flexibil și continuu performanțele sistemului prin tratarea situațiilor neprevăzute ce pot apărea în condiții de incertitudine. Predicția pe termen scurt a comportamentului sistemului devine astfel o precondiție pentru optimizarea proceselor de fabricație. În lipsa ei, sistemul de CPF va conduce întotdeauna la optime locale cu implicații păguboase pe termen mediu la nivelul sistemului. Maniera convențională de abordare a situațiilor de incertitudine în CPF constă în modelarea sistemului (de exemplu, programare liniară) de către un grup de experți care înțeleg în profunzime atât sistemul informatic de planificare, cât și sistemul real de producție. Această abordare a condus la un sistem centralizat de CPF, cu conexiuni complexe între modelul realizat, sistemul de producție și algoritmi de control. Orice modificare la nivelul sistemului de producție implică realizarea unui nou model care limitează utilizarea sistemelor de CPF la acele unități de producție ce dispun de un capital investițional semnificativ.

Aceste inconveniente au condus la testarea unor sisteme heterarhice de CPF [6] care au reușit să elimine dependența de specialiști, însă au eșuat în tentativa lor de a anticipa pe termen scurt comportamentul sistemului de producție. Cercetările din domeniul SMA în CPF încearcă să compenseze acest lucru prin optimizarea performanțelor sistemului de producție în condiții de instabilitate a mediului industrial condus. Ele se fundamentează pe implementarea unor mecanisme de negociere între agenți (cu precădere inspirate din mecanismele de piață) ce conduc la creșterea gradului de flexibilitate a sistemelor convenționale de control [4] [14]. Marele lor dezavantaj constă însă în specificitatea soluției relativă la construirea SMA. Pe de o parte, mecanismele de piață presupun conversia la o singură valoare scalară (banii) a tuturor caracteristicilor calitative și cantitative ale obiectelor negociate implicând costuri semnificative pentru transferul acestor implementări. Pe de altă parte, modificări majore în sistemul de fabricație sau managementul acestuia vor impune readaptarea protocolului de negociere la nivelul agenților. Cu toate că avantajele utilizării SMA în CPF au fost accentuate pe larg în literatura de specialitate [15] [20], după cunoștința autorilor, la ora actuală există o singură aplicație funcțională într-un mediu industrial real [4]. Acest lucru se datorează cu precădere costurilor ridicate asociate cu implementarea unor soluții dedicate. În condițiile în care agenții individuali sunt totuși simpli și în mod particular neintelenți, SMA naturale (furnici, albine, păsări etc.) ne demonstrează însă capacitatea lor de a manifesta un comportament robust și inteligent, într-un mediu deosebit de dinamic. În aceste sisteme, inteligența nu rezidă într-un agent anume (cum este cazul modelelor centralizate), nici în fiecare agent în parte (ca în modelul clasic al agenților inteligenți), ci în mecanismele de interacțiune indirectă între agenți, mediate de un mediu activ. Această observație se poate aplica cu succes și în contextul CPF, unde mediul condus prezintă proprietăți dinamice deosebite, iar costurile de implementare a unui sistem automatizat inteligent (fie el și descentralizat) sunt considerabile.

Lucrarea este structurată în cinci secțiuni. După partea introductivă a conceptelor în care, pornind de la paradigma stigmergică, se vor evidenția elementele definitorii ce trebuie abordate în implementarea unui SMA,

secțiunea 3 va detalia componentele arhitecturale ale unui sistem de CPF. În secțiunea 4 se va insista asupra comportamentului furnicilor artificiale în context CPF, pentru ca în următoarea secțiune să fie exemplificat modul în care un astfel de sistem poate fi utilizat, în primul rând descriptiv, pentru înțelegerea activităților care intervin la nivelul atelierului de fabricație, iar în al doilea rând prescriptiv pentru optimizarea proceselor existente. Ultima secțiune prezintă o serie de observații practice și concluzii cu scopul de a impulsiona cercetările din țara noastră într-o direcție cu un real potențial științific și aplicativ.

2. Ingineria SMA într-o abordare stigmergică

Conceptul de „stigmergie” poate fi definit drept crearea unui anumit comportament al agenților, ca urmare a efectelor produse în mediu de comportamentul anterior și a fost propus de Grasse [8] pentru a caracteriza tipul de interacțiune din societățile biologice de insecte, mai precis mecanismul de coordonare identificat în coloniile de furnici. Acestea sunt ghidate (spre sursele de hrană, respectiv spre mușuroi) prin semne („stigmat”) sub forma unor câmpuri de feromoni cu care interacționează; itinerariile de succes sunt marcate prin împrăștierea de noi feromoni (specfici mușuroiului, în drum spre hrană, sau specfici hranei, la întoarcere). Fără această actualizare prin reîntărire, câmpurile se evaporă în timp, ca orice miros, iar furnicile se mișcă aleator; concentrația și distribuția feromonilor reflectă sarcina comună în curs. Stigmergia (figura 1) exprimă deci o formă de interacțiune asincronă (în esență schimb de informații) mijlocită de un mediu „activ” permițând astfel ca din activitățile simple ale indivizilor să apară un comportament social complex, deosebit de flexibil.

Principiile generale ale arhitecturilor de agent stigmergice (dirijate de mediu) sunt: a) agenții sunt simpli, reactivi, și ignoră existența atât a altor agenți, cât și a activităților complexe ale societății de agenți; b) mediul este un mecanism important de ghidare a activităților și de acumulare de informații privind întreaga societate. Astfel, se valorifică trei trăsături cardinale ale stigmergiei [1]: a) informația *globală* (în cazul furnicilor, privind surse de hrană îndepărtate) este disponibilă *local* (prin urma feromonică); b) rolul reacției pozitive (întărirea câmpului de către furnicile atrase de feromoni) în emergența unei *ordini globale* (evidentă în comportamentul social complex) fără vreo coordonare globală; și c) se evită comunicarea directă interagent cu un triplu câștig: *simplitate* (dispar limbaje, mesaje ș.a.m.d.), *robustețe* (prin decuplarea agenților, reducerea operațiilor de calcul, „uitarea” în timp a pistelor greșite) și *protecție* (nefiind informație vehiculată explicit, nu există violare de acces).

În temeiul modelului biologic, feromonii virtuali simulează trei operații privind feromonii chimici reali: *agregare* (depunerile agenților individuali se cumulează), *evaporare* în timp (evitând supraîncărcarea și eliminând informația nevalidă), *difuzie* (în vecinătate, creând un gradient pe care agenții îl pot urma). Au fost identificate diferite forme ale stigmergiei [13], clasificate în funcție de *natura semnului* (de exemplu, feromonul în cazul furnicilor, sau starea curentă a soluției dezvoltate) sau de *scalaritatea* lor (cantitativă când este vorba de o singură valoare scalară sau calitativă atunci când acestea formează un set de opțiuni discrete).

