

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Produção

ISSN 1413-2168

BT/PRO/127

**Algoritmo de Inserção de Espera para
o Problema de uma Máquina com
Função-Objetivo Representada pela
Soma de Funções Convexas do
Horário de Término Independentes
para Cada Ordem**

**Emerson C. Colin
Tamio Shimizu**

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Produção

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção

Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan
Vice-Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Tamio Shimizu
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Mario Sergio Salerno

Conselho Editorial

Prof. Dr. Afonso Carlos Corrêa Fleury
Prof. Dr. Antônio Rafael Namour Muscat
Prof. Dr. Guilherme Ary Plonski
Prof. Dr. Israel Brunstein
Prof. Dr. José Joaquim do Amaral Ferreira
Prof. Dr. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto
Prof. Dr. Tamio Shimizu

Coordenador Técnico

Profa. Dra. Débora Pretti Ronconi

Esta é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia de Produção,
fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Produção

ISSN 1413-2168

BT/PRO/127

**Algoritmo de Inserção de Espera para
o Problema de uma Máquina com
Função-Objetivo Representada pela
Soma de Funções Convexas do
Horário de Término Independentes
para Cada Ordem**

**Emerson C. Colin
Tamio Shimizu**

São Paulo – 2002

O presente trabalho é parte da tese de doutorado apresentada por Emerson C. Colin, sob orientação do Prof. Dr. Tamio Shimizu: "Algoritmo de Inserção de Espera para o Problema de uma Máquina com Função-Objetivo Representada pela Soma de Funções Convexas do Horário de Término Independentes para Cada Ordem" defendida em 31/03/00, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Produção da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Colin, Emerson Carlos

Algoritmo de inserção de espera para o problema de uma máquina com função-objeto representada pela soma de funções convexas do horário de término independentes para cada ordem / E.C. Colin, T. Shimizu – São Paulo : EPUSP, 2002.

12 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Produção, BT/PRO/127)

1. Programação dinâmica I. Shimizu, Tamio II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção III. Título IV. Série

ISSN 1413-2168

CDU 519.857

Algoritmo de inserção de espera para o problema de uma máquina com função-objetivo representada pela soma de funções convexas do horário de término independentes para cada ordem

EMERSON C. COLIN E TAMIO SHIMIZU

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Produção
Rua Catolândia, 765, CEP 02839-000, São Paulo - SP (eccolin@uol.com.br)
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2, 128, 2º andar, CEP 05508-900, São Paulo - SP (tmshimiz@usp.br)

Este trabalho apresenta um Algoritmo de Inserção de Espera (AIE) para o problema de uma máquina com seqüência predefinida. O AIE trata do problema com função-objetivo que considera a soma de funções convexas do horário de término independentes para cada ordem. O algoritmo estende os resultados existentes conhecidos por tratar de um problema mais genérico mantendo o tempo de solução computacional polinomial do tamanho da entrada de dados.

Palavras-chave: programação de uma máquina, inserção de espera, algoritmo polinomial.

1. Introdução

Seja $J=\{1,2,\dots\}$ um conjunto ordenado finito de índices que representam as ordens. Cada ordem j ($j \in J$) é caracterizada pelo quadrupla (h_j, w_j, p_j, d_j) representando respectivamente: custo de adiantamento, custo de atraso, tempo de processamento e data de entrega.

Todo o trabalho realizado vai considerar que uma seqüência tenha sido definida previamente por algum outro procedimento adequado a esse fim. A programação aqui é definida como a determinação dos horários de início e de término das ordens de uma dada seqüência. Para uma dada ordem j , existe um intervalo de processamento $[e_j, e_j+p_j]$ onde e_j significa o horário efetivo de início do processamento da ordem j , e $[\dots]$ representa um intervalo fechado. Observe que para duas ordens consecutivas j e $j+1$, trabalhando em uma única máquina, com intervalos de processamento definidos por $[e_j, e_j+p_j]$ e $[e_{j+1}, e_{j+1}+p_{j+1}]$, pode haver intersecção dos intervalos apenas nos pontos extremos dos mesmos. Essa consideração será utilizada para facilitar o desenvolvimento posterior. Seja C_j e W_j respectivamente o horário de término e o período de espera antes da realização da ordem j . O programa π de um conjunto de ordens J , é a determinação do horário de início de cada ordem, ou seja, $\pi = \{e_1, e_2, \dots, e_{|J|}\}$, onde $e_j = C_{j-1} + W_j$. Um programa parcial, π_j , é um programa que contém as j primeiras ordens de J .

