

REDUÇÃO DO RISCO DE PARADA DE UM LAMINADOR EM FUNÇÃO DO MELHOR DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE UMA OFICINA DE RETÍFICA DE CILINDROS¹

*Fernando Martineli Loureiro²
Katiani da Conceição³
Dalvio Ferrari Tubino⁴
Vandrenei Cóssia⁵*

Resumo

Um laminador de tiras a quente é um equipamento que deve ter sua utilização maximizada, evitando-se paradas não programadas. Contudo, para que esse equipamento não sofra risco desse tipo de parada, a oficina de retífica de cilindros, que é um dos seus principais fornecedores, deve ter capacidade de usinagem adequada para devolver em tempo hábil os cilindros usados ao ciclo de trabalho. Esse risco de parada pode ser minimizado pelo entendimento da capacidade real do sistema através da modelagem matemática. Para isso, propôs-se um método matemático que considera as diferentes taxas de retiradas dos cilindros de cada cadeira de laminação, bem como os diferentes tempos de usinagem. É importante salientar que a solução desse problema depende da aplicação de diferentes técnicas de otimização, incluindo o método de inequações variacionais usado para encontrar o equilíbrio da distribuição das cargas de cilindros nas retíficas. Além disso, foi necessário usar um método de aproximação exponencial para modelar as diferentes taxas de chegada de cilindros nas retíficas. Finalmente, a fim de validar o método proposto, a resposta foi testada em simulador sendo seus resultados considerados satisfatórios.

Palavras-chave: Teoria das filas; Alocação de equilíbrio; Inequações variacionais.

REDUCING THE RISK OF STOPPING HOT STRIP MILL BY A BETTER METHOD FOR SIZING OF WORKSHOP OF GRINDING MACHINES

Abstract

A hot strip mill is a type of equipment that should have maximized their use, avoiding unscheduled downtime. However, for this equipment should never be in risk of stopping without rolls. Therefore, the workshop of grinding machines, one of its main suppliers, should be capable of machining and return in time for use the rolls used. This risk can be minimized by understanding the real capacity of the system through mathematical modeling. For that, it was proposed a mathematical method that considers the different rates of withdrawal of rolls of each stand, and the different times of machining. Note the solution of this problem depends on the application of different techniques of optimization, including the method of variational inequalities used to find the balance of the distribution of loads in each machine. Furthermore, it was necessary to use an exponential approximation method for modeling the different rates of arrival of rolls in grinding machines. Finally, to validate the proposed method, the response was tested in simulation and the results were considered satisfactory.

Key words: Queueing theory; Assignment equilibrium; Variational inequality.

¹ *Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.*

² *Mestre e Doutorando da UFSC – Diretor Desenvolvimento SEED.*

³ *Mestre e UFSC/ Professora Departamento de Matemática da UDESC.*

⁴ *Doutor e Professor Departamento Eng. Produção da UFSC.*

⁵ *Engenheiro Mecânico e Engenheiro da CSN.*

1 INTRODUÇÃO

O artigo apresenta a aplicação de algumas ferramentas matemáticas para uso em um projeto de dimensionamento de uma oficina de cilindros que serve a laminador de tiras a quente (LTQ). Esse problema pode ser particularmente importante em projetos de expansão de produção, como por exemplo, através da colocação de mais um forno de reaquecimento de placas de aço no sistema, ou mesmo para verificação do risco de parada em caso de manutenção de retíficas. No primeiro caso as trocas de cilindros por dia aumentará proporcionalmente ao aumento de produção de bobinas, pois a duração do cilindro depende do seu uso, implicando, portanto, em redimensionar a oficina de cilindros, de forma a garantir que as retíficas de cilindros possam atender a demanda gerada pelo aumento de produção de Bobinas a Quente. No segundo caso, apesar da quantidade de cilindros para laminar permanecer a mesma, a disponibilidade das retíficas é diminuída. O problema, contudo, é o mesmo para ambos os casos e se relaciona com a capacidade de se concluir que um determinado número de retíficas é suficiente para operação do LTQ. Para que isso seja possível, o sistema deve ter a capacidade de manter pelo menos um conjunto de cilindros para trocas emergenciais no estoque do LTQ, i.e., a probabilidade de não haver o par disponível para troca em alguma das cadeiras do LTQ deve ser considerada desprezível.