Ca urmare, coordonarea stigmergică a inspirat elaborarea de algoritmi utilizați în optimizarea combinatorie (furnici artificiale construiesc soluții pentru problema comis-voiajorului, depunând urme feromonice pe drumul parcurs și folosind o regulă de tranziție pentru alegerea orașului următor) [5] [11]; soluții asemănătoare s-au aplicat în rutarea în rețele de comunicație, analiza exploratorie a datelor, teoria grafelor, controlul producției etc.

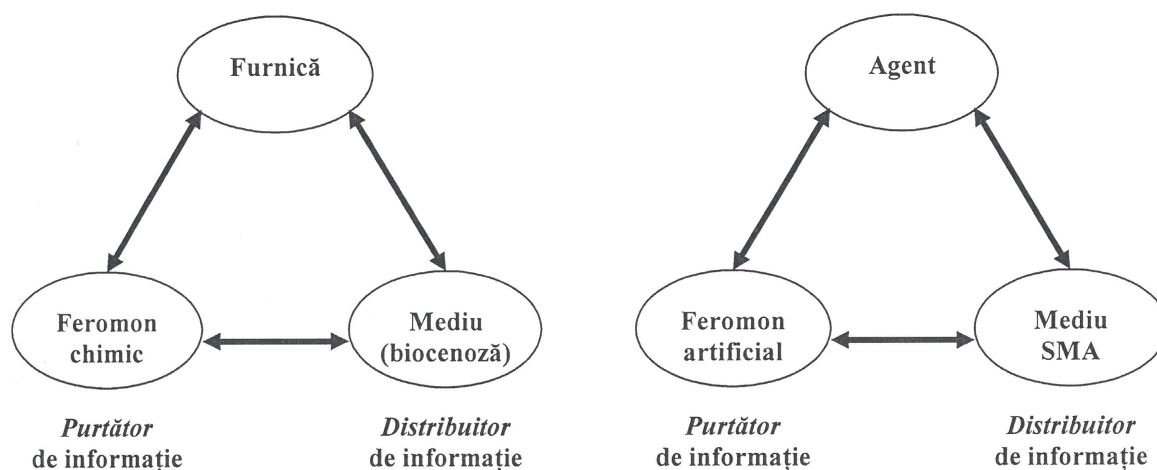


Figura 1. Ideea de bază a stigmergiei – extinsă după [18].

3. Arhitectura sistemului

În această secțiune se va descrie succint arhitectura unui sistem de CPF, inspirat din modul de interacțiune al furnicilor. După clarificarea contextului operațional de validare, vor fi analizate speciile de agenți identificate pentru implementarea sistemului împreună cu structura de feromoni digitali prin intermediul căreia are loc comunicarea dintre agenți. Detalierea celor prezentate se poate consulta în [22].

3.1. Arhitectura generală

În general, validarea inițială a unui sistem de CPF se realizează în medii simulate. Simulatorul poate fi utilizat fie ca SSD pentru înțelegerea și optimizarea sistemului de producție actual, fie ca mediu de validare a soluției elaborate urmat apoi de analiza, adaptarea și transferul rezultatelor în sistemul real [7]. Ca o tendință general acceptată [10], arhitectura simulatorului prezentat face distincție între componenta emulată și componenta logică a simulatorului. Pe de o parte, se are în vedere posibilitatea definirii unei ontologii pentru echipamentele de producție, iar pe de alta, realizarea unui sistem de referință pentru evaluarea algoritmilor de CPF. Simulatorul ca întreg cuprinde o ontologie pentru informațiile statice, în timp ce comportamentul dinamic al componentelor este coordonat separat în fiecare modul în parte.

Modulul de emulare are rolul de a reflecta fidel constrângerile de natură fizică prezente la nivelul fiecărei resurse utilizate în procesul de fabricație (echipamente de producție, unități de transport și de stocare a materiei prime sau a semifabricatelor, operatori umani etc.). Comportamentul fiecărei resurse emulate este modelat ca un automat finit și implementează protocoale de comunicare, specifice pentru controlul acestora. Acestea sunt generale și independente în raport cu cine controlează resursa (un program sau un utilizator). Pe lângă definirea și configurarea atelierului de producție (echipamente, parametri de funcționare etc.), sunt permise astfel modificări în timp real (introducerea de echipamente noi etc.), care să faciliteze simularea în context a disfuncționalităților (defectarea unor echipamente, variații ale timpilor de procesare etc.) care intervin în mod real la nivelul întreprinderii. Pentru fiecare categorie de element transferabil (container, semifabricat etc.) între două resurse se generează conexiunile specifice, care formează setul de grafuri orientate între resursele de producție. De cealaltă parte, *modulul de control* este responsabil cu logistica în cadrul atelierului de fabricație (rutarea și alocarea resurselor, distribuirea operatorilor, materia primă, repararea și întreținerea echipamentelor etc.) în conformitate cu comenzile de producție (tipuri, volum, frecvență etc.) și parametrii de control.

Această separare între partea emulată și partea de control are și un rol pragmatic, acela de a facilita integrarea rapidă a sistemului de CPF în sistemul de producție real (inclusiv reutilizarea codului) fie integral, fie parțial, pentru un echipament de producție specific. În ultimul caz, el poate fi complet automatizat (atunci când echipamentul de producție dispune de o interfață de control) sau transpus în practicile de lucru ale operatorilor umani. Pe lângă facilitarea procesului de validare și integrare a celor două module, prin decuplarea și decompoziția lor la nivel de echipament de producție se are în vedere ca, pe baza ontologiilor definite la nivelul modulului de emulare să se poată genera și sintetiza automat modulul de control [22].

3.2. Specii de agenți

În literatura de specialitate elementele implicate într-o problemă de optimizare a CPF sunt descrise sub forma unor ontologii destul de particulare [16][17]. În general, acestea includ cunoștințe despre comenzile de producție, tipurile de produse și servicii care pot fi furnizate, precum și despre resursele (materiale, umane etc.) ce permit executarea fie a operațiilor incluse în planul tehnologic de fabricație, fie a activităților de logistică internă (transport, stocare, alimentare etc.). Arhitectura de referință PROSA [19] pe care se bazează SMA prezentat în această lucrare reflectă îndeaproape entitățile descrise în toate ontologiile CPF prin trei specii de agenți: agentul de resurse, agentul de comandă și agentul de produs.