O programa é realizado de maneira a tentar cumprir as datas de entrega d_j , sabendo-se que cada ordem demanda um determinado tempo p_j para o seu processamento. Há possibilidade de inserção de tempo de espera W_j antes da elaboração de uma determinada ordem j . Supondo que C_j represente o horário de término da ordem j , a função-objetivo estudada aqui pode ser definida como $\min g(\pi) = \sum_{j \in J} g_j(C_j)$, onde $g_j(\cdot)$ é uma função convexa.

2. Revisão bibliográfica

A inserção de espera só faz sentido caso o término antecipado de uma ordem prejudique o custo total do programa. Por essa razão, a literatura relacionada à inserção de espera sempre está associada ao problema que contém adiantamento e atraso. O atraso pode ser definido como $T_j = \max\{0, C_j - d_j\}$ e o adiantamento como $E_j = \max\{0, d_j - C_j\}$.

Provavelmente o primeiro trabalho publicado de forma ampla que apresentou um AIE pertence a FRY *et al.* (1987). De uma maneira bastante clara, os autores formularam o problema de inserção de espera no problema de atraso e adiantamento com custos individuais, $\sum_{j \in J} (h_j E_j + w_j T_j)$, como um problema de programação linear. Pela característica do tipo de problema, o pior caso do mesmo é resolvido em tempo $O(|J|^2)$. Algum tempo depois, DAVIS; KANET (1993) propuseram um outro algoritmo para o mesmo problema com o mesmo tempo no pior caso.

De uma maneira provavelmente independente, GAREY *et al.* (1988) também propuseram um AIE para o problema de atraso e adiantamento sem custos, $\sum_{j \in J} (E_j + T_j)$, com tempo $O(|J| \log |J|)^1$. Para o caso da consideração de um custo único para adiantamento e atraso, $\sum_{j \in J} \{w_j (E_j + T_j)\}$, os autores indicam como o algoritmo deve ser reformulado de modo que a tempo computacional seja mantido. YANO; KIM (1991) elaboraram um AIE baseado na programação dinâmica. A inserção de espera é feita no problema com função-objetivo $\sum_{j \in J} (h_j E_j + w_j T_j)$, onde é suposto que $w_j \geq h_j \geq 0$. O tempo de solução no pior caso é $O(|J|^2 \log |J|)$.

COLIN; SHIMIZU (2000) fazem uma adaptação do AIE de GAREY *et al.* possibilitando que o mesmo seja utilizado no problema do tipo $\sum_{j \in J} (h_j E_j + w_j T_j)$, mantendo o tempo de solução em $O(|J| \log |J|)$.

Todos os trabalhos mencionados supõem que os algoritmos sejam utilizados a partir de uma seqüência inicial definida preliminarmente. Como o problema de obtenção das seqüências é fortemente NP-difícil², existem diversos métodos heurísticos para sua solução. Dentre esses métodos, podemos destacar as regras de despacho e outros procedimentos mais poderosos e intensivos computacionalmente como por exemplo a busca-tabu (MORTON; PENTICO, 1993).

Todos os AIE devem ser utilizados associados a procedimentos de seqüenciamento como pode ser observado por exemplo em COLIN (1998), que utilizou o *beam search* como um gerador de seqüências e um AIE para definir os programas.

3. Algoritmo de inserção de espera

Nesta seção sugere-se um AIE que considera uma classe ampla de funções-objetivo. Para cada ordem, essa classe ampla será sintetizada como qualquer função cujos custos sejam representados por uma **função convexa³ de seu horário de término**. A função-objetivo em si será a soma das funções de custo de cada ordem.

Embora a espera seja destacada no próprio nome do algoritmo, sua utilização não a define diretamente. O algoritmo vai definir os horários de

¹ Neste trabalho $\log n = \log_2 n$.

² LAWLER (1977) provou que o problema de otimização $\sum w_j T_j$ é fortemente NP-difícil. Como nossos problemas são casos mais genéricos do que o de LAWLER, também podemos dizer que os mesmos são fortemente NP-difíceis. O caso $\sum (E_j + T_j)$ também foi provado ser NP-difícil por GAREY *et al.* (1988).