A análise matemática do problema levou a conclusão que o mesmo pode ser descrito como um problema de equilíbrio de cargas em um sistema onde o tempo entre chegadas de cilindros para usinagem, pode ser modelada como uma distribuição aleatória do tipo exponencial. Além disso, deve-se considerar no processo a condição dos cilindros serem de diferentes tecnologias, e.g., alto cromo ou aço rápido, além de serem oriundos de diferentes cadeiras do laminador, implicando portanto em diferente tempo de usinagem e vida útil. Este tipo de problema clássico e já foi objeto de vários estudos e trabalhos publicados, sendo que várias abordagens já foram propostas e lista-se alguns pela importância e aplicação, começando com o trabalho de Krishnamurthy,⁽¹⁾ onde buscaram uma solução para um sistema produtivo propuseram uma aproximação em dois momentos para um sistema em bifurcação/junção e estações em ciclo fechado, avaliando principalmente o impacto das taxas de chegada no comprimento das filas. No trabalho de Paschalidis,⁽²⁾ eles analisaram um sistema de fila MQNETs aplicada a processamento de pacotes computacionais, analisando o carregamento da CPU concentrando seus estudos na estabilidade do sistema e na determinação de parâmetros para sequenciamento e roteamento das atividades. Contudo, o trabalho de maior aderência com o presente trabalho é o de Koole e Nain⁽³⁾ que propuseram uma solução explícita para priorização de filas em um sistema multiclasse, como o da oficina de retífica de cilindros. Koole e Talim⁽⁴⁾ propuseram ainda uma aproximação exponencial para problemas de múltiplas chegadas em uma central de atendimento.

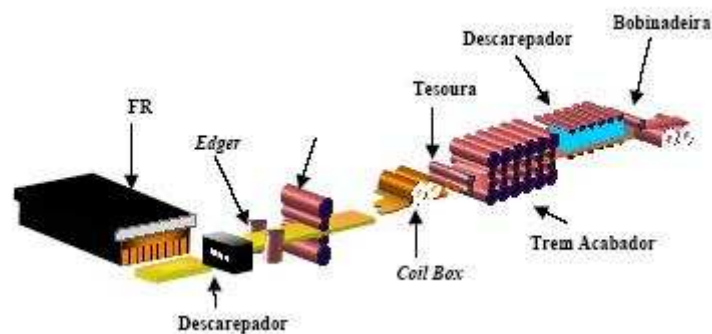
Portanto, esse trabalho tem por objetivo propor um método matemático para o dimensionamento das retíficas de cilindros a fim de reduzir o risco de parada do Laminador de Tiras a Quente que possa ser aplicado no dia a dia da operação ou em ampliações de produção. E para ser útil, esse método considerará tanto as diferentes taxas de trocas de cilindros em cada cadeira do laminador de tiras a quente, quanto à possibilidade de usar os cilindros em diferentes equipamentos. Além disso, o método poderá ser usado em planilhas eletrônicas ou

usando outros tipos de solvers, programas de otimização, para chegar ao resultado esperado.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Uma instalação para o funcionamento de um LTQ possui vários equipamentos, divididos em três grandes equipamentos principais que compõem duas áreas: a 'área de aquecimento de placas', onde o equipamento principal que a compõe é forno de aquecimento; e a 'área de laminação', que é composta de cadeiras de desbaste e o trem acabador.

A Figura 1 mostra um esquema geral do LTQ e o que é importante para esse trabalho é que alguns cilindros são mais sujeitos ao desgaste, requerendo, portanto, uma troca mais freqüente muitas vezes até dentro do ciclo de laminação. Esses cilindros que requerem mais trocas são os do trem acabador, nas cadeiras finais de laminação. Normalmente, existe uma retífica de cilindro inteiramente dedicada para esses cilindros do trem de acabamento. No caso analisado, considera-se que existem atualmente duas retíficas especialmente dedicadas para esses cilindros e pretende analisar o impacto de um aumento de produção, redimensionar a oficina.



Fonte: Site da CST, 2007.

Figura 1. Processo de laminação.

Logo, a importância da oficina de retíficas no processo produtivo é claro, pois o LTQ consome, durante a produção, tanto os cilindros de desbaste, encosto e de acabamento. Assim, esses mesmos cilindros devem ser devolvidos ao processo de produção de forma a não comprometer a continuidade do processo. Caso não haja cilindro pronto em estoque, os laminadores não poderão trabalhar, obrigando a uma parada não programada, gerando prejuízos consideráveis. Existe ainda o problema de trocas emergenciais, onde o cilindro é retirado antes do tempo normal e colocado na fila de usinagem. Logo, o processo deverá estar sob controle e os riscos devidamente considerados. Isso só é possível se a quantidade de retíficas for adequada.