Resursele corespund unor părți fizice ale sistemului de producție (vagonet, stație de lucru, echipament automat de stocare, operatori umani etc.). Ele sunt caracterizate de o capacitate operațională predefinită (disponibilitatea resursei) și de propriile constrângeri și preferințe în ceea ce privește realizarea unei operații de fabricație (capabilitățile resursei). *Agenții de resurse* (AR) reflectă echipamentele fizice disponibile în sistemul de producție și gestionează cunoștințe legate de modul și momentul lor de utilizare. Astfel, AR se limitează la monitorizarea și controlul resurselor ținând însă cont de mediul operațional în care sunt situați prin gestiunea dinamică a interdependențelor cu ceilalți AR. În unele cazuri, AR poate avea și caracteristicile unui agent de interfață, care conlucrează cu operatorul uman responsabil pentru controlul unui echipament de producție în procesul de stabilire a priorităților de execuție a comenzilor.

O *comandă* reprezintă o cerere pentru un anumit produs/serviciu pe care sistemul de producție îl poate furniza. Ea include preferințele clientului (cantitatea solicitată, data livrării, parametrii tehnici) care dirijează

configurarea și activitatea sistemului de producție. Aceste sarcini sunt reflectate în sistem de către *agenții de comenzi* (AC), care au responsabilitatea să asigure realizarea preferințelor clientului cu costuri minime de execuție prin stabilirea „itinerarului” optim prin fabrică (când și unde se va executa o anumită operație). În funcție de starea curentă a semifabricatului, AC gestionează cunoștințe legate de planurile alternative de procesare relativ la comanda proprie pe care o reprezintă. Pe timpul duratei sale de viață, AC este legat atât de categoria de produs (sau de un grup de produse) pe care îl furnizează, cât și de clientul pe care îl reprezintă (poate fi și unul intern; într-o fabrică există numeroase procese de logistică internă, care presupun alocarea unor resurse). Caracteristicile tehnologice ale produsului și preferințele clientului se pot modifica sau (re)negocia pe parcursul executării acestuia. În mod analog cu AR, AC poate fi privit și ca un agent de interfață care colaborează cu inginerul de planificare a producției pentru stabilirea criteriilor de optimalitate.

Produsul reprezintă bunul sau serviciul care poate fi furnizat de către o întreprindere. *Agenții de produse* (AP) vor gestiona astfel cunoștințe legate de pașii tehnologici necesari prelucrării corecte a unui produs (ciclul de viață al produsului, proiectarea, planul de procesare tehnologică, procedurile de asigurare a calității etc.). El gestionează practic, în condițiile resurselor operaționale disponibile în atelierul de producție, un model al produsului aflat momentan în fabricație. De remarcat că, într-un anumit stadiu al unui produs, în decursul procesului de fabricație putem avea alternative diferite de fabricare în funcție de rezultatul ultimei operații realizate. De asemenea, categoriile de produse furnizate variază în timp fie datorită schimbărilor intervenite în cererile de producție, fie datorită modificării configurației atelierului de producție. AP poate acționa atât ca furnizor de cunoștințe pentru ceilalți agenți, livrând soluțiile potrivite unui anumit context operațional, cât și ca agent de interfață pentru expertul tehnolog, cu scopul de a extrage, stoca și menține informațiile referitoare la produsele gestionate.

3.3. Infrastructura feromonilor digitali

În general, algoritmi bazati pe comportamentul furnicilor operează într-un mediu care poate fi reprezentat sub formă de graf. Pentru CPF, acest graf are ca noduri resursele de producție, iar conexiunile sunt legăturile fezabile dintre două resurse atunci când există echipamente de producție transferabile între cele două resurse (container, cărucior, semifabricat etc.). Fiecare nod are atașată o zonă de memorie locală, în care pot fi stocate informații (feromoni digitali) vizibile doar agenților care se află temporar în acel nod.

Comparativ cu furnicile reale, CPF prezintă însă diferențe majore: obiective conflictuale în ceea ce privește alocarea resurselor, coexistența unor scopuri multiple care sunt adesea instabile, scopuri individuale care pot fi în contradicție cu cele globale. În aceste condiții, feromonii artificiali trebuie să înglobeze structuri de date care sunt specifice atât resursei, cât și conexiunilor. Pentru resurse, avem pe de o parte capabilitățile acesteia de procesare (în cel mai simplu caz, ele sunt reprezentate printr-o listă care cuprinde toate operațiile pe care resursa respectivă le poate executa), iar pe de alta, *disponibilitatea* resursei (graficul de alocare a resursei). Pentru conexiuni avem tipurile de operații care pot fi executate urmând acea conexiune (cu alte cuvinte, fezabilitatea unei rute prin atelierul de producție, ținând cont de starea curentă a semifabricatului și de produsul care se dorește finalizat). Aceste informații globale, disponibile local în structura de feromoni artificiali, sunt suficiente pentru luarea unor decizii eficiente în timp real. În plus, pentru a capta dinamica acestor informații, ele au asociată o valoare scalară care să reflecte actualitatea lor (sinonimă cu intensitatea feromonilor naturali).

4. Rolul furnicilor

Furnicile artificiale pot fi implementate ca agenți simpli, cu rolul de a străbate graful de navigare descris anterior în scopul îndeplinirii unei sarcini definite de către AC (teoretic, mecanismul ar putea fi implementat pentru oricare dintre agenții descriși în paragraful 3.2., însă acest aspect nu a fost investigat încă). Ele sunt create cu o anumită frecvență dependentă de dinamica mediului controlat și de puterea de calcul disponibilă la nivelul infrastructurii informatice existentă în atelierul de producție. Furnicile pot modela comportamente diferite, compoziția și activarea lor fiind parte integrantă a procesului creativ de implementare a unui SMA. Simplificând lucrurile, în fiecare nod furnicile execută secvențial două acțiuni diferite. Pe baza informațiilor disponibile local, furnica interpretează și modifică informația disponibilă în feromonii digitali. În funcție de rezultatul acestei acțiuni, se va selecta următorul nod (sau noduri, în funcție de implementare, caz în care furnica se clonează) din graful de navigare, care va fi parcurs ulterior. Datorită simplității mecanismului descris (nici chiar programatorul nu are nevoie de o imagine de ansamblu asupra întregii probleme pentru a putea implementa o nouă furnică), ingineria software a sistemului devine un proces pur creativ prin care o funcționalitate extinsă poate fi investigată cu eforturi minime de implementare (justificarea detaliată a faliei conceptuale dintre „creșterea” unui SMA comparativ cu cel clasic de „construire” întâlnit în OO se poate vedea în [21]). Trebuie ținut însă cont de o serie de variabile care să permită, pe de o parte calibrarea sistemului în tratarea structurilor repetitive din graful

