

Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Montagem de Auto-Rádios

Luís Pinto Ferreira * Guilherme A. Pereira † Ricardo J. Machado ‡

* Departamento de Engenharia da Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão, Instituto Politécnico do Porto
luisferreira@eseig.ipp.pt

† Departamento de Produção e Sistemas, Universidade do Minho
gui@dps.uminho.pt

‡ Departamento de Sistemas de Informação, Universidade do Minho
rmac@dsi.uminho.pt

Abstract

This paper reports the development of a computer application to support the decision making, based on an automatic generation of simulation models, according to different control strategies, to support the redefinition of materials flow processing along an electronic industry production line. An auto-radio production line was chosen, where the transport and respective decisions are made automatically and are coordinated by a control system. The simulation environment (ARENA) is employed in order to allow the production engineer to validate the impact of the control strategies on production. This contributes to an improved specification, characterization and definition of the most efficient control system. For this purpose, six strategies were investigated. The innovative part of this system can be seen in its generic character of both the high level of flexibility from the point of view of physical processing and control strategies and its capacity for parameterization - this flexibility is achieved by means of automatic generation of Arena Models. An additional contribution is the integration, in the simulation environment, of an automatic report generator showing the main performance measures of the models, in which information is accessed via graphics, thereby providing a friendly interface for the user.

Resumo

Neste artigo apresenta-se uma aplicação informática para apoio à decisão, visando a geração automática de modelos de simulação com diferentes estratégias de controlo para a redefinição de fluxos de processamento de materiais ao longo de uma linha de produção da indústria electrónica. Esta linha de produção é constituída por linhas de fabrico de auto-rádios em que o transporte e a respectiva decisão são realizados de uma forma automática, e sob a coordenação de um sistema de controlo. Pretende-se que o recurso à simulação em

ambiente ARENA permita, ao engenheiro de produção, validar o impacto das estratégias de controlo na produção, contribuindo para uma melhor especificação, caracterização e definição do mais eficaz sistema de controlo; para isso, foram analisadas seis estratégias. A característica inovadora deste sistema reside no seu carácter genérico; no elevado índice de flexibilidade, do ponto de vista do processo físico e das estratégias de controlo, e nas facilidades de parametrização - esta flexibilidade é conseguida através da geração automática de Modelos em Arena. Um contributo adicional deste trabalho consistiu na integração no ambiente de simulação de um gerador automático de relatórios, reveladores dos principais índices de desempenho dos modelos em presença, nos quais o acesso à informação é feito através de gráficos, proporcionando uma interface amigável com o utilizador.

Keywords: Simulation, Decision Making Support Models, Production Line

Title: Automatic Generation of Simulation Models of an Auto-Radio Production Line

1 Introdução

O trabalho desenvolvido foi realizado no âmbito do projecto “*MethoDES: Methodologies and Tools for Developing Complex Real-Time Embedded Systems*”, apoiado pela FCT¹/MCES² (POSI CHS/37334/2001), que contou com a colaboração de diversas instituições, a saber: Centro Algoritmi (Universidade do Minho), National Instruments, IDITE-Minho e Instituto Politécnico do Porto. Foi objectivo deste trabalho (Vieira 2002, Ferreira 2003) desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão que faculte a geração automática de modelos de simulação, para retratar diferentes cenários de uma linha de montagem de auto-rádios, com recurso à selecção de diferentes estratégias de controlo para a redefinição de fluxos de materiais. Do ponto de vista da abordagem à simulação, e no âmbito deste trabalho, dotou-se a ferramenta Arena da capacidade de gerar automaticamente modelos de simulação, em oposição à abordagem tradicional em que cada modelo é construído manualmente para cada cenário. O desenvolvimento desta versão adaptada da ferramenta Arena permite explorar, num reduzido período de tempo, um número elevado de cenários, e obter, também automaticamente, relatórios com os respectivos índices de desempenho. Os autores não conhecem abordagens semelhantes a esta, nem tão pouco com este grau de flexibilidade e automatização. Na literatura da especialidade apenas surgem trabalhos que introduzem algum grau de flexibilidade no modelo de simulação a ser construído, através da parametrização de diferentes variáveis, de forma a permitir avaliar o seu impacto no desempenho do sistema. Como exemplo desses trabalhos citamos os de (Alvarez *et al.* 1999) e (Ramis *et al.* 2001), nos quais a simulação é usada para aferir, no sector da saúde, diferentes alternativas de escalonamento dos recursos.

As estratégias analisadas no presente trabalho pretendem facultar a possibilidade de avaliar o impacto que diferentes soluções de gestão de fluxos irão ter na produção. A definição de regras de optimização do desempenho passa, necessariamente, por essa avaliação, de forma a evitar o surgimento de situações que corresponderiam a estados de controlo menos eficazes. Note-se, todavia, que a ferramenta proposta se destina, quase exclusivamente, a dar resposta a um determinado tipo-padrão de configuração de linhas de produção. A linguagem de si-

¹Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

²Ministério da Ciência e do Ensino Superior.

mulação utilizada neste trabalho foi o ARENA (Kelton *et al.* 2002), dado que a sua estrutura hierárquica oferece diferentes níveis de flexibilidade, possibilitando a construção de modelos extremamente complexos, aliados a uma forte componente visual. Todavia, para concretizar o objectivo acima descrito, foi necessário resolver determinados problemas que, cientificamente, formam a base deste trabalho, designadamente:

1. Generalizar diferentes fluxos de materiais, isto é, flexibilizar a ferramenta quer quanto à configuração física da linha de produção, quer quanto às estratégias de controlo utilizadas na produção.
2. Afectar esses fluxos a estratégias particulares que controlem o acesso dos auto-rádios aos nós³, de modo a evitar potenciais acidentes (por exemplo, choques de auto-rádios), e possibilitem a avaliação, por parte dos potenciais utilizadores desta ferramenta, do impacto que a implementação de estratégias alternativas de controlo irão ter no desempenho da linha de produção.
3. Integrar no ambiente de simulação, um gerador genérico de relatórios que, no termo do processo de simulação, apresente automaticamente, sob a forma de gráficos, relatórios contendo toda a informação julgada necessária para uma correcta avaliação do processo produtivo.

A complexidade dos sistemas de produção, nos nossos dias, vem justificando a utilização de técnicas de simulação, na detecção de problemas críticos durante o projecto, planeamento, implementação e operação de novos sistemas, ou ainda na análise (diagnóstico) de sistemas existentes e no estudo de alterações (prognóstico) com vista à melhoria do seu desempenho (Ferreira 1995). A simulação é uma das ferramentas da Investigação Operacional mais divulgadas e utilizadas na área dos sistemas produtivos (Kalasky 1996). O progresso tecnológico pode ter um impacto dramático no sistema produtivo, em áreas como: a informação, os recursos humanos, os equipamentos e os materiais. Em (Kalasky 1996) conclui-se que a duração dos ciclos de produção está a decrescer significativamente em resultado do aparecimento de novas tecnologias; a sua utilização deve ser feita de um modo equilibrado, designadamente, tendo em atenção o seu contributo para melhorar o desempenho do sistema, os custos e o tempo associados, bem como o valor acrescentado ao produto final.

2 Descrição do Sistema Real

O trabalho desenvolvido tem por referência o Sistema de Controlo das Linhas Hidro (SCLH) responsável pela coordenação de um conjunto de linhas de produção de auto-rádios, instaladas na fábrica da BLAUPUNKT AUTO-RÁDIO PORTUGAL, LDA, em Braga, Portugal.

As Linhas Hidro consistem em linhas de fabrico de auto-rádios em que o transporte e a condução dos auto-rádios são realizados de uma forma automática e sob a coordenação de um sistema de controlo cuja implementação actual recorre a um autómato programável e a um PC⁴. Nestas linhas, o sistema de transporte é composto por várias passadeiras rolantes e

³Zona de processamento.

⁴Computador Pessoal.

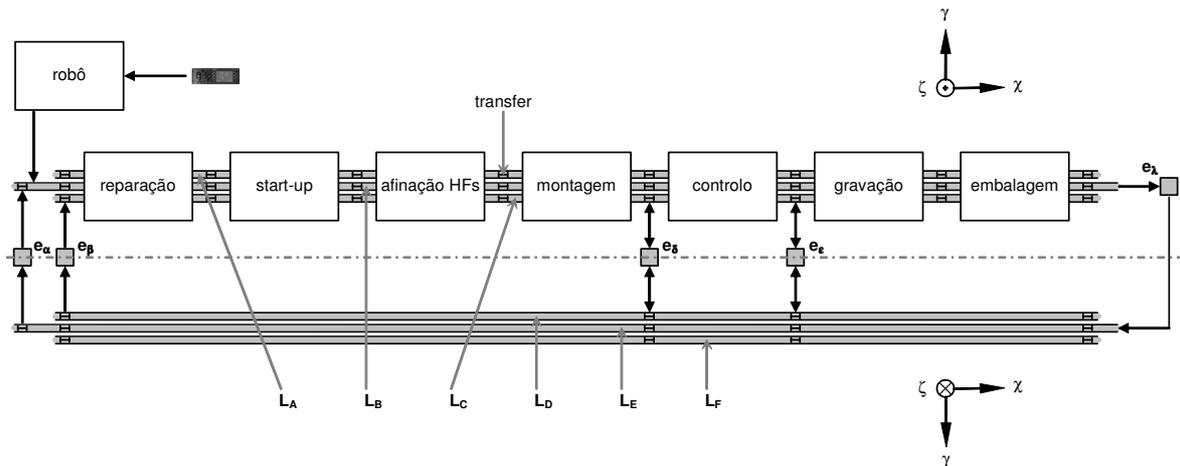


Figura 1: Esquema geral das linhas Hidro.

elevadores, por onde circulam paletes, sobre os quais se colocam os auto-rádios. É também possível que paletes vazias circulem ao longo da linha, nomeadamente quando um auto-rádio é embalado, pois a paleta é reencaminhada para o início da linha para colocar um novo auto-rádio em produção (Fernandes 2000, Machado 2000). Estas linhas realizam um processamento em *pipeline* dos auto-rádios, estando as várias unidades de processamento (postos) dispostas sequencialmente ao longo da linha, com a exceção dos postos de reparação que, apesar de consistirem na primeira unidade de processamento das linhas, não fazem parte do processamento sequencial primário (ver figura 1).