3 OFICINA DE CILINDROS

A oficina de cilindros é um departamento ligado a operação dos LTQ que é responsável por devolver os cilindros de laminação às condições de trabalho. É de sua responsabilidade, além da usinagem de cilindros, a manutenção dos mancais das cadeiras de laminação. É claro que existem outros equipamentos, ditos secundários, como por exemplo, em caso de desgaste profundo do cilindro, um torno de trabalho pode ser usado para aumentar a velocidade do processo. Contudo,

seu uso não constitui um gargalo, e o cilindro continua a requerer uma retífica, para finalizar o processo. Existem ainda berços de resfriamento e de estocagem. Mas esses equipamentos também não são considerados gargalo pela produção e, portanto, o estudo irá se concentrar apenas nas retíficas dos cilindros de acabamento.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Dado o problema, a modelagem matemática se dirige a um processo de n servidores, i.e., n retíficas, com tarefas multiclasse, i.e., ordens de usinagem com tempos diferentes e chegadas exponencialmente distribuídas de cilindros a serem retificados. A abordagem conduziria a um problema de otimização com objetivo de minimizar a ociosidade dos equipamentos, sujeita a restrição de atendimento de todos os cilindros em um tempo hábil estipulado. Porém, não é possível resolver o problema apenas através do uso de um algoritmo de otimização, pois se trata de um problema de rede, i.e, resolvendo um dos ramos, desequilibram-se os outros ramos do sistema. Por isso, propõe-se utilizar um método baseado em inequações variacionais, resolvendo-se por parte o problema, isto é, busca-se o estado em que o tempo em fila seja o mais equilibrado possível, que segundo Mayerle⁽⁵⁾ um padrão de fluxo viável $f \in \Phi$ em $G = (N, A)$ está em equilíbrio quando não existe um mecanismo atuando no sentido de modificá-lo. Essa abordagem foi primeiramente proposta por Nash.⁽⁶⁾

Para conseguir atingir o ponto ótimo, resolve-se o problema separadamente para os pares {retífica 1, retífica 3} e {retífica 2, retífica 3}, otimizando-se alternadamente o sistema para cada um dos pares, até que o resultado convirja para os valores que indiquem os percentuais em que os cilindros são enviados diretamente para as retíficas 1 e 2.

O problema de equilíbrio pode ser escrito como um problema de inequações variacionais. Nagurney⁽⁷⁾ diz que um padrão de fluxo $f^* \in \Phi_1$, sobre caminhos de $G = (N, A)$, é solução do Equilíbrio do Usuário se e somente se f^* satisfaz o seguinte problema de Inequações Variacionais:

$$\langle c(f^*), f - f^* \rangle \geq 0 \quad \forall f \in \Phi_1$$

O método matemático proposto no trabalho, parte da definição dos indicadores necessários para avaliação dos riscos de parada de laminadores de tiras a quente. Para o cálculo desses indicadores utilizou-se a teoria das filas em conjunto com algumas técnicas avançadas de modelagem. Entre elas, usaram-se as aproximações exponenciais e a aplicação de inequações variacionais para a distribuição das cargas das retíficas.

O cálculo das cargas pode ser feito como mostrado na Figura 2, onde se observa o princípio da conservação dos fluxos dos cilindros que saem do laminador e que tem obrigatoriamente que ser retificados.

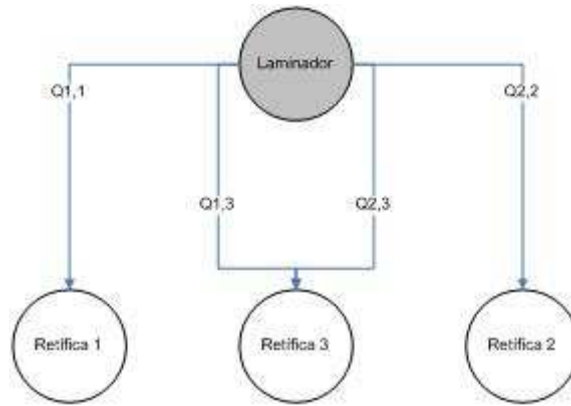


Figura 2. Fluxo dos cilindros no sistema.