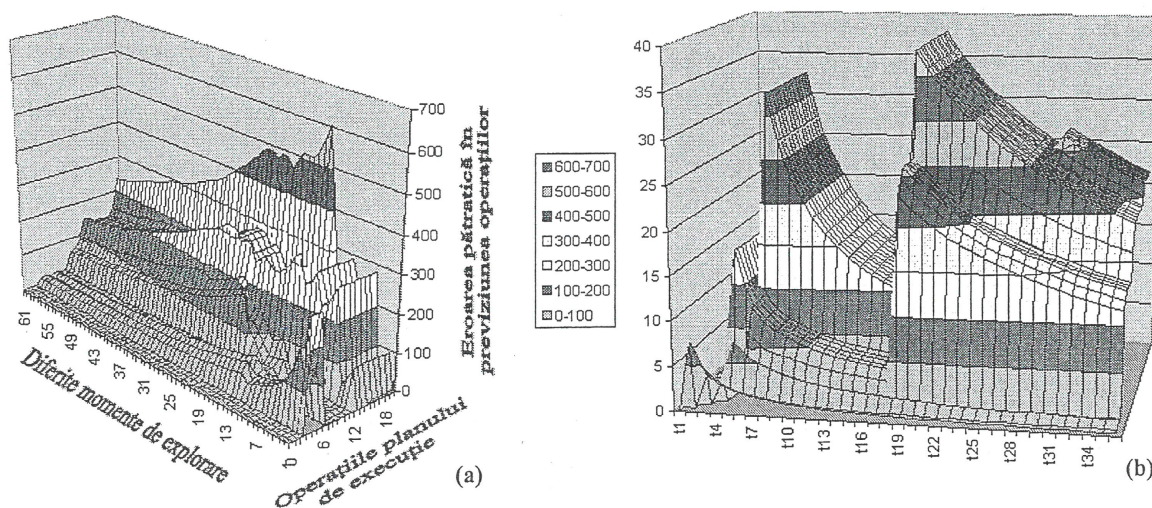


Figura 2. Dinamica erorii de estimare a soluției de procesare la diferite intervale de explorare: (a) în condiții „normale”, unde variația se datorează exclusiv timpilor de procesare instabili la nivelul fiecărei resurse și (b) în condiții „critice”, unde intervine defectarea unei resurse

de navigare, iar pe de altă păstrarea integrității datelor din feromonii digitali. Din prima categorie fac parte *parametri de siguranță* (numărul maxim de noduri pe care le traversează o furnică, numărul maxim de clone în care poate fi replicată o furnică etc.), iar în a doua categorie avem acei *parametri spațio-temporali*, care să capteze dinamica mediului emulat (generația de furnici, nodul local al grafului de navigare în care au fost create etc.). De asemenea, furnicile artificiale (spre deosebire de cele naturale) trebuie să dețină o memorie a activităților precedente, necesară evaluării soluției investigate. În continuare se vor exemplifica două activități în care paradigma emergentă poate fi utilizată în CPF: investigarea alternativelor de procesare pentru un AC și stabilirea pe termen scurt a încărcării probabile pentru un AR. Ilustrarea lor este descrisă în contextul unei implementări realizate într-o fabrică reală, ale cărei detalii operaționale sunt analizate pe larg în [22].

4.1. Investigarea alternativelor de procesare

După cum s-a menționat anterior, AC corespund comenzilor de producție. Astfel, un AC are responsabilitatea de a se asigura că instanța lui de produs este finalizată în timp util și cu costuri minime de producție în raport cu gradul de calitate dorit de client, urmând corect toate operațiile tehnologice așa cum sunt ele furnizate de către AP. AC trebuie să identifice, în raport cu resursele disponibile, ordinea operațiilor fezabile pe care produsul trebuie să le urmeze prin atelierul de producție. Pot fi identificate soluții multiple, cu grade diferite de acceptabilitate în raport cu anumiți parametri de performanță (gradul de utilizare al resurselor, costul asociat etc.). Spre deosebire de planificarea producției în CPF, descoperirea unei astfel de soluții este deosebit de complexă și constă în identificarea tuturor informațiilor legate de ordinea de efectuare a operațiilor în funcție de starea semifabricatelor, resursele cu ajutorul cărora vor fi procesate și cu care vor fi transportate, momentul în care poate începe execuția unei operații, timpul de așteptare în cozi etc. AC este atașat de un produs fizic, ce trebuie realizat (semifabricatul), astfel ca pentru a explora cât mai multe alternative, AC va crea agenți mobili, *agenți furnică pentru explorare* (AE), care moștenesc anumite comportamente de rezolvare a problemelor de la AC. AE va călători virtual prin graful de navigare, pornind de la resursa în care se află semifabricatul. Pentru a-și duce la bun sfârșit sarcina, AE se va ghida prin observarea feromonilor depozitați în zona locală de memorare atașată AR. Strategia de explorare a rețelei este un parametru sau „plug-in” al sistemului de control [12]. AE nu folosesc în mod necesar aceeași strategie, unele furnici vor încerca să *exploateze* soluțiile deja construite și gestionate de AC, iar altele pot *explora* noi alternative promițătoare prin evitarea resurselor cu încărcare critică. AE sunt creați cu o anumită frecvență dependentă de dinamica mediului în care operează (variația timpilor de procesare al unei operații, rata de defectare a resurselor, implicațiile induse de AE generați de alți AC etc.) și care parcurg rute posibil diferite înregistrând informațiile necesare construirii unei soluții fezabile (resursele pe care le-a vizitat, timpul de start la fiecare resursă care face parte din soluția construită, timpul de așteptare, durata fiecărei operații de producție și costul operației etc.). Informația înregistrată este utilă pentru a permite AC să compare în mod obiectiv alternativele disponibile prin analiza continuă a calității lor prin prisma variabilității de la o explorare la alta.

Efectul unei astfel de explorări poate fi observat în figura 2. De remarcat că, datorită timpilor aproximativi de estimare a procesării sau apariției unor comenzi cu o prioritate mai ridicată, incertitudinea asociată cu

previziunea unei soluții crește pe măsură ce operația este mai îndepărtată în planul de procesare tehnologică. Se poate astfel identifica o limită superioară a intervalului de timp în care se pot planifica în mod eficient operațiile individuale. În exemplul din figura 3, acest prag ne limitează la o planificare în avans cu cel mult trei operații astfel încât să minimizăm riscurile asociate cu o replanificare. Pentru AC, previziunea emergentă oferă informații legate de încărcarea resurselor unde urmează a fi executate operațiile. De asemenea, oferă informații despre timpul probabil de start la fiecare resursă în parte, timpul de așteptare și timpul de execuție, mecanism ce permite AC să: 1) intuiască timpul probabil în care produsul va fi finalizat; 2) evalueze performanța și certitudinea soluției descoperite; și 3) să stabilească gradul de angajament în ceea ce privește intenția de a utiliza o resursă sau alta. Câțiva algoritmi în care aceste informații pot fi valorificate în implementarea unor algoritmi inteligenți se pot consulta în [9]. Indiferent care sunt aceștia, important este faptul că ei constituie elemente particulare în sistemul de CPF, iar implementarea și validarea lor este un proces de optimizare continuă, care nu afectează funcționalitatea primară a sistemului (asigurarea CPF în limitele unui optim acceptabil).