Os blocos representados na figura 1 (reparação, start-up, afinação HFs, montagem, controlo, gravação e embalagem) correspondem a zonas de processamento, podendo cada zona ser composta por vários postos de trabalho, todos eles situados nos seus extremos.

Através do controlo do acesso dos auto-rádios às diferentes zonas de processamento, é possível generalizar diferentes fluxos de materiais. A cada uma destas zonas é também, dada ao longo deste trabalho, a designação de nó. Assim, sempre que se refira a circunstância de um auto-rádio ter ou não ter acesso ao nó, deverá entender-se como a possibilidade de ele aceder àquelas zonas de processamento.

Cada Linha Hidro pode ser composta por cinco ou seis linhas de transporte de auto-rádios, três superiores, designadas de L_A , L_B , L_C , (cada uma com um sistema de passadeiras com um movimento uniforme no sentido crescente do eixo Ox), e duas ou três inferiores, designadas de L_D , L_E , L_F , (cada uma com um sistema de passadeiras com um movimento uniforme no sentido decrescente do eixo OX):

1. Linha de transporte superior L_B . Esta linha serve, essencialmente, para transportar auto-rádios entre postos não sequenciais.
2. Linhas de transporte superior L_A e L_C . Estas linhas servem, principalmente, para fornecer auto-rádios aos *buffers* dos postos e, eventualmente, para transportar auto-rádios entre postos sequenciais.
3. Linhas de transporte inferior L_D , L_E e L_F . Qualquer uma destas três linhas realiza:

- (a) O encaminhamento de auto-rádios avariados para os postos de reparação (principalmente L_D).
- (b) A realimentação dos postos que, devido a *buffers* cheios, não aceitaram mais auto-rádios.
- (c) O transporte de paletes vazias até ao início da linha (principalmente L_E).

As diversas Linhas Hidro, instaladas na fábrica da BLAUPUNKT, não possuem todas a mesma configuração; as diferenças mais flagrantes que entre elas se verificam referem-se ao posicionamento dos elevadores, bem como ao número de linhas de transporte inferiores. Nos casos em que apenas há 2 linhas inferiores, considera-se que não existe a linha L_F (Fernandes 2000, Machado 2000). Existe ainda um robô que recebe os auto-rádios provenientes dos sub-processos de fabrico anteriores (inserção de componentes) e que os coloca na linha de transporte L_B , logo a seguir ao elevador e_α . Os *transfers* permitem realizar a movimentação de paletes entre linhas de transporte do mesmo plano e entre as linhas de transporte e os elevadores. Adicionalmente, existem, nas implementações actuais, cinco elevadores (designados de e_α , e_β , e_δ , e_ε , e_λ) que estabelecem a ligação entre as linhas de transporte, superior e inferior:

1. *Elevador e_α* . Este elevador realiza transportes unicamente de L_E para L_B , com o objectivo principal de fornecer paletes vazias para que mais auto-rádios dêem entrada nas linhas de transporte superior, por intermédio do robô, para serem processados.
2. *Elevador e_β* . Este elevador realiza transportes unicamente de L_D para L_C , essencialmente para encaminhar auto-rádios avariados para os postos de reparação, ou para realimentar postos a jusante (todos os postos estão a jusante de e_β) que, devido a *buffers* cheios, não aceitaram mais auto-rádios.
3. *Elevadores e_δ e e_ε* . Estes elevadores realizam transportes nos dois sentidos: (i) de L_C para L_D , essencialmente para encaminhar auto-rádios avariados para os postos de reparação, ou para realimentar postos a montante (reparação, start-up, afinação de HF's e montagem e, no caso de e_ε , também controlo) que, devido a *buffers* cheios, não aceitaram mais auto-rádios; (ii) de L_D para L_C , essencialmente para realimentar postos a jusante (controlo e, no caso de e_ε , também gravação e embalagem) que, devido a *buffers* cheios, não aceitaram mais auto-rádios.
4. *Elevador e_λ* . Este elevador realiza transportes unicamente de L_B para L_E , com o objectivo principal de encaminhar paletes vazias, libertadas por auto-rádios entretanto embalados, até ao início da linha HIDRO e, eventualmente, para realimentar postos a montante (gravação e embalagem) que, devido a *buffers* cheios, não aceitaram mais auto-rádios, ou para encaminhar auto-rádios avariados para os postos de reparação.

Os nós, compostos por *transfers*, permitem que os auto-rádios possam ser mudados de linha (no mesmo plano) ou que sejam enviados para os elevadores (para mudar de plano). Os elevadores, tal como foi referido anteriormente, estabelecem as ligações entre as linhas do plano superior e as linhas do plano inferior. Apesar dos elevadores fazerem movimentos nos dois sentidos do eixo Oz, o transporte de paletes (com ou sem auto-rádios) pode ser restringido a apenas um sentido (Fernandes 2000, Machado 2000).

3 Estratégias Analisadas

A aplicação informática apresentada neste artigo tem por base o modelo das Linhas Hidro da Blaupunkt, já oportuna e pormenorizadamente descritas, e tem por objectivo ser um protótipo para aferir o impacto que determinadas decisões estratégicas de fluxos de materiais poderão produzir no funcionamento daquele tipo de linhas. A especificação do sistema de controlo ideal responsável pelo fluxo de materiais ao longo das Linhas Hidro requer, necessariamente, uma correcta avaliação do impacto que a definição de diferentes estratégias de controlo ocasiona na produção. Estas estratégias têm por função definir, com o rigor possível, as regras de prioridade a estabelecer, sempre que, no mesmo instante, mais do que um auto-rádio se encontra em condições de acesso aos nós das Linhas Hidro. Na sua formulação, é imperioso ter em conta a impossibilidade de mais que um auto-rádio ocupar, no mesmo instante, no interior dos nós, o mesmo espaço físico, para evitar situações de bloqueio, com choques de auto-rádios, cuja ocorrência afectaria, seriamente, o desempenho global das linhas de transporte. Na aplicação desenvolvida, o destino dos auto-rádios dentro dos nós, zonas de processamento, é gerado aleatoriamente pelo programa, tendo em conta se aí existe, ou não, elevador. A este propósito, se refere que não foi objectivo deste trabalho gerir o destino dos auto-rádios, mas sim, controlar o seu acesso aos nós.

3.1 Definição das Estratégias

A implementação de um eficaz sistema de controlo responsável pelo fluxo de materiais ao longo das Linhas Hidro exige a prévia caracterização, bem como a definição de diferentes estratégias para, adequadamente, disciplinar o acesso dos auto-rádios aos nós. Nesse sentido, se apresenta em termos genéricos, na figura 2, o fluxograma de controlo do acesso dos auto-rádios aos nós o qual, servindo de suporte a cada uma das seis estratégias definidas no âmbito deste trabalho, permite determinar quais os auto-rádios que podem avançar, de modo a, respeitando a capacidade do nó, previamente parametrizada, evitar potenciais acidentes (v.g.⁵ choques de auto-rádios). As estratégias definidas com o objectivo acima explícito, apenas divergem entre si, no modo como, para cada uma, se efectua o cálculo dos valores do *factor Prioridade*, considerando-se prioritário o auto-rádio no qual este factor tenha módulo de menor valor. Por exemplo, um auto-rádio de factor igual a zero terá prioridade, relativamente a outro, cujo factor seja igual a um. Um outro elemento regulador que possibilita o ordenamento dos auto-rádios quanto ao *factor Prioridade*, diz respeito a situações nas quais o valor em módulo, desse factor, seja igual. Nestes casos, o critério de decisão estabelece-se em função do valor do índice da linha, considerando-se prioritário o auto-rádio cujo índice seja de menor valor.

Para a correcta compreensão do fluxograma apresentado na figura 2, se esclarece:

- O sentido do termo *cruzamento*, que integra a citação: “*Ocorre cruzamento entre o auto-rádio que ocupa essa posição e os auto-rádios que constam da Lista de Saída?*”, significa *colisão*; uma vez que, em circunstância alguma é possível, dois auto-rádios ocuparem, no mesmo instante, o mesmo espaço físico; para este efeito, ter-se-á em conta a posição de origem e o destino de cada um dos auto-rádios.

⁵ *Verbi Gratia* = por exemplo.

- O sentido do termo *capacidade*, refere-se ao número máximo de auto-rádios que podem circular, em simultâneo, dentro de um determinado nó.
- Lista de Entrada é a ordenação dos auto-rádios, pelo seu grau de prioridade, em função do índice das respectivas linhas.
- Lista de Saída indica os auto-rádios aos quais, em função do índice da respectiva linha, será dada autorização para avançar.
- Apenas se mandar avançar determinado conjunto de auto-rádios, quando o conjunto anterior tenha já abandonado o nó. Este facto justifica-se pela circunstância de, no sistema real, se utilizar idêntico procedimento.

Apresentar-se-ão, em seguida, diferentes cenários, que exemplificam situações típicas de funcionamento de cada uma das 6 estratégias de controlo desenvolvidas, bem como serão inseridos alguns comentários, para a correcta compreensão das regras que originaram determinados comportamentos, e se descreve o processo seguido para o cálculo do *factor Prioridade*.

Estratégia 1

- Dar prioridade aos auto-rádios situados nas filas de espera de acesso aos nós de maior comprimento.