Nas seguintes equações tem-se que:

$$Q_{1,1} + Q_{1,3} = Q_1 \quad (2)$$

$$Q_{2,2} + Q_{2,3} = Q_2 \quad (3)$$

Onde Q_1 e Q_2 são as quantidades totais dos cilindros para $\{F_1, F_2, F_3\}$ e $\{F_4, F_5, F_6\}$ respectivamente.

A capacidade pode ser modelada como o total de minutos disponíveis por período de tempo. Para este caso, considera-se que a laminação trabalha 24 h x 7 dias por semana, ou seja, 68 horas/semana.

Como todos os cilindros precisam ser retificados, a capacidade da usinagem deve ser superior a demanda, dada por Q_1+Q_2 . Logo todos os cilindros serão retificados e alguma ociosidade deverá estar presente nas retíficas.

O objetivo será fazer com que o tempo na fila seja o mais uniformemente distribuído nas retíficas, ou seja:

$$Wq_1 \approx Wq_2 \approx Wq_3 \quad (4)$$

O tempo pode ser analogamente considerado como o custo do sistema em um modelo de Cournot (1830), apud Sheffi.⁽⁸⁾

Deve-se considerar ainda a questão da não negatividade dos fluxos:

$$Q_{1,1}, Q_{1,3}, Q_{2,2}, Q_{2,3} \geq 0 \quad (5)$$

Para a solução do problema, dever-se-á trabalhar com inequações variacionais particionadas, isto é, tentar-se-á resolver o fluxo do $Q_{1,1}$ e $Q_{1,3}$, e posteriormente $Q_{2,2}$ e $Q_{2,3}$, retornando novamente ao ciclo até que a diferença entre os tempos de fila seja considerada insignificante.

Neste trabalho será considerado um Laminador que possui um conjunto de cilindros composto de seis pares de cilindros de acabamento. Os pares são numerados de $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6\}$. Como mencionado anteriormente, a Retífica 1 é encarregada da usinagem dos pares $\{F_1, F_2, F_3\}$ e a Retífica 2 usina os pares $\{F_4, F_5, F_6\}$. A nova Retífica 3 usinará todos os pares $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6\}$. O conjunto de cilindros necessita troca a cada 2,5 horas de trabalho. O tempo de usinagem (TU_{F_1, F_2, F_3}) dos pares $\{F_1, F_2, F_3\}$ é de 20 minutos e dos pares $\{F_4, F_5, F_6\}$ o tempo de usinagem (TU_{F_4, F_5, F_6}) é de 25 minutos.

Para o problema em questão, usou-se um sistema de fila M/M/1, que indica um sistema com:

M: tempo de chegadas distribuído exponencialmente,
M: tempo de atendimento também distribuído exponencialmente e
1: número de servidor.

O problema será resolvido seguindo-se as etapas:

- 1) Encontrar a taxa de entrada do conjunto de cilindros para retificar, denotada por λ . Cabe ressaltar que todo o conjunto é trocado ao mesmo tempo, ou seja, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$.
- 2) Determinar a taxa de entrada para usinagem emergencial. Para os pares $\{F_1, F_2, F_3\}$ a frequência de troca é maior por serem os cilindros que trabalham no final do processo de laminação e sofrem maior desgaste.
- 3) Calcular o tempo médio de atendimento. Nesta etapa usou-se $\mu = 1h/(TU)$, sendo (TU) o tempo total do processo.

Para retifica 1, que só processa cilindros $\{F_1, F_2, F_3\}$, tem-se o tempo total do processo dado por:

$$TU_1 = (TU_{F_1, F_2, F_3}) * Perc(1) * Cilindros F_1, F_2, F_3$$

Para retifica 2, que só processa cilindros $\{F_4, F_5, F_6\}$, tem-se o tempo total do processo dado por:

$$TU_2 = (TU_{F_4, F_5, F_6}) * Perc(2) * Cilindros F_4, F_5, F_6$$

Onde, Perc(i) é o percentual de cilindros que passam pela retífica i.

- 4) Encontrar ρ que é a taxa de utilização dos recursos. Essa taxa indica a situação do servidor, isto é, se ele está ou não congestionado.
- 5) Calcular o tamanho da fila, dado por Lq.
- 6) Determinar o tempo em fila para o modelo, denotado por Wq.