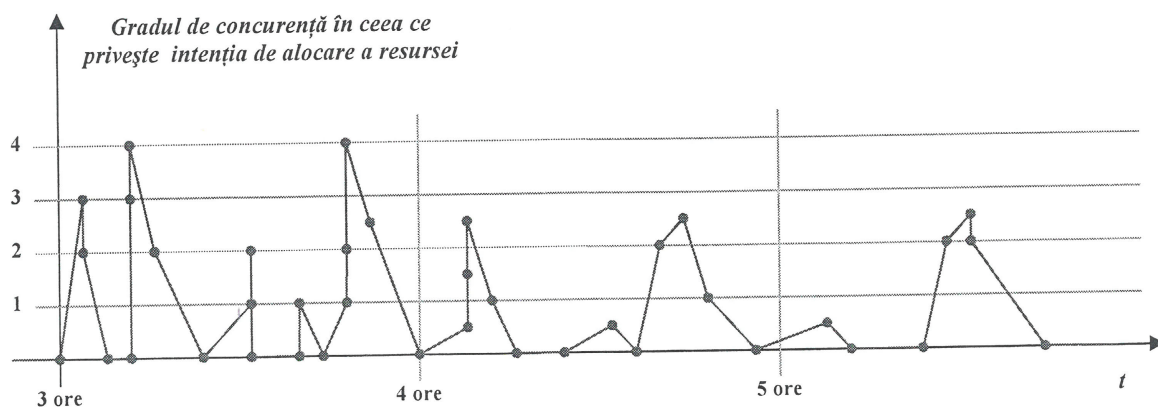


Figura 3. Prognostic pe termen scurt al comenzilor aflate în execuție care vor utiliza un echipament de transport

4.2. Investigarea încărcării resurselor

În paralel cu activitatea de explorare descrisă anterior, se poate executa și o activitate de propagare a intențiilor AC în ceea ce privește execuția anumitor operații din cadrul soluțiilor descoperite anterior. Această activitate se poate executa în paralel cu activitatea AE, fiind atribuită unor *agenți furnică* având cu un comportament diferit pentru *propagarea intențiilor* (AI). La fel ca în cazul AE, AI sunt trimiși cu o anumită frecvență de către AC pentru a obține serviciile AR. AC își exprimă în mod explicit intenția de utilizare a AR prin intermediul AI.

Pe baza informațiilor disponibile în structura de feromoni digitali depozitați de AE, AC selectează soluția considerată (mai) promițătoare în contextul de operare dat, după care își va propaga intenția de a accesa serviciile oferite de resursele implicate în soluția aleasă. Propagarea intențiilor este realizată de către AI prin execuția virtuală a operațiilor tehnologice rămase în planul de finalizare a comenzii. Rolul ei este ca, pe termen mediu, să ofere un mecanism dinamic de verificare a implicațiilor pe care le aduce o anumită soluție asupra performanței sistemului de CPF, iar pe termen scurt să permită resurselor implicate să-și optimizeze propriile activități. La fiecare resursă în parte, AI își exprimă intenția de rezervare a unei cuante de timp necesare execuției operației specifice la acea resursă, începând cu momentul probabil în care AC se va afla în faza respectivă de procesare. AR va verifica propriul jurnal, va alocă o cantă de timp pentru acea comandă și va furniza informații legate de performanța executării acelei operații. AR poate construi astfel o prognoză emergentă a utilizării resursei. Pe parcursul călătoriei sale de la o resursă la alta, AI colectează și reîmprospătează informațiile despre AR pe care i-a vizitat, astfel încât modificările survenite în sistemul de producție să poată fi detectate în timp util. Pentru a evita inconsistența în rezervarea AR, intenția fiecărui AC nu va fi memorată decât pentru o perioadă de timp (dependentă de frecvența cu care are loc propagarea intențiilor) de către AR. Cuantele de timp care au fost alocate inițial și care nu urmează să fie folosite imediat sunt realocate altor comenzi în funcție de gradul de angajament asociat unei intenții de utilizare a resursei și de valabilitatea informației respective (implementat prin mecanismul de evaporare asociat fiecărei informații depozitate în structura de feromoni digitali). Gradul de angajament descrește pe măsură ce operația este mai îndepărtată în planul de procesare; cu alte cuvinte pentru evitarea unui comportament haotic, se preferă pe termen scurt exploatarea unei soluții deja construite, iar pe termen mediu explorarea unor soluții promițătoare. În consecință, un AC trebuie să își reînnoiască intenția de a executa o operație în mod frecvent la o anumită resursă. Atunci

când își reînnoiește intenția, performanța intenției curente va fi reevaluată ținând cont de ultimele informații obținute în urma explorării.

De remarcat că, în cazul în care toți AC s-ar comporta identic, sistemul ar evolua într-o stare de dezordine. Un astfel de comportament trebuie ținut sub control prin îngrădirea frecvenței cu care un AC își poate schimba opțiunile în ceea ce privește intențiile de procesare imediate (mici modificări în performanță pot rezulta din schimbarea intenției AC, ceea ce poate conduce la o situație haotică). O astfel de situație este de fapt o situație de compromis. Dacă AC nu este conștient de schimbare sau nu vrea să facă o schimbare, va trebui să utilizeze o soluție cu performanțe scăzute. Pe de altă parte, dacă fiecare AC din sistem se comportă extrem de senzitiv, atunci mecanismul de prognoză emergentă va da greș și întregul sistem va deveni instabil. În general, acest compromis este dependent în totalitate de contextul operațional al atelierului de fabricație, parametrii fiind cei care trebuie ajustați și explorați în contextul optimizării PCF.

După cum s-a menționat anterior, la nivelul AR previziunea emergentă a încărcării resursei permite acestuia să-și gestioneze și să-și optimizeze propriile sarcini (stabilirea momentelor de întreținere a echipamentului într-o perioadă cu încărcare optimă). Spre exemplificare, în figura 3 este reprezentată intenția de alocare a unui echipament de transport, care deservește mai multe stații de lucru, aranjate în jurul unui echipament automat de stocare al containerelor. Astfel, perioadele de timp în care echipamentul nu va fi utilizat pot constitui oportunități de minimizare a timpului de transport global prin mutarea containerelor din echipamentul automat de stocare cât mai aproape de următoarea stație în care acesta urmează să fie procesate pe măsură ce spațiile respective de depozitare devin disponibile. Astfel de optimizări sunt realizate la nivel local de către AR destinat gestionării echipamentului de transport. O dată ce mecanismul a fost validat, el poate fi foarte ușor transferat în programele dedicate controlului aceluși echipament.