O objectivo que determinou o desenvolvimento desta estratégia foi minimizar, quanto possível, o tamanho das filas de espera, nas linhas de acesso aos nós. Desta forma, tem a prioridade máxima o auto-rádio situado em primeiro lugar na fila de espera cujo comprimento, comparativamente ao das restantes filas do mesmo nó, seja maior. Assim, para cada linha, conforme figura 2, o cálculo do *factor Prioridade* obtém-se da seguinte forma:

$\text{valor} = \text{dimensão máxima da fila de espera do respectivo nó}$ $\text{factor Prioridade} = \text{dimensão da fila de espera} - \text{valor}$
--

Como exemplo da aplicação desta estratégia, na figura 3, observa-se um cenário em que o auto-rádio #2, tem prioridade máxima, pois situa-se na linha L_B , cuja fila de espera é de maior comprimento. Deste modo, o auto-rádio #2 tem autorização para entrar no nó, e realizar o seu trajecto para L_A . Em consequência, o auto-rádio #1, de menor prioridade, não tem permissão para avançar, uma vez que se cruzaria no seu trajecto com o auto-rádio #2. Assim, em face da aplicação desta estratégia, resulta a decisão de mandar avançar apenas os auto-rádios #2 e #3, cujos índices das linhas, de acordo com o fluxograma de controlo do acesso dos auto-rádios aos nós (ver figura 2), constam da Lista de Saída, referida na tabela da figura 3. Neste cenário, é fisicamente possível realizar a movimentação dos auto-rádios #2 e #3 em paralelo, uma vez que existe um desfasamento temporal na realização dos respectivos percursos.

Estratégia 2

- Dar prioridade aos auto-rádios cujo percurso a executar dentro do nó é menor.

A implementação desta estratégia teve como objectivo proporcionar ao utilizador desta ferramenta de apoio à decisão, o ensejo de avaliar o impacto causado no desempenho do

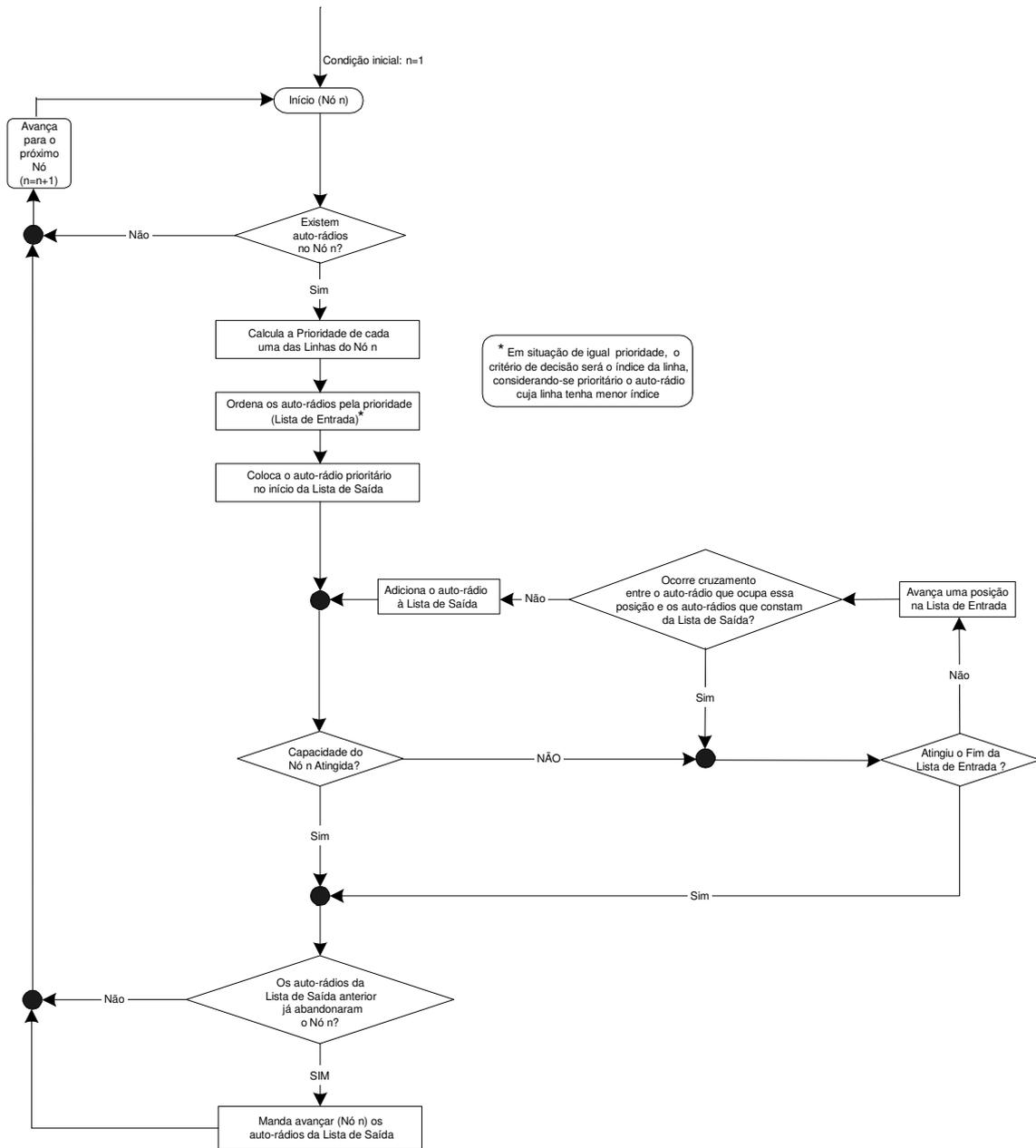


Figura 2: Fluxograma de controlo do acesso dos auto-rádios aos nós.

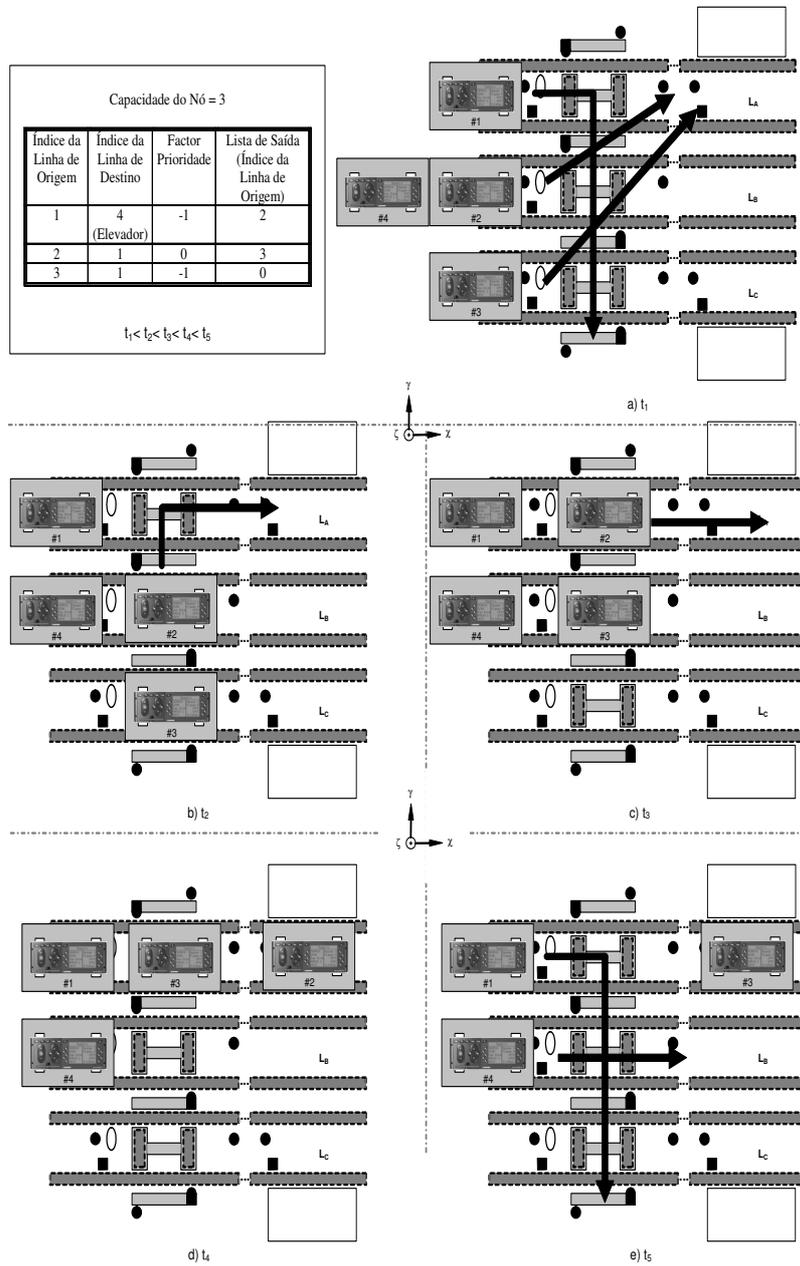


Figura 3: Cenário de funcionamento da estratégia 1.

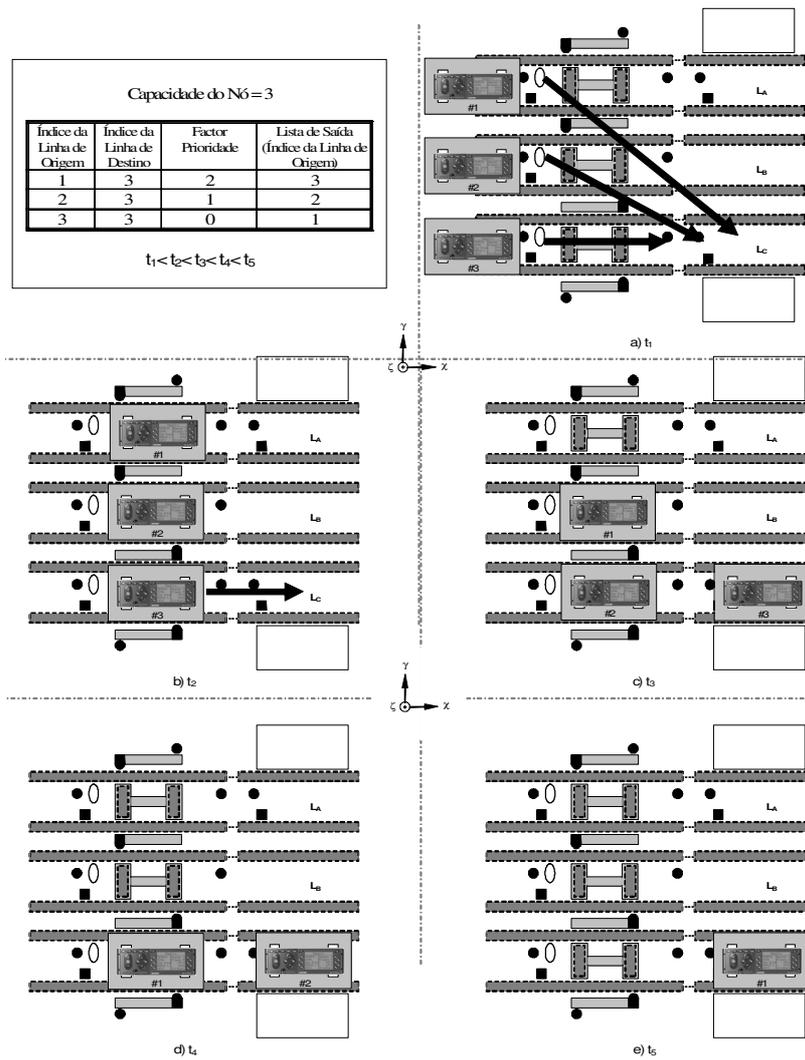


Figura 4: Cenário de funcionamento da estratégia 2.