³ A não-consideração de uma classe mais ampla de funções, como funções quase-convexas ou pseudoconvexas por exemplo, acontece pela falta da propriedade de quase-convexidade da soma dessas funções. Aqui poderia-se considerar qualquer classe de funções, desde que sua soma se mantivesse como uma função quase-convexa. Em realidade, essa restrição acontece pela dificuldade de convergência de um algoritmo numa função que possua mais de um ponto de mínimo local estrito.

início das ordens, e_j ; as esperas W_j , como já mostrado anteriormente, podem ser obtidas pela seguinte equação: $W_j = e_j - (e_{j-1} + p_{j-1})$.

Seja $C_j^* = \arg \min g_j(C_j)$ o horário de término que minimiza o custo relacionado à ordem j . O valor de C_j^* vai ser alterado dependendo da função que define os custos da ordem.

Seja $B = \{1, 2, \dots, l\}$ um conjunto de índices dos blocos de ordens. Um **bloco de ordens** $b \subseteq B$ é definido como uma seqüência parcial que é programada contigüamente, ou seja, sem inserção de espera entre as ordens da mesma. Matematicamente pode-se dizer que uma dada seqüência de ordens $M = \{J_{m_1}, J_{m_2}, \dots, J_{m_j}\}$ é um bloco de ordens se $e_k + p_k = e_{k+1}$ (sendo $m_1 \leq k < m_j$), $e_{m_1-1} + p_{m_1-1} < e_{m_1}$ ($m_1 > 1$) e $e_{m_j} + p_{m_j} < e_{m_{j+1}}$ ($m_j < |J|$). Ao longo do trabalho, além de uma seqüência parcial de ordens, um bloco será por vezes considerado como um intervalo de tempo ou como um conjunto ordenado de ordens.

As ordens de cada bloco b são particionadas em 2 subconjuntos, denominados $Dim(b)$ e $Aum(b)$. Se $j \in Dim(b)$ e o bloco for antecipado, o valor da função-objetivo diminui ou se mantém constante; se $j \in Aum(b)$ e o bloco for antecipado o valor da função-objetivo aumenta ou se mantém constante.

Assume-se que um programa completo π possua l blocos $\{1, 2, \dots, l\}$ ($1 \leq b \leq l$; $l \leq |J|$). No processamento do algoritmo, para se representar um bloco b , serão necessários apenas as definições dos índices extremos, ou seja, $primeiro(b)$ que é o índice da primeira ordem de b e $último(b)$ que é o índice da última ordem de b . As ordens intermediárias são facilmente identificadas pois são relacionadas com a primeira e com a última.

3.1. Preliminares

No decorrer desta seção, R representa o conjunto dos números reais. Faremos abaixo definições e provas importantes para o desenvolvimento do AIE.

Definição. (Conjunto convexo) (LUENBERGER, 1984, p. 464): Um conjunto $\Omega \subseteq R$ é dito convexo se para cada $x_1, x_2 \in \Omega$, e cada número real α , $0 \leq \alpha \leq 1$, o ponto $\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2 \in \Omega$.

Definição. (Função convexa) (LUENBERGER, p. 176): Uma função g definida num conjunto convexo Ω é considerada como sendo convexa se, para cada $x_1, x_2 \in \Omega$ e cada número real α , $0 \leq \alpha \leq 1$, a inequação $g(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) \leq \alpha g(x_1) + (1-\alpha)g(x_2)$ se mantém.

Lema 1. (Soma de funções convexas) Sejam g_1 e g_2 funções convexas no conjunto convexo Ω . Então, $g_1 + g_2$ é convexa em Ω .

Demonstração: Vide LUENBERGER (p. 178).

////

O lema 1 é importante pois mostra que a soma de funções convexas possui apenas um ponto de mínimo. Como cada ordem utiliza uma função convexa para definir sua contribuição à função-objetivo, as posições dos

blocos e por consequência dos programas completo e parcial também serão funções convexas dos horários de término. Dessa forma, procedimentos de busca não-linear irrestrita podem ser utilizados para a localização dos pontos que otimizam a função-objetivo.

Lema 2. Para $g(x)$ uma função convexa e $z^{(1)}$ um intervalo inicial de indecisão, o método da seção áurea, após n iterações, define um intervalo $z^{(n)}$ onde se encontra o ponto de mínimo de $g(x)$.

Demonstração: A demonstração é consequência direta da definição do método. Para a definição algorítmica do método, vide BAZARAA *et al.* (1993, pp. 270-2) por exemplo. ////

3.2. Construção do AIE

Seja $g_j(C_j)$ uma função convexa que descreve o valor do custo de $j \in J$ de acordo com seu horário de término. Vamos supor que o instante de início do horizonte de planejamento seja definido por t_0 e que o horário de término de mínimo custo (horário de término desejado) seja definido como C_j^* .