5. Utilizarea sistemului ca SSD

5.1. Etape de construire

Până în acest punct, articolul a descris modul în care comportamentul insectelor poate constitui o sursă fertilă de inspirație pentru ingineria unui sistem flexibil de CPF, care să permită optimizări ulterioare cu efort minim de implementare. Pe lângă furnizarea datelor generale de control al echipamentelor individuale, furnicile artificiale generează o prognoză de ansamblu la nivelul întregii întreprinderi, în baza intențiilor agenților.

Pentru a putea înțelege consecințele diferitelor tehnici de optimizare fie locale, la nivel de resurse, fie generale, la nivelul atelierului de producție – procesul de dezvoltare urmează trei etape distincte și anume: verificarea, validarea și simularea sistemului. Ca oglindire a practicilor de lucru, fiecare dintre aceste etape implică legătura strânsă cu procesele existente în mediul întreprinderii (așa cum sunt ele executate de către personalul său) în scopul identificării acelor cunoștințe tacite care sunt utilizate în optimizarea proceselor de fabricație. Ignorarea lor sau incapacitatea de a le transpune în mediul simulat, vor conduce fie la neîncrederea clientului în soluțiile propuse, fie la soluții care nu țin cont de realitatea existentă și care vor fi complet ignorate, indiferent de eficacitatea lor. Sunt nenumărate cazurile în care performanța reală a atelierului de producție era superioară celei rezultate în urma unor simulări ce foloseau algoritmi sofisticati de control, dar care ignorau aceste cunoștințe tacite, utilizate de personalul întreprinderii.

Prima etapă constă în *verificarea* funcționalității modelului fabricii în raport cu parametrii de proiectare, care să valideze ipoteze elaborate în timpul proiectării modelului conceptual. Ca rezultat al propagării intențiilor AC, se poate obține imediat o imagine generală asupra gradului în care componentele decizionale identificate dispun de informații relevante pentru luarea unor decizii locale. Toate procesele interne de logistică, de obicei ascunse și implicite în specificațiile descriptive, sunt evidențiate în mod detaliat (acoperirea necesarului de containere la o stație de lucru, disponibilitatea platformei de transport pentru cărucioare, succesiunea comenzilor realizate de operatorul uman etc.). Astfel, robustețea și precizia modelului conceptual sunt minuțios verificate fără a implica o reevaluare în cascadă a analizei efectuate anterior.

A doua fază, cea de *validare*, stabilește gradul în care modelul implementat este suficient de elaborat pentru a fi folosit în luarea unor decizii reale. Ea implică o strânsă colaborare cu clientul în scopul câștigării încrederii acestuia în tehnicile de optimizare propuse. Pentru SMA, această fază aduce cu sine două avantaje esențiale. În primul rând, ea conduce la păstrarea cunoștințelor tacite de optimizare, deja existente în fabrică (oportunitatea de a partaja un operator pe mai multe stații de lucru sau folosirea informațiilor spațiale în momentul stocării semifabricatelor pe baza criteriului de proximitate), a căror descoperire ar fi cel puțin cronofagă în momentul executării unor simulări. În al doilea rând, întrucât experții în optimizarea proceselor de fabricație întâmpină dificultăți în identificarea și comunicarea propriilor cunoștințe (sunt experți într-un anumit domeniu, nu și în propria expertiză), simularea oferă un mijloc eficient de comunicare pentru identificarea acestor informații cheie. În plus, abordarea inginerescă, bazată pe comportamentul

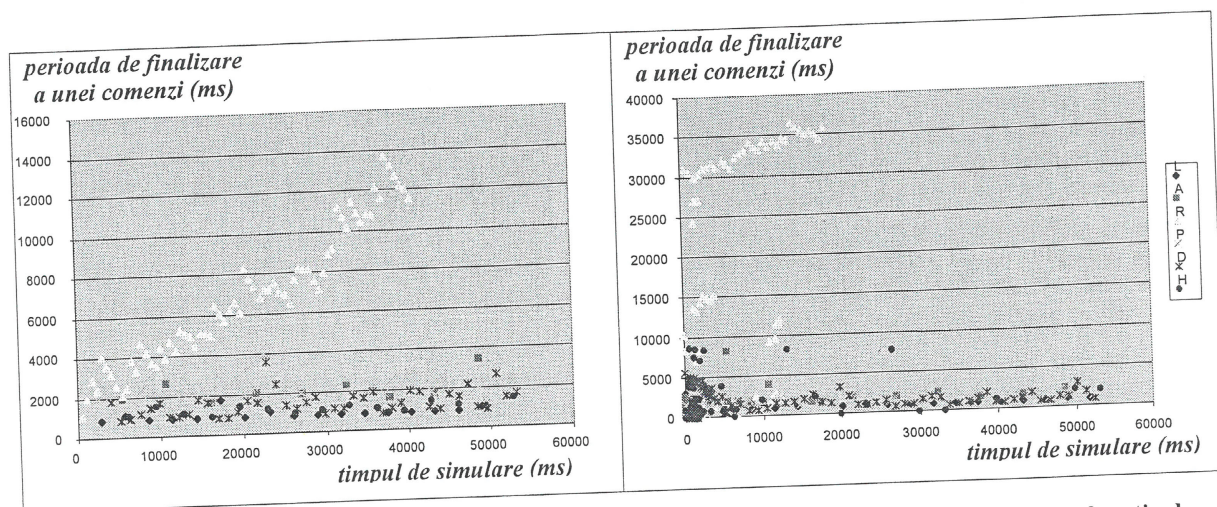


Figura 4. Modele diferite ale parametrilor de performanță ale unui atelier de producție în funcție de contextul operațional (fără inițializare și cu inițializare)

furnicilor, presupune și asumarea componentelor dinamice ale controlului fabricii, nu numai ale celor de natură statică. După parcurgerea acestor pași, soluțiile de optimizare se pot constitui în alternative relevante și acceptabile.

Etapa de *simulare* implică o investigare a corelațiilor dintre diferite variabile de control (de la regulile de expediere a comenzilor până la viteza de reacție a sistemului în propagarea intențiilor de procesare) și influența lor asupra criteriilor de performanță ale fabricii (gradul de utilizare a resurselor, timpul de execuție a unui tip de produs, capacitatea de fabricație etc.). Pentru abordarea prezentată, acest pas necesită schimbări la nivelul superior al sistemului fără a periclita funcționalitatea esențială a acestuia.