sistema, quando se considera prioritário o auto-rádio que executa o menor percurso dentro do nó. Nesta estratégia, o cálculo do *factor Prioridade* realiza-se do seguinte modo:

$$\text{factor Prioridade} = \text{índice da linha de destino} - \text{índice da linha de origem}$$

Na figura 4, observa-se um cenário resultante da aplicação desta estratégia, em conformidade com o qual se constata que, apesar de os auto-rádios #1, #2 e #3, apresentarem diferentes níveis de prioridade (ver tabela da figura 4), é possível a sua movimentação em paralelo dentro do nó, sem que se verifique a ocorrência de quaisquer cruzamentos. Deste modo, dar-se-á permissão de acesso ao nó, a todos os auto-rádios.

Estratégia 3

- Definir diferentes níveis de prioridade em função do tipo de auto-rádio.

O objectivo desta estratégia é controlar o acesso dos auto-rádios aos nós, através da atribuição de diferentes níveis de prioridade a cada um dos três tipos de auto-rádios existentes no sistema. Assim, em função da hierarquia estabelecida pelo utilizador, será atribuído a cada um dos tipos de auto-rádios, um diferente valor para o factor Prioridade.

Na figura 5, é possível observar um exemplo do funcionamento desta estratégia, na qual o utilizador considerou, por ordem decrescente de prioridade, os auto-rádios dos tipos, a saber: três (3), dois (2) e um (1). Neste caso, o auto-rádio ao qual é conferida maior prioridade é o auto-rádio do tipo três (3), auto-rádio #3, situado na linha L_C . Em consequência da aplicação desta estratégia, usufruem de permissão de acesso ao nó, os auto-rádios #3 (tipo 3) e #2 (tipo 2), os mais prioritários, cujo encaminhamento é possível ser efectuado em paralelo, sem quaisquer hipóteses de se verificarem fenómenos de colisão. Por outro lado, verifica-se que o auto-rádio #1 (tipo 1), situado em L_A , terá de aguardar à entrada do nó, que os auto-rádios #3 e #2, executem o seu percurso, uma vez que, a ser-lhe dada autorização para entrar no nó, se cruzaria com os outros auto-rádios.

Estratégia 4

- Prioridade definida em função da ordem crescente ou decrescente do índice de cada uma das linhas de acesso aos nós.

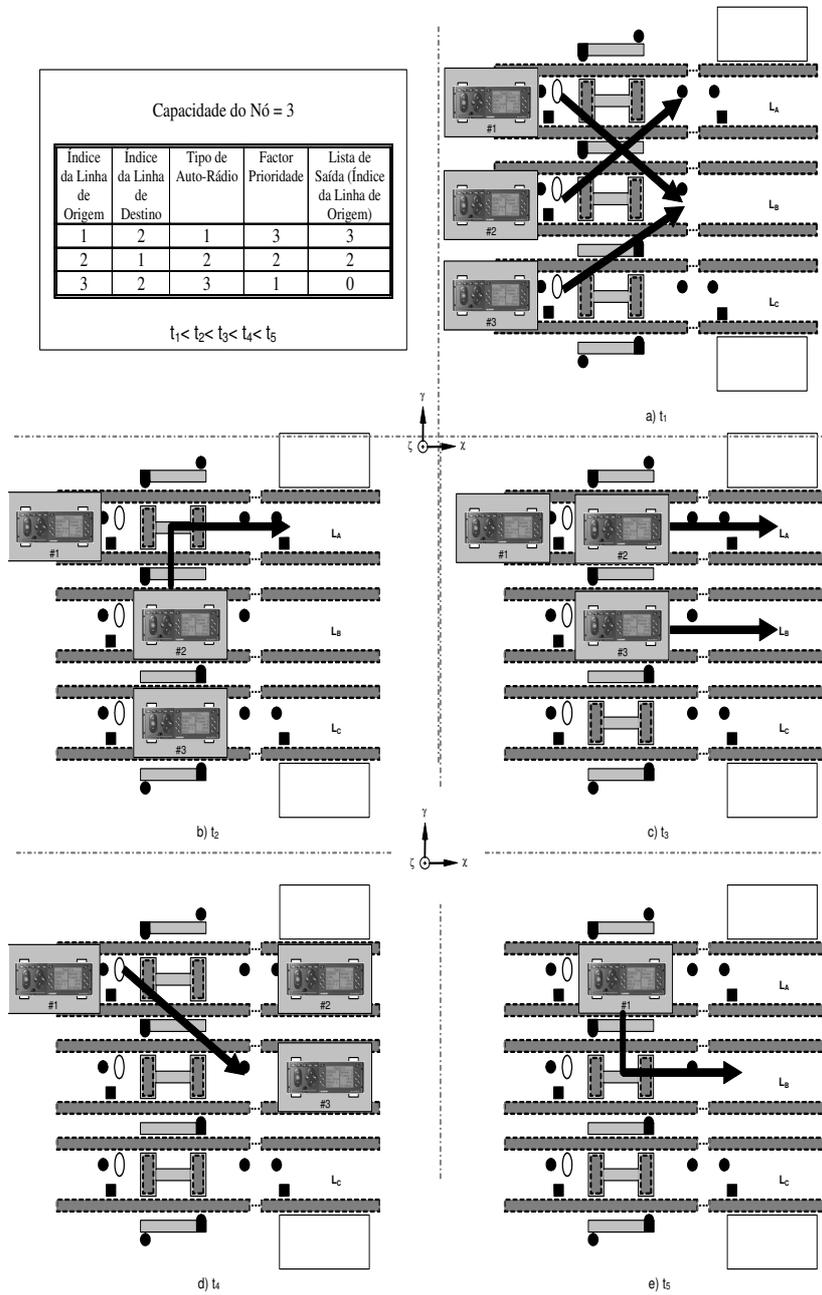
O desenvolvimento desta estratégia teve como finalidade proporcionar ao utilizador a simulação de diferentes modelos nos quais o critério de decisão para o estabelecimento da prioridade é definido em função do índice das linhas de acesso aos nós. Para esse efeito, se disponibilizaram duas opções, a saber:

- Por ordem crescente do índice das linhas (Opção 1).
- Por ordem decrescente do índice das linhas (Opção 2).

O cenário representado através da figura 6, elucidativo da implementação da estratégia 4 (Opção 1), revela que os auto-rádios situados nas linhas de menor índice, são os mais prioritários. Assim sendo, o auto-rádio #1, tem prioridade máxima, pois se situa na linha L_A , cuja índice, igual a um (1), é o menor. Por esta razão, da aplicação desta estratégia resulta a decisão de mandar avançar os auto-rádios #1 e #2, uma vez que, sendo os mais prioritários, podem movimentar-se em paralelo, não se cruzando no seu percurso. Não é possível autorizar o acesso do auto-rádio #3 ao nó pois, o seu acesso à linha L_B , ocasionaria, na sua trajectória, uma situação de colisão com o auto-rádio #1, mais prioritário, o qual chegou ao nó através da linha L_A e se destina ao elevador.

Estratégia 5

No âmbito deste trabalho em que se pretende construir uma ferramenta de simulação que permita aferir o impacto das estratégias de controlo no funcionamento do sistema de produção em estudo, entendeu-se que seria interessante desenvolver estratégias de encaminhamento de auto-rádios ao longo da linha de produção, as quais, em função de determinadas condições do sistema, de uma forma dinâmica e automática, possibilitassem utilizar algumas das estratégias anteriormente referidas, para a geração de fluxos de materiais. Assim, nesta estratégia, o