Denominaremos $G(b) = \sum_{j \in b} g_j(C_j)$ a função-objetivo do bloco para cada bloco $b \in B$. Adicionalmente, vamos definir $G(b^+)$ como o valor de $G(b)$ se b fosse antecipado em um pequeno valor e $G(b^-)$ analogamente para um pequeno postergamento. Considerando que nosso intervalo de indefinição seja definido por z , podemos dizer que $G(b^+) = \sum_{j \in b} g_j(C_j - \alpha z)$ e $G(b^-) = \sum_{j \in b} g_j(C_j + (1 - \alpha)z)$, onde $0 < \alpha < 1$.

Do ponto de vista prático α é simplesmente um fator que faz com que a soma das movimentações para a direita e para a esquerda seja equivalente a z . Dessa forma, a movimentação para a direita pode ser diferente da movimentação para a esquerda.

No desenvolvimento do algoritmo vamos considerar cinco possíveis regiões em uma função convexa: as regiões de tipo 1, 2, 3, 4 e 5, conforme apresentado na Figura 1.

Considerando a convexidade da função-objetivo, podemos dizer que os cinco tipos de regiões representam que se o bloco estiver na região do:

- **Tipo 1:** antecipações adicionais são interessantes pois o bloco está numa região onde uma antecipação promove um decréscimo na função-objetivo;
- **Tipo 2:** antecipações adicionais não são interessantes pois o bloco está numa região onde uma antecipação promove um aumento na função-objetivo;
- **Tipo 3:** antecipações adicionais ou aumentam ou não alteram a função-objetivo. Por essa razão opta-se por não se antecipar mais o bloco;
- **Tipo 4:** antecipações adicionais ou aumentam ou não alteram a função-objetivo. Por essa razão opta-se por não se antecipar mais o bloco;
- **Tipo 5:** antecipações adicionais aumentam o valor da função-objetivo.

Suponha que o algoritmo tenha realizado as antecipações $[n-1]$ e $[n]$. A Tabela 1 descreve o raciocínio utilizado na construção do algoritmo.