Essas etapas foram executadas com o objetivo de equilibrar os tempos de fila, isto é, fazer com que o tempo de fila da retifica 1, 2 e 3 sejam iguais, conforme Figura 3.

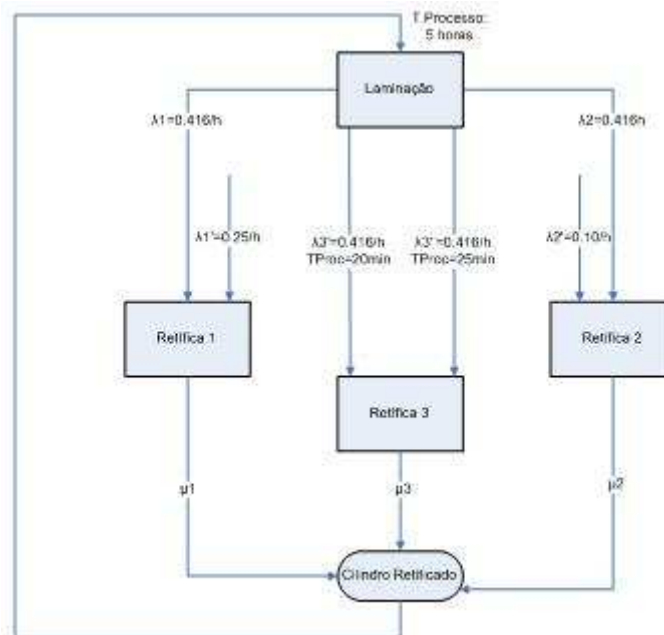


Figura 3. Ciclo de trabalho dos cilindros.

Não existe solução analítica exata para calcular o tempo de fila da retífica 3, pois existem duas chegadas independentes para cada uma delas. A taxa de chegada pode ser considerada a mesma, porque o conjunto de cilindros é substituído ao mesmo tempo. A taxa de saída pode ser aproximada pela média ponderada do inverso dos tempos de processo. Portanto, para essa retífica, que processa todos os cilindros $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6\}$, tem-se o tempo total do processo dado por:

$$TU_3 = (TU_{F_1, F_2, F_3}) * (1 - Perc(1)) * Cilindros_{F_1, F_2, F_3} + (TU_{F_4, F_5, F_6}) * (1 - Perc(2)) * Cilindros_{F_4, F_5, F_6}$$

Para a taxa de entrada, segundo Koole e Talim⁽⁴⁾ pode-se aproximar o valor dessa taxa somando-se as taxas de entrada das chegadas que são independentes, isto é:

$$\lambda_{1\text{efetivo}} \approx \lambda_1 + \lambda_{1'} \text{ e } \lambda_{2\text{efetivo}} \approx \lambda_2 + \lambda_{2'}$$

Onde $\lambda_{1'}$ e $\lambda_{2'}$ são as taxas de chegada de cilindros para retificar em casos de emergência.

Não é possível aplicar um método de otimização diretamente para resolver o problema, pois se trata de um problema de equilíbrio em rede. Nesse caso é necessário procurar um método que possa achar uma solução para uma condição de equilíbrio do sistema, que é basicamente o que se procura quando se tenta igualar o tempo esperado na fila para cada uma das retíficas.

6 RESULTADOS

Aplicando o método das inequações variacionais usado para encontrar o equilíbrio da distribuição das cargas de cilindros nas retíficas, como formulado na seção 4, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros, como visto na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do sistema

Parâmetros	Valores
Perc(1)	0,749
Perc(2)	0,598
$\lambda_{1\text{efetivo}}$	0,666
$\lambda_{2\text{efetivo}}$	0,516
$\lambda_{3'}$	0,416
$\lambda_{3''}$	0,416
μ_1	0,943
μ_2	0,778
μ_3	0,663

No método de aproximação exponencial usado para modelar as diferentes taxas de chegada de cilindros nas retíficas, obteve-se os seguintes valores vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Resposta do sistema

Parâmetros	Modelo
ρ_1	0.7064
ρ_2	0.6635
ρ_3	0.6271
Lq_1	1.6992
Lq_2	1.3083
Lq_3	1.0547
Wq_1	2.5513
Wq_2	2.5354
Wq_3	2.5354

Na Tabela 2 pode-se observar que ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 são menores que 1. Com isso, conclui-se que não existe congestionamento de cilindros nas retíficas.