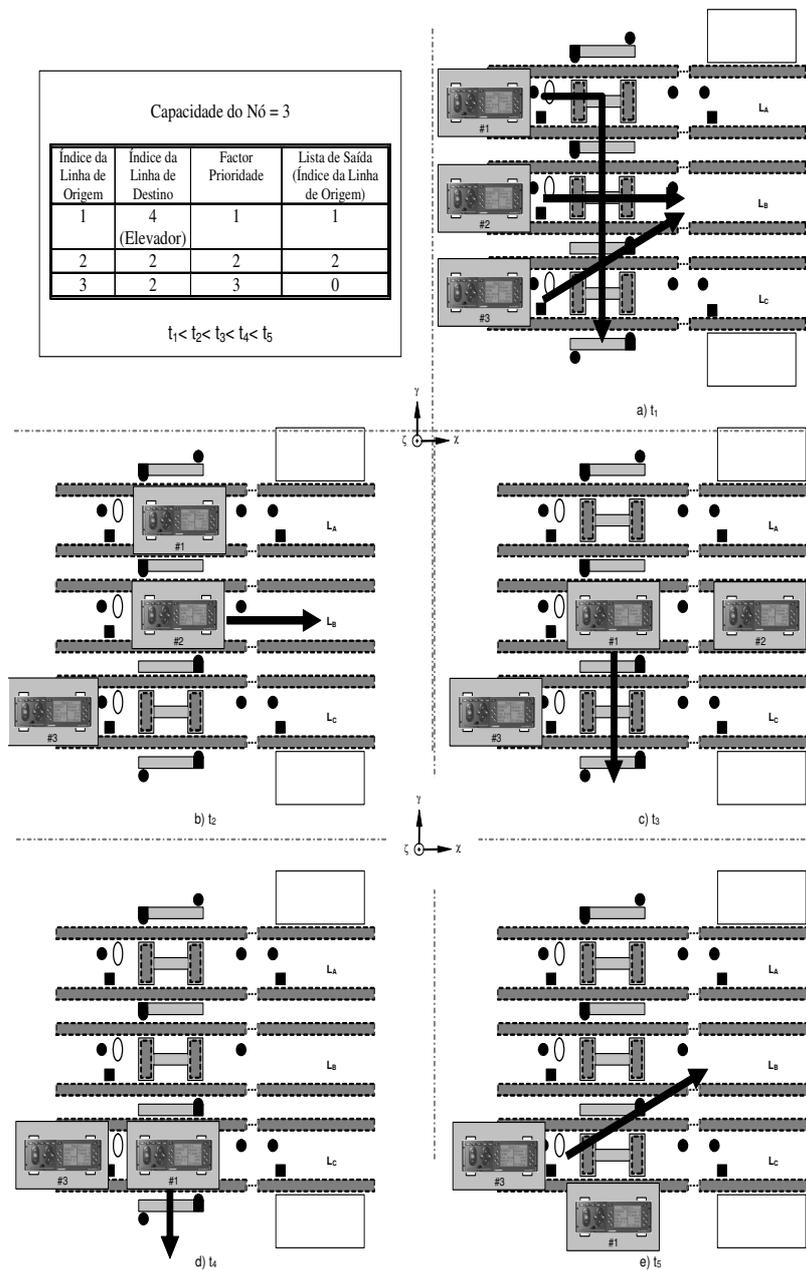


Figura 6: Cenário de funcionamento da estratégia 4 (ordem crescente do índice das linhas).

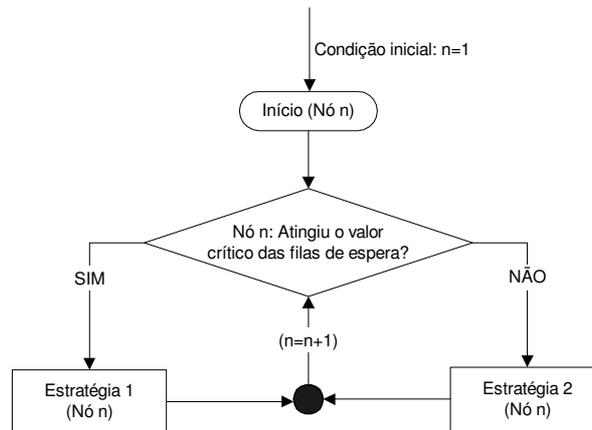


Figura 7: Fluxograma de controlo (Estratégia 5).

utilizador usufrui da possibilidade de, através da parametrização de um determinado valor crítico para o tamanho das filas de espera, interferir sobre a estratégia reguladora do acesso dos auto-rádios aos nós.

A figura 7 apresenta o fluxograma de controlo desenvolvido para a estratégia 5, permitindo uma melhor percepção do seu funcionamento.

Como, através da figura 7, pode visionar-se, é o valor crítico das filas de espera que, em cada nó, determina qual a estratégia de prioridade a utilizar em cada instante. Com efeito, é esse valor que permite decidir qual das estratégias anteriormente descritas, estratégia 1 (dar prioridade aos auto-rádios situados nas filas de espera de maior comprimento) ou estratégia 2 (dar prioridade aos auto-rádios cujo percurso é menor), aquela que vai ser utilizada para encaminhar os auto-rádios dentro do nó.

A propósito se esclarece que, se o valor crítico definido pelo utilizador for igual a 0 (zero), os algoritmos reguladores das estratégias 1 e 5 serão iguais. O desenvolvimento desta estratégia tem por base dois objectivos: por um lado procurar que o tamanho das filas de espera de acesso aos nós não atinja valores elevados, tendo por referência aquele que é o valor crítico para o utilizador, por outro, minimizar o percurso dos auto-rádios dentro dos nós.

Estratégia 6

Posto que tenhamos em atenção tudo quanto foi referido relativamente à estratégia 5, foi desenvolvida uma nova estratégia que, embora muito semelhante a esta, apresenta uma singularidade. Com efeito, nesta outra estratégia (estratégia 6) sempre que não seja atingido o valor crítico das filas de espera definido pelo utilizador e haja auto-rádios cujo destino sejam os postos de trabalho situados nos extremos da linha de produção, ser-lhes-á dada prioridade máxima; nas demais situações o cálculo da prioridade será o já definido para a estratégia 2, na qual é dada prioridade aos auto-rádios cujo percurso a executar dentro do nó seja menor. O fluxograma de controlo desenvolvido para esta estratégia encontra-se representado na figura 8.

O interesse que presidiu à formulação desta estratégia reside na necessidade de concretização de diversos objectivos, a saber:

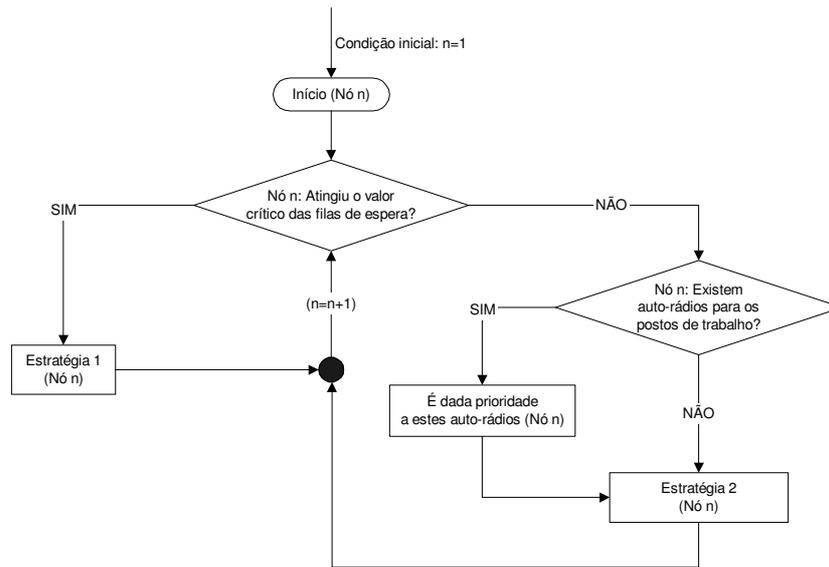


Figura 8: Fluxograma de controlo (Estratégia 6).

- Minimizar a extensão das filas de espera de acesso aos nós, sempre que um determinado valor crítico parametrizado pelo utilizador seja atingido.
- Maximizar os níveis de utilização dos postos de trabalho que estão situados nos extremos da linha de produção, facultando acesso prioritário aos auto-rádios que a esses postos se destinem.
- Minimizar o percurso a efectuar por cada auto-rádio dentro do nó.

Refira-se, porém, que os objectivos antes mencionados se articulam dinamicamente, entre si, em função da ocorrência de determinadas condições representadas na figura 8. Assim, através da implementação desta estratégia, o acesso às diversas zonas de processamento, situadas ao longo da linha de produção, tem um ajuste automático, em função, quer de parâmetros definidos pelo utilizador, quer do destino dos auto-rádios dentro daquelas zonas. Saliente-se que, tal como é assinalado na descrição da estratégia 5, sempre que o valor crítico das filas de espera definido pelo utilizador para esta estratégia seja igual a 0 (zero), as estratégias 1 e 6 são iguais.

3.2 Geração Automática

Após terem sido descritas as estratégias de controlo que estabelecem os critérios de prioridade para regular o acesso dos auto-rádios aos nós, e respectivo encaminhamento ao longo da linha de produção, na figura 9 é apresentada a interface gráfica que permite ao utilizador seleccionar a estratégia a utilizar para esse efeito; além disso é possível nesta mesma interface parametrizar os tempos de rota dos auto-rádios dentro das zonas de processamento (nós), bem como configurar o intervalo entre amostragens. Estas são algumas das funcionalidades que o desenvolvimento da versão adaptada do Arena passou a disponibilizar.

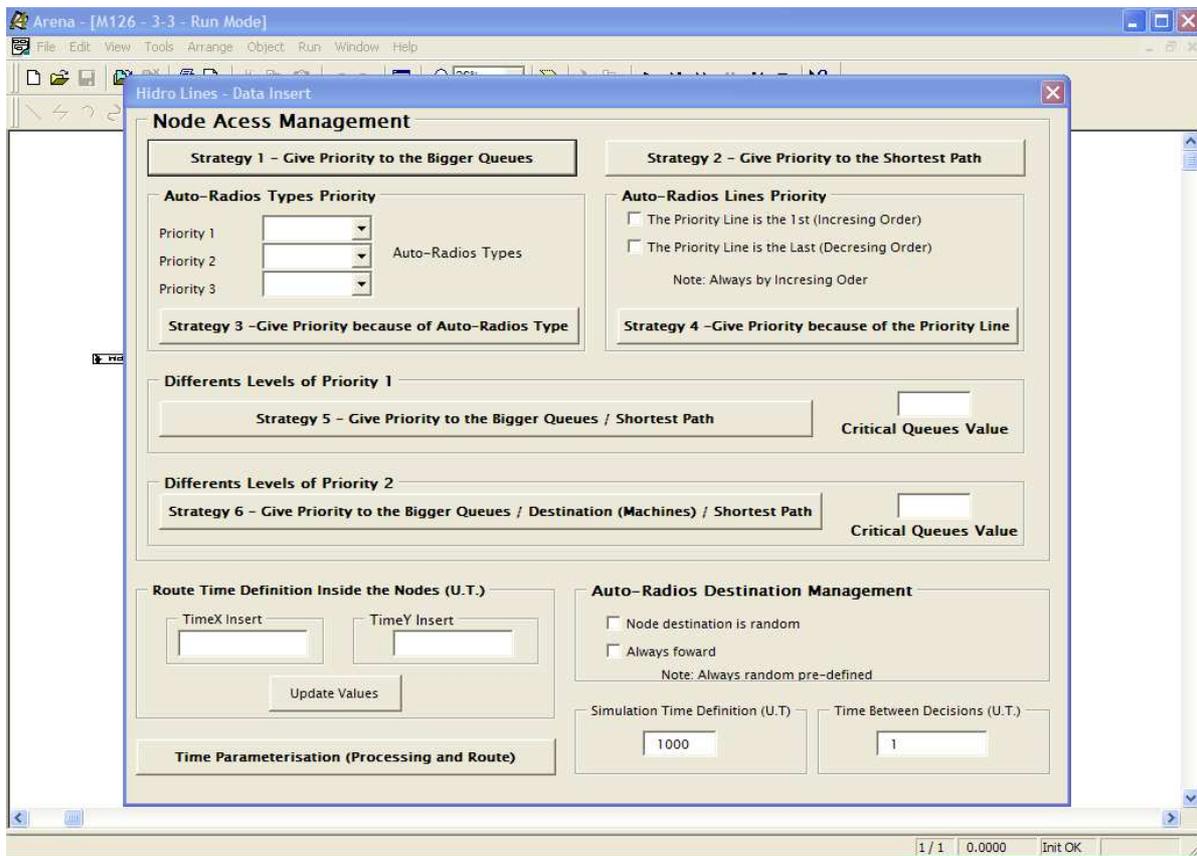


Figura 9: Módulo de gestão e controlo.