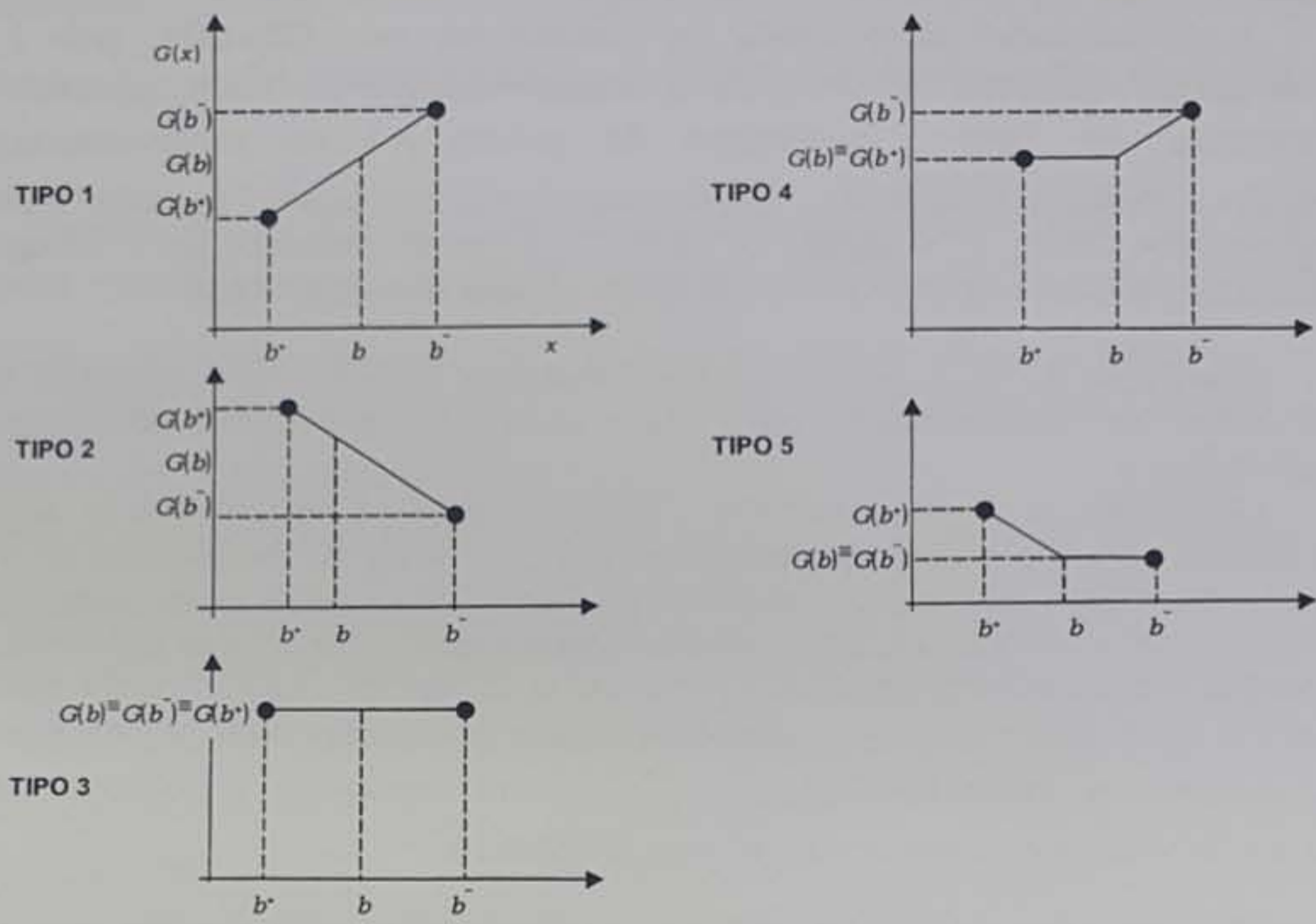


Figura 1: Regiões possíveis numa função convexa

	Ponto		Conclusão
	[n-1]	[n]	
Região	tipo 1	tipo 1	Antecipar mais uma vez
	tipo 1	tipo 2	A região de mínimo custo está compreendida entre [n-1] e [n]
	tipo 1	tipo 3	O ponto de mínimo custo é b de [n]
	tipo 1	tipo 4	O ponto de mínimo custo é b de [n]
	tipo 1	tipo 5	O ponto de mínimo custo é b de [n]

Tabela 1: Relações possíveis entre os tipos de regiões de uma função convexa em duas iterações do algoritmo

O algoritmo funcionará tomando as ações que atendam as conclusões apresentadas na Tabela 1. A seguir o algoritmo é descrito mais formalmente.

Suponha sem perda de generalidade que $t_0=0$. O algoritmo tem início programando-se a primeira ordem de modo que $g_1(C_1)$ seja mínima. Se $C_1^* < p_1$, então, $C_1^{AIE} = p_1$. Caso contrário, pode-se definir $C_1^{AIE} = C_1^*$. Considerando que um programa parcial já tenha sido elaborado até a ordem j , π_j^{AIE} , a $j+1$ -ésima ordem pode ser programada de acordo com dois casos: um onde a ordem não pode ser programada com custo mínimo e outro onde a ordem pode.

Caso 1 (sem custo mínimo garantido): $C_j^{AIE} + p_{j+1} > C_{j+1}^*$. Programa-se $j+1$ de modo que $C_{j+1}^{AIE} = C_j + p_{j+1}$. $j+1$ é inserida no bloco l .

Caso 2 (com custo mínimo garantido): $C_j^{AIE} + p_{j+1} \leq C_{j+1}^*$. Programa-se $j+1$ de modo que $C_{j+1}^{AIE} = C_{j+1}^*$. Cria-se um novo bloco com a ordem $j+1$.

A propriedade-chave agora se transforma em: $G(l) \leq G(l^*)$, isto é, uma antecipação adicional faz com que a função-objetivo do bloco aumente ou se mantenha. Se após o acréscimo da ordem $j+1$ ao programa π_j^{AIE} , a propriedade-chave é mantida, não se toma nenhuma ação. Por outro lado, se a propriedade-chave é violada, o bloco l é movimentado para mais cedo enquanto pelo menos uma das condições abaixo não aconteça:

Condição 1: $e_{primeiro(l)} = 0$. Ocorrerá somente se $l=1$. Caso ocorra, o bloco l não pode ser movimentado para mais cedo pois ele estará começando no horário 0;

Condição 2: A desigualdade $G(l) \leq G(l^*)$ torna-se verdadeira; o algoritmo constata que o bloco está na região de tipo 2, 3, 4 ou 5. Neste caso, se o bloco estiver na região do tipo 2 significa que uma antecipação um pouco menor poderia fazer com que a função-objetivo diminuísse. Em outras palavras, duas iterações consecutivas, $[n-1]$ e $[n]$, terem avaliado as regiões como sendo do tipo 1 e 2 respectivamente. Caso ocorra, deverá haver uma busca na região pertencente ao intervalo $[C_{primeiro(l)}^{[n]}, C_{primeiro(l)}^{[n-1]}]$, de modo que o ponto de mínimo dentro de uma indecisão aceitável seja localizado.