Percebe-se que o método utilizado encontrou uma solução para a condição de equilíbrio do sistema. Isso pode ser visto em Wq_1 , Wq_2 e Wq_3 que tem valores praticamente iguais.

A fim de validar o método proposto, a resposta foi testada usando-se um modelo de simulação baseado no simulador ARENA 9.0 da *Rockwell Software*. Os resultados, como mostra a Tabela 3, demonstraram que a aproximação é válida para o modelo em estudo.

Tabela 3. Comparação dos resultados através do ARENA 9.0

Parâmetros	Modelo	Simulação	Erro(%)
ρ_1	0.7064	0.7132	0.9611
ρ_2	0.6635	0.6795	2.3538
ρ_3	0.6271	0.6302	0.4919
Lq_1	1.6992	2.1405	20.6157
Lq_2	1.3083	1.5368	14.8676
Lq_3	1.0547	0.9926	6.2565
Wq_1	2.5513	3.1922	20.0745
Wq_2	2.5354	2.8232	10.1908
Wq_3	2.5354	2.3634	7.2816

A aproximação foi considerada satisfatória, já que uma solução analítica exata não pode ser construída. É interessante ressaltar que a técnica de otimização proposta é capaz, ainda, de gerar uma solução inicial mais próxima possível do resultado ótimo.

7 CONCLUSÃO

O método proposto alcançou o objetivo que era calcular o risco de parada de laminadores de tiras a quente por falta de cilindros de trabalho ou de encosto. O método se mostrou suficientemente preciso em comparação com o modelo simulado, permitindo o seu uso em processos de otimização. Dessa forma, este método pode reduzir o tempo de cálculo computacional necessário para se obter um resultado ótimo, permitindo seu uso em tomadas de decisão em tempo real.

Pode-se perceber que a solução desse problema dependeu da aplicação de diferentes técnicas de otimização, incluindo o método de inequações variacionais e

um método de aproximação exponencial para modelar as diferentes taxas de chegada de cilindros nas retíficas.

Com a utilização da técnica de otimização, proposta no trabalho, foi possível gerar uma solução inicial mais próxima possível do resultado ótimo, e poderia ser usada em um sistema casado de otimização e simulação para determinação do ponto ótimo. Neste caso, a técnica seria bastante útil, pois, a simulação é uma ferramenta bastante precisa, mas que envolve um processamento computacional elevado, o que reflete em tempo de resposta relativamente longo. Com essa técnica, o esforço computacional poderia ser baixado significativamente, pois a solução inicial já estaria próxima ao ponto ótimo.

Contudo, percebe-se que técnicas melhores poderiam ser utilizadas para aumentar ainda mais a precisão dos resultados. Além disso, a modelagem poderia incluir outros aspectos interessantes, como a priorização dos cilindros recebidos por trocas emergenciais. Esses cilindros merecem ser tratado de modo especial para tornar o modelo mais preciso no que se refere ao comportamento real. Sua aplicação como método prático se deve ainda a capacidade de usá-lo facilmente em planilhas eletrônicas, permitindo seu uso em outros problemas de fila em outros processos metalúrgicos.

REFERÊNCIAS

- 1 KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R. e VERNON, M., 2004, Analysis of a Fork/Join Station with Inputs from Coxian Servers in a Closed Queuing Network. *Annals of Operations Research*, v. 125, p. 69 – 94, 2004.
- 2 PASCHALIDIS, I.; SU, C. e CARAMANIS, M. (2003) Target-Pursuing Policies for Open Multiclass Queueing Networks. *IEEE-INFOCOM*, v. 1, p. 196 – 206, 2006.
- 3 KOOLE, G. e NAIN, P. An explicit solution for the value function of a priority queue. *Queueing Systems* 47, p. 251–282, 2004.
- 4 KOOLE, G. e TALIM, J. Exponential Approximation of Mult-Skill Call Centers Architecture. *Proceedings of QNETs*, v. 23, p.1 – 10, 2000.
- 5 MAYERLE, S. Modelos de Equilíbrio em Redes. Seminário Interno do DEINFRA/SC. Florianópolis, 2006.
- 6 NASH, J. F., Equilibrium Points in n-Person Games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.36, p. 48-49, 1950.
- 7 NAGURNEY, A. *Network Economics - A variational inequality Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- 8 SHEFFI, Y. *Urban Transportation Research - Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985.