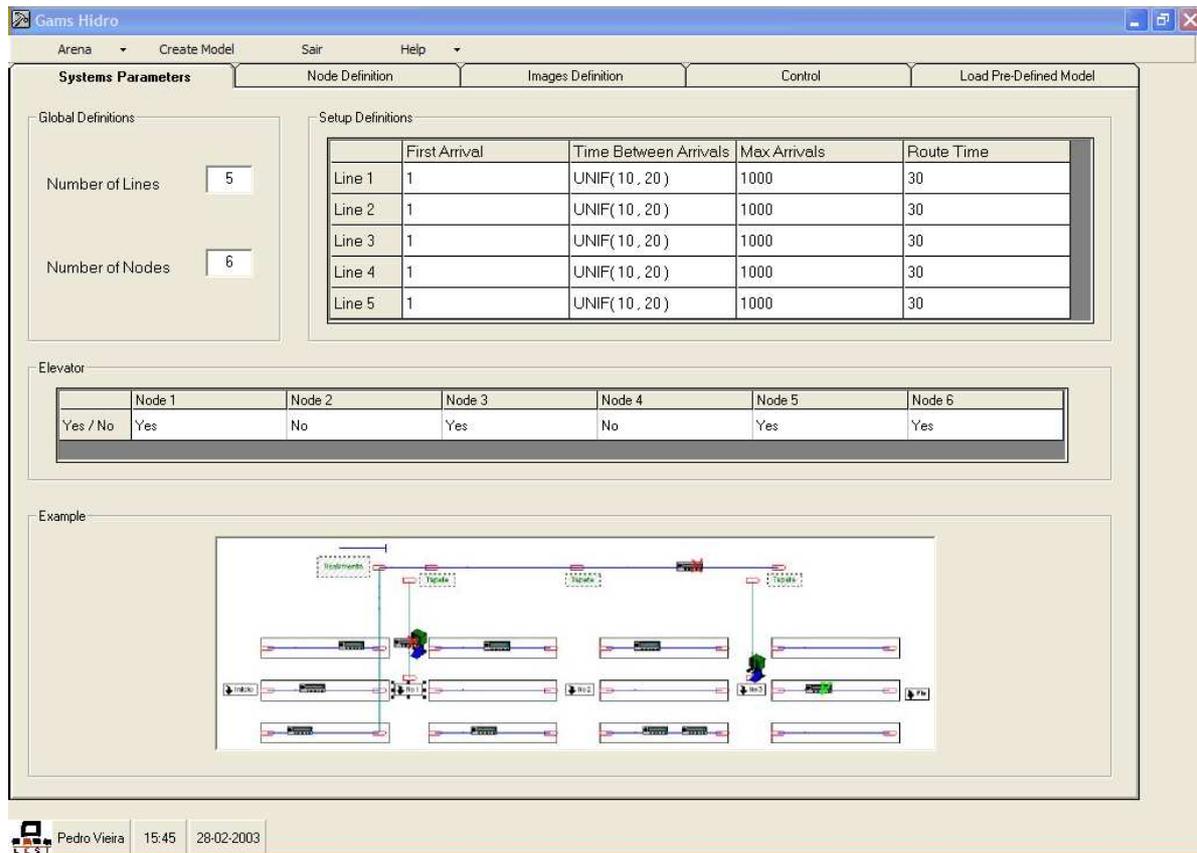


Figura 10: Parâmetros do sistema (Vieira 2002).

O trabalho desenvolvido deu origem a uma aplicação de apoio à decisão que engloba todo o processo, desde a construção física dos modelos (Vieira 2002, Ferreira 2003), ao controlo dos fluxos de materiais (Ferreira 2003), bem como à apresentação dos seus principais índices de desempenho.

Na figura 10 apresenta-se um dos módulos que integra a interface gráfica deste trabalho, na qual é possível configurar os parâmetros físicos do modelo que vai ser construído, e os parâmetros de chegada das entidades. Assim, é possível definir, entre outros parâmetros:

- Número de linhas (n)⁶.
- Número de zonas de processamento (m)⁶.
- Localização dos elevadores.
- Intervalo entre chegadas das entidades ao sistema (em cada uma das linhas).

Além disso, a figura 10 exemplifica um modelo, que integra três linhas, três nós e dois elevadores, estes localizados no primeiro e último nó, respectivamente.

⁶ $1 \leq n \leq 20$ e $1 \leq m \leq 20$.

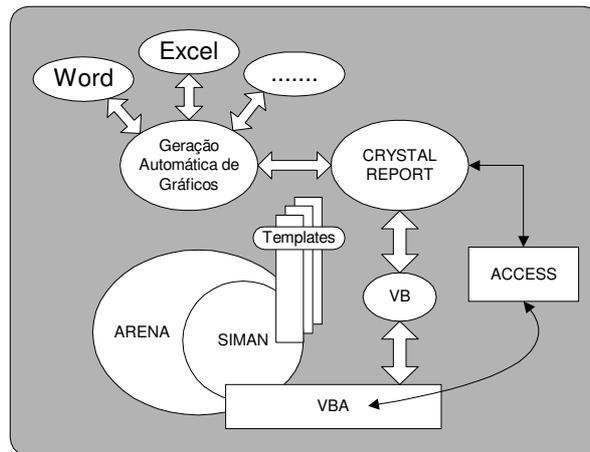


Figura 11: Versão adaptada do Arena para geração automática de modelos e relatórios.

Este trabalho pretende promover, junto do utilizador desta aplicação informática, condições para comparar diferentes alternativas de fluxos de materiais e, desse modo, permitir-lhe uma correcta avaliação do desempenho de cada uma. Neste contexto, considerou-se de todo o interesse integrar no ambiente de simulação, um gerador automático de relatórios nos quais se apresenta informação de pormenor sobre os principais índices de desempenho dos modelos simulados, com o recurso à visualização de gráficos. O trabalho desenvolvido exigiu a integração de diversas aplicações no ambiente de simulação ARENA, as quais são, a saber:

- *Visual Basic for Applications* (VBA)
- *Visual Basic* (VB)
- *Microsoft Access* (Base de Dados)
- *Crystal Report* (Edição de Gráficos)
- ARENA / SIMAN

Seguidamente, neste artigo, é apresentada em termos genéricos, a forma como se processa a integração daquelas aplicações no sistema desenvolvido para apoio à decisão (ver figura 11). A ferramenta *Crystal Report* da *Crystal Decisions* (URL⁷: www.crystaldecisions.com), aí referenciada, é uma aplicação que disponibiliza, entre outros recursos, a possibilidade de criar relatórios gráficos, a partir de uma base de dados do *Microsoft Access*.

O gerador automático de relatórios implementado, a partir do qual se processa a edição de diferentes gráficos que contêm informação sobre os principais índices de desempenho dos modelos, destaca-se pelo seu carácter genérico e flexível, uma vez que a edição dos gráficos é independente das características físicas do sistema que está a ser simulado, assim como das estratégias de controlo utilizadas para realizar o encaminhamento dos auto-rádios ao longo da linha de produção. Neste mesmo contexto, é de salientar o aspecto visual dos gráficos produzidos, os quais proporcionam ao utilizador uma melhor percepção do desempenho dos modelos

⁷ *Universal Resource Locator*.

que foram simulados. Dos indicadores de desempenho que foram considerados, destacam-se, entre outros:

- Níveis de utilização dos postos de trabalho.
- Tempos médios / máximos de permanência dos auto-rádios nas filas de espera de acesso aos nós.
- Comprimento médio / máximo das filas de espera de acesso aos nós.
- Número de operações realizadas em cada posto de trabalho.
- Tempo mínimo / médio / máximo de produção dos auto-rádios.
- Número de auto-rádios produzidos.

3.3 Características da Aplicação Desenvolvida

A aplicação informática desenvolvida no âmbito deste trabalho, com o firme propósito de dar resposta aos objectivos e problemas que lhe servem de fundamento, destaca-se pelo seu carácter, simultaneamente:

- Genérico e flexível
Na medida em que permite a generalização de diferentes fluxos de materiais, através da flexibilização da ferramenta quer quanto à configuração física da linha de produção (podem existir n^8 linhas de montagem e m^8 zonas de processamento), quer quanto às estratégias de controlo utilizadas na produção (foram desenvolvidas 6 estratégias). Além disso, foi integrado na aplicação desenvolvida um gerador de relatórios gráficos, que se distingue pelo seu carácter extremamente genérico, uma vez que apresenta toda a informação sobre o desempenho do sistema, independentemente das suas características físicas e estratégias seleccionadas.
- Parametrizável
Na medida em que permite ao utilizador, no início da simulação, interactivar com o sistema que vai ser desenvolvido, através da introdução de diversos parâmetros (por exemplo: estratégias de controlo, tempos de rota e de processamento) e, desta forma, testar as potencialidades do sistema sob diferentes condições de funcionamento.
- Visual
Na medida em que representa, no ecrã do computador, o estado do sistema em cada instante, e a sua evolução ao longo do tempo, permitindo deste modo uma melhor comunicação entre o modelo e o utilizador. Com efeito, a forte componente visual dos modelos desenvolvidos torna-os *transparentes* para os agentes de decisão que, eventualmente, os venham a utilizar pois possibilita que estes assistam às interacções entre as entidades que constituem o modelo, ocasionando uma melhor compreensão dos resultados da simulação.
- Automático
Na medida em que, introduzidos os dados, dispensa qualquer outra intervenção do utilizador para a construção dos modelos.