5.2. Modificări în timp real asupra configurației atelierului de producție

Ca înlocuitor al atelierului de producție, modulul de emulare poate facilita prin intermediul interfeței orice manipulare fezabilă care nu este constrânsă de realitatea fizică (deplasarea echipamentelor de transport, încărcarea unor stații de lucru cu semifabricate, oprirea unei mașini etc.). Cu alte cuvinte, CPF se poate realiza de către utilizator în tandem cu modulul de control fără riscul apariției unor incoerențe de coordonare. Acest lucru se întâmplă și în atelierele de producție reale, unde avem intervenții ale responsabilului de atelier în tandem cu procedurile de coordonare existente în fabrică. Toate modificările realizate de utilizator sunt automat reflectate în soluția modulului de control. Această funcționalitate este deosebit de utilă în contextul realizării unor analize dinamice bazate pe scenarii în timpul execuției simulării. „Perturbațiile” dirijate de utilizator permit înțelegerea modului în care sistemul va reacționa la schimbări ce sunt dependente de context, și care nu pot fi în mod eficient captate într-un model de simulare [2]. În plus, se permite îmbogățirea cunoștințelor decidenților prin crearea unor circumstanțe care derivă doar din anumite situații particulare și care uneori se pot întâlni în atelierul de producție. Deoarece toate aceste funcționalități trebuie să fie accesibile în timp real, ingineria unui sistem de CPF în baza paradigmei emergente inspirate din comportamentul coloniilor de furnici s-a dovedit a fi o soluție promițătoare [22].

În afara modificărilor asupra procedurilor de lucru existente, șefii unui atelier de producție se confruntă adesea cu situații în care se încearcă creșterea gradului de performanță sau de flexibilitate existent în fabrică. Acestea presupun modificări asupra configurației atelierului de producție (înlocuirea unor mașini, deplasarea unor echipamente, introducerea unor unități de transport suplimentare etc.). După o analiză a investiției, ele se realizează de obicei fără oprirea sistemului de producție. O astfel de decizie nu se restrânge numai la efectele de natură statică (performanța atelierului de producție în raport cu anumiți parametri de intrare: distribuția tipului de produse care intră în componența comenzilor, modificarea caracteristicilor produsului etc.), ci încearcă să găsească și mijloacele de contracarare a disfuncționalităților care decurg pe termen scurt din luarea acestor decizii. Efectele lor trebuie analizate, de asemenea, în timp real, ținând cont de comenzile care sunt deja în producție. De remarcat că toate aceste modificări nu implică decât manipulări la nivelul modulului de emulare, partea de control a sistemului fiind capabilă să reacționeze la aceste schimbări din mediu.

O altă situație des întâlnită la mediile de simulare a întreprinderii constă în incapacitatea intrinsecă de a capta starea curentă în care se află atelierul de producție. Fiind vorba de un sistem dinamic, această imposibilitate de a configura starea inițială a sistemului (ce comenzi se află în producție și care este starea semifabricatelor) va conduce la valori eronate în ceea ce privește performanța reală a atelierului, chiar și după așa numita „perioadă de încălzire” a sistemului.

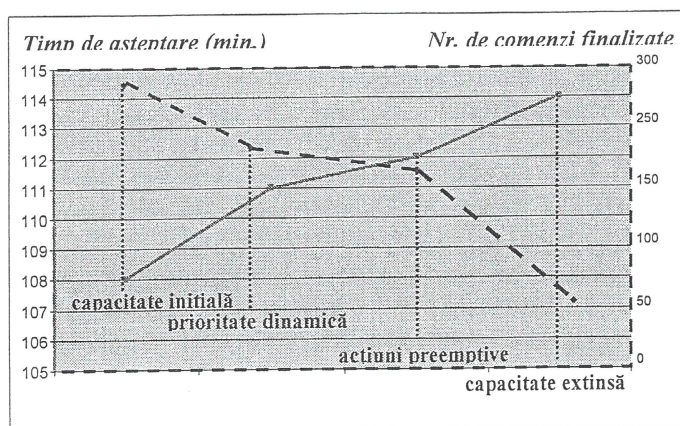


Figura 5. Efectul unor diferite strategii de optimizarea productivității unei stații de lucru

În afara exemplelor descrise în secțiunea 5.2., propagarea intențiilor permite identificarea ambuteiajelor în fluxul de producție. Acestea se manifestă la nivelul resurselor și au un caracter dinamic în funcție de structura comenzilor. Maniera tipică de a minimiza aceste efecte constă pe de o parte în disponibilizarea prioritară a acelor resurse care constituie la un moment dat un potențial punct de ambuteiaj, iar pe de alta, la selectarea din partea AC a acelor rute mai puțin aglomerate. Acest gen de decizie se poate realiza pe baza informațiilor disponibile local în structura de feromoni artificiali, care formează câmpuri de atracție pentru AR în deservirea prioritară a anumitor comenzi, iar pentru AC de a prefera anumite rute. Există diferite metode numerice pentru tratarea acestor situații inspirate din modul de alocare a sarcinilor [3]. În figura 5, pentru aplicația descrisă în [22] este reprezentat efectul unor astfel de strategii de optimizare asupra timpului de așteptare cumulat într-un an de zile, pentru aprovizionarea unei stații de lucru (reprezentat cu linie punctată) și productivitatea acesteia în comenzi onorate pentru aceeași perioadă de timp (reprezentată cu linie continuă). Inițial, s-a plecat de la starea existentă în care stația dispunea de un spațiu care permitea depozitarea a două containere cu materiale ce urmau a fi procesate („capacitate inițială”). S-au adăugat ulterior mecanisme în care unitățile de transport deserveau stațiile de lucru pe baza unor priorități dinamice care să reflecte intenția de utilizare imediată a stației („prioritate dinamică”). În fine, la acestea s-au adăugat și algoritmi de anticipare a nevoilor imediate ale stației de lucru, prin care echipamentele de transport acționau înainte ca operația curentă să fie finalizată („acțiuni preemptive”). De remarcat că utilizarea unor tehnici inteligente perfect fezabile printr-o abordare bazată pe paradigma emergentă poate aduce performanțe simțitor egale cu cele ale unor transformări costisitoare ale sistemului de producție real, cum ar fi extinderea capacității de depozitare la stația de lucru („capacitate extinsă”).

6. Observații și concluzii

Cercetările academice și aplicațiile industriale se află adesea într-o tensiune continuă. Cercetătorii se concentrează cu precădere asupra unor tehnologii particulare, căutând ulterior probleme reale în care să demonstreze eficacitatea lor, în timp ce oamenii din industrie au probleme concrete de rezolvat, fiind mai interesați de viteza și costurile asociate soluției propuse decât de eleganța sau complexitatea acesteia. Abordarea prezentată în acest articol are câteva precondiții de aplicabilitate: a) sistemul real controlat evoluează mult mai încet comparativ cu sistemul informatic de CPF; b) nu există o competiție în ceea ce privește alocarea unor resurse între sistemul de control și sistemul controlat (în telecomunicații de exemplu, unde acest concept a fost aplicat experimental, ambele sisteme partajează aceeași bandă de comunicații); c) există o motivație economică suficient de puternică pentru implementarea unui sistem de CPF mai performant.