⁸ $1 \leq n \leq 20$ e $1 \leq m \leq 20$.

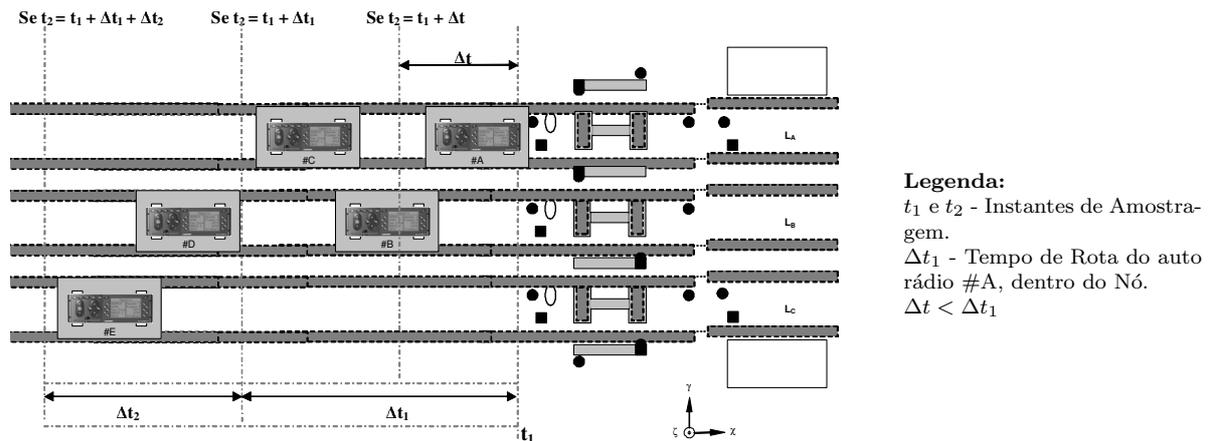


Figura 12: Diferentes instantes de amostragem para a tomada de decisão ($t_1 < t_2$).

A natureza, simultaneamente, genérica, flexível, parametrizável, visual, e automática desta aplicação, faz com que esta seja uma ferramenta de utilização “indispensável” na análise e auxílio à tomada de decisões em sistemas produtivos de igual configuração, onde são diversos os aspectos a considerar, bem como as fontes de incerteza e variabilidade.

3.4 Acesso às Zonas de Processamento (Nós)

As estratégias analisadas têm por base um conjunto de decisões, reguladoras do acesso dos auto-rádios aos nós. Estas decisões, porém, não são tomadas em tempo-real, mas em intervalos de tempo discretos. Esta técnica consiste em inspeccionar, em intervalos regulares e de uma forma sequencial, cada um dos nós da linha de produção e, a partir daí, tomar as decisões de encaminhamento. Para melhor compreensão, apresenta-se na figura 12, um esquema⁹ representativo do que ocorre, num determinado nó, nos instantes t_1 e t_2 , em que são tomadas decisões visando determinar quais os auto-rádios que devem avançar.

No instante de amostragem t_1 (ver figuras 12 e 13), o auto-rádio A acabou de chegar; como o nó está livre e apenas existe este auto-rádio à entrada, ser-lhe-á dada autorização de acesso ao nó.

Tenhamos em atenção que apenas se autoriza que determinado conjunto de auto-rádios aceda ao nó, quando o conjunto anterior o tenha já abandonado; ora, no instante de amostragem t_2 , dependendo da amplitude do intervalo entre amostragens ($t_2 - t_1$), podem ocorrer diversas situações (ver figura 12) que influenciarão as decisões de encaminhamento dos auto-rádios ao longo da linha de produção, a saber:

⁹ Considera-se que a velocidade de deslocamento de todos os auto-rádios é igual.

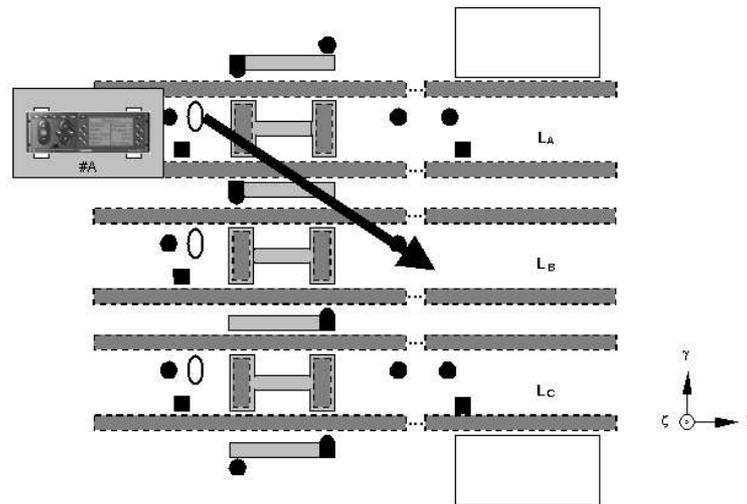


Figura 13: Instante de amostragem t_1 .

- **Situação 1 – Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t$**

Nesta situação (ver figuras 14 e 12), como o intervalo entre amostragens (neste caso igual a Δt), é inferior ao tempo de rota do auto-rádio A (Δt_1), não será dada permissão para avançar a nenhum dos auto-rádios situados à entrada do nó (neste caso apenas o auto-rádio #B). Assim, os dados recolhidos por esta amostragem serão perdidos, considerando-se esta uma amostra supérflua. Deste modo, ainda que as decisões de controlo do acesso dos auto-rádios aos nós fossem tomadas em tempo-real, o resultado obtido seria igual para este tipo de situações.

- **Situação 2 – Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t_1$**

Nesta outra situação (ver figuras 15 e 12), o auto-rádio #A terminou o seu percurso dentro do nó, uma vez que o instante de amostragem t_2 é igual a $(t_1 + \Delta t_1)$. Nesta circunstância, tal como no caso anterior, as decisões de encaminhamento são tomadas como se o controlo dos fluxos dos auto-rádios ocorresse em tempo-real.

- **Situação 3 – Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2$**

Na figura 16, observa-se uma outra situação (também de acordo com o que se descreve na figura 12), em que o instante de amostragem t_2 é igual a $(t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2)$. Nesta situação, existirá um erro residual no processo de simulação, traduzível em termos temporais num valor igual a Δt_2 . Desta forma, durante o intervalo de tempo Δt_2 , existirão diversos auto-rádios à entrada do nó (inicialmente os auto-rádios #B e #C; e depois os auto-rádios #B, #C e #E), estando este livre e, portanto, disponível para operar.

Tudo o que foi referido até ao momento, teve como objectivo elucidar o leitor, relativamente à técnica utilizada no controlo do acesso dos auto-rádios aos nós da linha de produção. Como se depreende da explicação acima, esta técnica apresenta, contudo, algumas limitações,

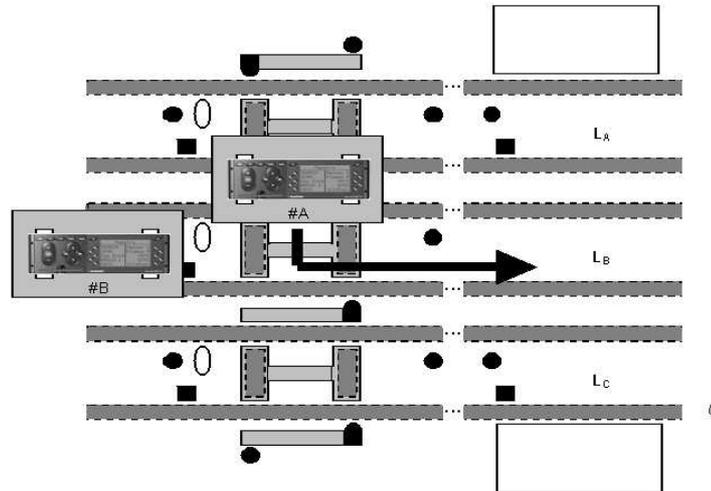


Figura 14: Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t$.

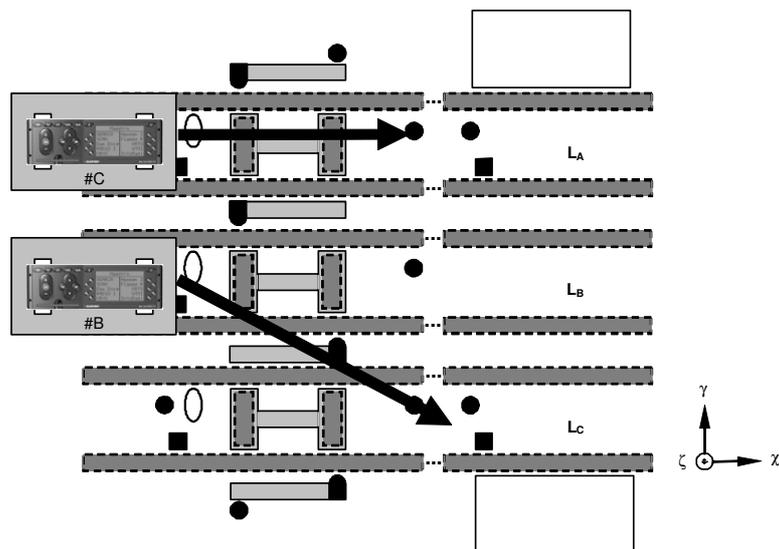


Figura 15: Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t_1$.