Tendențele recente în arhitectura aplicațiilor informatice ne duc către utilizarea pe scară largă a agenților inteligenți. Unii cercetători proiectează acești agenți în aceeași manieră în care au fost implementate sistemele tradiționale. Examinarea sistemelor de agenți naturali sugerează principii diferite de abordare [13]: a) agenții trebui să corespundă unor lucruri, nu unor funcții; b) agenții trebuie să fie simpli; c) comunitatea de agenți trebuie să fie descentralizată și diversă; d) trebuie să existe mecanisme de memorare și partajare a ceea ce agenții reușesc să învețe despre mediul în care sunt situați; e) agenții trebuie să planifice și să acționeze în mod concurent. Aceste principii se dovedesc esențiale pentru CPF în noile forme de organizare ale întreprinderii, unde modularitatea și flexibilitatea atelierelor de fabricație ca precondiție a integrării lor în structuri de tip rețea, devin attribute strategice esențiale.

Mulțumiri. Primul autor dorește să mulțumească colegilor din echipa condusă de Paul Valckenaers de la universitatea K.U.Leuven împreună cu care o parte din rezultatele prezentate în această lucrare au fost realizate într-o atmosferă plăcută și stimulativă.

Abordarea prezentată, prin reflectarea la nivel de agent a componentelor cheie care intră în compunerea oricărui sistem de producție (produse, comenzi, resurse), permite inițializarea facilă cu aceste informații. Spre exemplificare, în figura 4 sunt reprezentate două modele de evoluție diferite ale performanțelor unui atelier de producție real în funcție de gradul în care acesta este capabil să capteze la inițializare starea curentă a comenzilor aflate în deja în execuție și care va influența perioada de finalizare a comenzilor.

5.3. Exemplificări de utilizare în optimizarea producției

Bibliografie

1. **BĂRBAT, B.E.:** Sisteme inteligente orientate spre agent, Editura Academiei Române, București, 2002.
2. **BĂRBAT, B.E., S.C. NEGULESCU, C.B. ZAMFIRESCU:** Boosting Synergy in Agent-Based Optimisation Tools, Scientific Bulletin of „POLITEHNICA” University of Timișoara, Transactions on Automatic Control and Computer Science, 49 (63), 4, 2004, pp. 119-124.
3. **BONABEAU, E., M. DORIGO, G. THERAULAZ:** Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Oxford University Press, 1999.
4. **BUSSMANN, S., K. SCHILD:** Self-Organizing Manufacturing Control: An Industrial Application of Agent Technology, Proc. 4th Int. Conf. on Multi-Agent Systems, pp.87-94, Boston, MA, USA, 2000.
5. **DORIGO, M., G. DI CARO:** The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic, New Ideas in Optimization, MCGRAW-HILL, London, 1999.
6. **DUFFIE, N.:** Synthesis of heterarchical manufacturing systems, Computers in Industry, Vol.14, 1990, pp.167-174.
7. **FILIP, F.G.:** Sisteme suport pentru decizii, Editura Tehnică, București, 2004.
8. **GRASSE, P.P.:** La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez bellicositermes natalensis et cubitermes sp. La theorie de la stigmergie: essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs, Insectes Sociaux 6, 1959, pp. 41 – 81.
9. **HADELI, P. VALCKENAERS, B.S. GERMAIN, P. VERSTRAETE, C.B. ZAMFIRESCU, H.V. BRUSSEL:** Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control, AAMAS-ESOA Workshop 2004, Columbia, USA, 2004.
10. **IMS-NOE:** www.ims-noe.org, 2004.
11. **NEGULESCU, S.C., B.E. BĂRBAT:** Enhancing the Effectiveness of Simple Multi-Agent Systems through Stigmergic Coordination, Fourth International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2004), ICSC-NAISO Academic Press Canada, 149, 2004.
12. **ODELL, J., H.V.D. PARUNAK, B. BAUER:** Representing Agent Interaction Protocols in UML, Paolo Ciancarini, Michael Wooldridge (Eds.): Agent-Oriented Software Engineering, First International Workshop, 2000, pp. 121-140.
13. **PARUNAK, H.V.D.:** „Go to the Ant”: Engineering principles from natural multi-agent systems, Annals of Operations Research, Special Issue on Artificial Intelligence and Management Science, 75, 1997, pp. 69–101.
14. **PARUNAK, H.V.D., A.D. BAKER, S.J. CLARK:** The AARIA Agent Architecture: An Example of Requirements Driven Agent-Based System Design, in Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents, pp.482-483 Marina del Rey, CA., 1997.
15. **PARUNAK, H.V.D.:** Agents in Overalls: Experiences and Issues in the Development and Deployment of Industrial Agent-Based Systems, Int. J. Cooperative Inf. Syst. 9(3), 2000, pp. 209-228.
16. **SAUCER, J.:** Knowledge-Based Systems techniques and Applications in Scheduling, Knowledge-Based Scheduling Techniques in Industry, in Jain, L. (ed.): Intelligent Techniques in Industry, CRS Press, 1999.
17. **SMITH, S.F., M.A. BECKER:** An Ontology for Constructing Scheduling Systems, Proceedings of AAAI, Spring Symposium on Ontological Engineering, 1997.
18. **VALCKENAERS, P., H. VAN BRUSSEL, M. KOLLINGBAUM, O. BOCHMANN:** Multi-agent coordination and control using stigmergy applied to manufacturing control, in Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol.2086, Springer, Berlin, 2001, pp. 317-334.
19. **VAN BRUSSEL, H., J. WYNS, P. VALCKENAERS, L. BONGAERTS, P. PEETERS:** Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, Computers in Industry 37, 1998, pp. 255- 274.
20. **WOOLDRIDGE, M., N.R. JENNINGS:** Intelligent Agents: Theory and Practice, Knowledge Engineering Review 10, 2, 1995.
21. **ZAMBONELLI, F., H.V.D. PARUNAK:** Signs of a Revolution in Computer Science and Software Engineering, in Paolo Petta, Robert Tolksdorf, Franco Zambonelli (Eds.): Engineering Societies in the Agents World III, Third International Workshop: 2002, pp. 13-28.
22. **ZAMFIRESCU, C.B., P. VALCKENAERS, HADELI, H. VAN BRUSSEL, B.S. GERMAIN:** A Case Study for Modular Plant Control, in Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing, Springer Verlag, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2744, 2003.