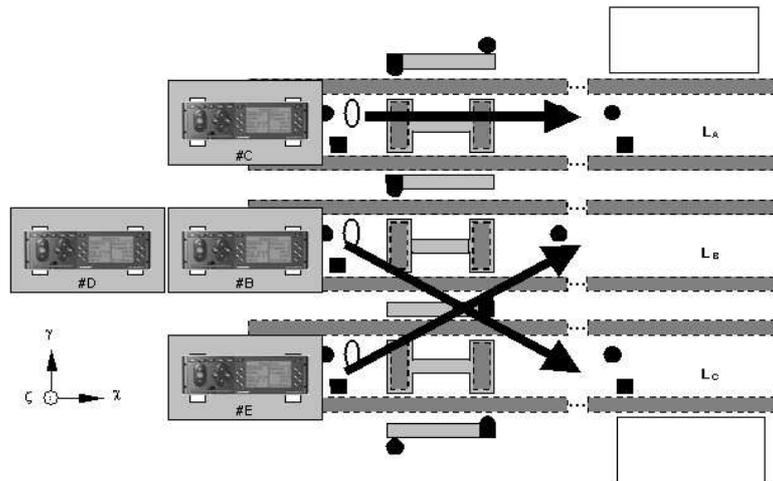


Figura 16: Instante de amostragem $t_2 = t_1 + \Delta t_1 + \Delta t_2$.

Tabela 1: Intervalo de Amostragem / Intervalo entre Chegadas de Auto-Rádios.

Parâmetros	Situação A	Situação B
Intervalo de Amostragem	1 Unidade de Tempo	30 Unidades de Tempo
Intervalo entre Chegadas de Auto-Rádios	30 Unidades de Tempo	1 Unidade de Tempo

uma vez que existe uma óbvia independência entre o processo de amostragem durante o qual são tomadas as decisões reguladoras do acesso dos auto-rádios aos nós, e as transições de estado no sistema. Assim, é fácil acontecer que entre duas amostragens, e correspondentes decisões de encaminhamento, ocorra um erro residual no processo de simulação (ver Figura 16), comparativamente ao que sucede com a tomada de decisões em tempo-real. Por outro lado, é verdade que a diminuição do intervalo entre amostragens, e conseqüente aumento da sua frequência¹⁰, permite que esse erro se torne cada vez menor. Todavia, um outro factor a ter em conta, para esse efeito, refere-se à frequência com que os auto-rádios chegam aos nós. Para uma plena compreensão deste facto, seguidamente se enunciam, duas situações bem relevantes da influência que a frequência de amostragem e a da chegada dos auto-rádios aos nós poderão exercer nos resultados finais da simulação.

Na situação A (ver tabela 1), em face dos valores parametrizados, poder-se-á afirmar que as decisões de controlo do acesso dos auto-rádios são tomadas em tempo-real, pois o intervalo de amostragem, comparativamente ao intervalo entre chegadas dos auto-rádios, é muito menor. Por outro lado, na situação B, os valores apresentados por aqueles dois intervalos, afectam gravemente os resultados a obter no termo da simulação, pois o intervalo de amostragem é muito maior do que o existente entre chegadas dos auto-rádios. Por tudo isto, entendeu-se por bem disponibilizar ao utilizador do sistema de apoio à decisão implementado, a opção de

¹⁰Frequência de amostragem = $1 / \Delta T$, em que ΔT é o intervalo entre amostragens.

configurar o intervalo de amostragem¹¹.

Na literatura científica da especialidade, o teorema de amostragem conhecido por Teorema de *Nyquist* (Oppenheim 1989), estabelece um número mínimo de amostragens para que, através da informação que proporcionam, seja possível reconstituir um determinado fenómeno. Com efeito, estabelece que a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes superior à maior frequência envolvida no fenómeno (Brito *et al.* 2001). Deste modo, e tendo em atenção o disposto pelo Teorema de *Nyquist*, considera-se que o intervalo de amostragem ideal, deve ser no máximo igual a metade do menor intervalo de tempo que medeia a chegada dos auto-rádios aos nós.

Assim, poder-se-á obter resultados credíveis, desde que o utilizador esteja sensibilizado para a influência que uma incorrecta parametrização da frequência de amostragem poderá ter nos resultados finais da simulação.

4 Conclusões

O objectivo principal do trabalho apresentado neste artigo consistiu no estudo e desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, o qual possibilita, de uma forma genérica e automática, a geração de modelos com diferentes estratégias de controlo para a redefinição de fluxos de processamento de materiais, sendo possível, deste modo, criar modelos extremamente diversificados, oferecendo ao utilizador o ensejo de optar pela solução que, em seu entender, melhor se adapte ao sistema que pretende projectar. Além do mais, a forte componente visual dos modelos construídos facilitará ao utilizador a sua melhor compreensão e aceitação, mesmo que este não possua grande preparação técnica e científica.

Na sequência da realização deste trabalho, um gerador automático de relatórios foi integrado no ambiente de simulação ARENA, de forma a permitir ao utilizador, no final de cada simulação, avaliar o comportamento do modelo construído, através da visualização de gráficos que transmitem os valores dos principais índices de desempenho do sistema.

O recurso à simulação num projecto desta natureza, põe em evidência a importância desta técnica na especificação do controlo ideal para a condução de fluxos de materiais, contribuindo para uma melhor especificação, caracterização, definição, e conseqüente implementação do mais eficaz sistema de controlo. Do ponto de vista estritamente científico, no âmbito deste trabalho, foram desenvolvidas seis estratégias de controlo, cuja importância resulta do facto de estas terem por objectivo permitir, ao potencial utilizador da ferramenta de apoio à decisão desenvolvida, validar o impacto que a implementação de diferentes estratégias de controlo irá ter na produção.

Em termos globais, este trabalho vai na direcção do que hoje se considera como sendo as grandes tendências no desenvolvimento de avançados sistemas de simulação (Ferreira 2003): i) propõe um sistema genérico e flexível de generalização de fluxos de materiais para uma determinada configuração de linhas de produção; ii) permite a geração automática de diferentes modelos de simulação; iii) destaca a importância do desenvolvimento de sistemas de simulação

¹¹Na aplicação que serve de suporte à construção física dos modelos já é possível configurar o intervalo entre chegadas dos auto-rádios.

visuais que facilitem a comunicação entre o agente de decisão e o modelo de simulação, em contraste com as técnicas analíticas normalmente utilizadas pela Investigação Operacional, as quais tornam os modelos pouco acessíveis aos gestores ou agentes de decisão; iv) é acessível aos potenciais utilizadores, porquanto o seu uso não exige grandes conhecimentos técnicos; v) integra no ambiente de simulação, um gerador automático de relatórios gráficos, que apresentem informação sobre o desempenho dos modelos, aspecto essencial num eficaz processo de apoio à decisão.

Um trabalho com esta dimensão não pode deixar de ter limitações; todavia, não deve ser catalogado como um *produto acabado*, no sentido comum em que todos os resultados são ideais. Como exemplo se destaca uma dessas limitações:

- As estratégias de controlo poderão não reflectir, integralmente, todas as possíveis decisões que permitem a movimentação, em concreto, dos auto-rádios ao longo da linha de produção.

Dando continuidade às propostas aqui apresentadas, e já numa perspectiva de trabalho futuro, este trabalho poderá vir a ser complementado com a incorporação, na ferramenta de apoio à decisão, de *estratégias inteligentes* de controlo que permitam a optimização da gestão dos fluxos de materiais, em cada uma das zonas de processamento, ao longo da linha de produção, tendo em atenção o que se passa a jusante daquelas zonas.

5 Referências

- Alvarez, A.M., Centeno, M. A. (1999). "Enhancing Simulation Models For Emergency Rooms Using VBA", in Proceedings of 1999 Winter Simulation Conference, P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans, eds.
- Brito, A.E.S.C., Teixeira, J.M.F. (2001). "Simulação por Computador – Fundamentos e Implementação de Código em C e C++", 1ª Edição, Publindústria Edições Técnicas, ISBN 972-98726-2-7.
- Fernandes, J.M.L. (2000). "MIDAS: Metodologia Orientada ao Objecto para Desenvolvimento de Sistemas Embebidos", Tese de Doutoramento em Informática, Área de Conhecimento em Engenharia de Computadores, Departamento de Informática, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Ferreira, J.J.P. (1995). "Suporte do Ciclo de Vida dos Sistemas Integrados de Fabrico através de Modelos Executáveis sobre Infra-estruturas de Integração", Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, L.P. (2003). "Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Produção na Indústria Electrónica", Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Especialidade de Logística e Distribuição, Departamento de Produção e Sistemas, Universidade do Minho, 139 pp., Julho de 2003.
- Kheir, N.A. (1996). "Systems Modeling and Computer Simulation", Second Edition, Marcel Dekker, INC., ISBN 0-8247-9421-4, Chapter 7 – "Manufacturing Systems: Modeling and Simulation" (David R. Kalasky – Process Analysis and Improvement, Wheaton, Illinois).
- Kelton, W.D., Sadowski, R. P., Sadowski, D. A. (2002). "Simulation With ARENA", Second Edition, McGraw-hill Series in Industrial Engineering and Management Science, ISBN 0-07-250739-X.

Machado, R.J. (2000). “Metodologias de Desenvolvimento em Projectos de Engenharia de Computadores no Suporte à Implementação de Sistemas de Informação Distribuídos Não Convencionais (Industriais)”, Tese de Doutoramento em Informática, Área de Conhecimento em Engenharia de Computadores, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Oppenheim, A.V., Schafer, R. W. (1989). “Discrete-Time Signal Processing”, Prentice Hall, ISBN 0-13-216771-9.

Ramis, F.J., Palma, J.L. , Baesler, F.F. (2001). “The Use Of Simulation For Process Improvement At An Ambulatory Surgery Center”, in Proceedings of 2001 Winter Simulation Conference, B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, and M. W. Rohrer, eds.

Vieira, P. (2002). “Gerador Automático de Modelos de Simulação”, Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia de Sistemas e Informática, Departamento de Informática, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.