Observe que pelas antecipações, os blocos l e $l-1$ podem ser unidos ($l \leftarrow l-1$) diversas vezes. A união não leva a modificações no algoritmo descrito, visto que o bloco unido tem o mesmo tratamento do bloco l inicial.

Suponha que $\Delta^{[n]} = \min_{j \in Dim(b)} (e_j - a_j)$ seja a antecipação, após n movimentações, que fez com que a condição 2 se tornasse válida, posicionando o bloco numa região de tipo 2. O intervalo de indecisão $[C_{primeiro(l)}^{[n]}, C_{primeiro(l)}^{[n-1]}]$, com $z^{[1]} = C_{primeiro(l)}^{[n-1]} - C_{primeiro(l)}^{[n]}$, contém o ponto de mínimo custo do bloco l . A utilização de um procedimento de busca unidimensional em $z^{[1]}$ pode encontrar um intervalo menor de indecisão acerca de qual a posição do bloco que gera o mínimo custo. A saída do procedimento será a antecipação ótima Δ^* que substitui a antecipação $\Delta^{[n]}$.

Para tanto, utilizaremos um procedimento de busca unidimensional bastante conhecido, denominado método da seção áurea (LUENBERGER, pp. 199-200). No método da seção áurea, após m iterações, o intervalo de indecisão se reduz a $z^{[m]} = (2/(1+\sqrt{5}))^{m-1} z^{[1]}$. Considerando que o intervalo de indecisão final seja z , isto é, $z^{[m]} = z$, podemos dizer que são necessárias

$$m = 1 + \frac{\ln(z/z^{[1]})}{\ln(2/(1+\sqrt{5}))}$$

iterações para que o procedimento seja finalizado.

Se for o caso, após a localização de Δ^* , o programa resultante é π_{j+1} . O algoritmo faz sucessivas aplicações do procedimento acima formando os programas $\pi_2^{AIE}, \pi_3^{AIE}, \dots, \pi_{|J|}^{AIE}$.

O teorema abaixo, garante a otimalidade do algoritmo.

Teorema 2.1. Suponha que para um programa parcial π_j^{AIE} calculado pelo AIE, o valor mínimo da função-objetivo de seus blocos esteja em um intervalo de indecisão z . Considerando que dentro de z todos os blocos

forneçam o mesmo valor da função-objetivo, π_j^{AIE} leva ao menor valor de $g(\pi_j) = \sum_{i=1}^j g_i(C_i)$ dentre todos os programas possíveis para as primeiras j ordens.⁴

Demonstração: Como hipótese de indução, assumimos que em j o teorema é verdadeiro, isto é, $g(\pi_j^{AIE}) = \min_{\pi_j \in \Pi_j} g(\pi_j)$, onde Π_j é o conjunto de todos os programas possíveis para as j primeiras ordens. Para o programa vazio π_0^{AIE} , o teorema é verdadeiro. Portanto, só falta provar que para uma iteração qualquer, $j+1$, o teorema também é verdadeiro. Seja C_k e C_k^{AIE} os horários de término da ordem k em π_j e π_j^{AIE} , respectivamente. Podemos considerar dois casos: um onde a ordem pode terminar no horário desejado, $C_j^{AIE} + p_{j+1} \leq C_{j+1}^*$, e outro, onde a ordem não pode, $C_j^{AIE} + p_{j+1} > C_{j+1}^*$.

Caso 1. $C_j^{AIE} + p_{j+1} \leq C_{j+1}^*$. Este caso permite que o algoritmo programe $j+1$ de modo que $C_{j+1}^{AIE} = C_{j+1}^*$, e portanto, para π_{j+1}^{AIE} a função-objetivo será $g(\pi_{j+1}^{AIE}) = g(\pi_j^{AIE}) + g_{j+1}(C_{j+1}^*)$. Levando em conta que $C_{j+1}^* = \arg \min g_{j+1}(C_{j+1})$ por definição e que $g(\pi_j^{AIE}) = \min_{\pi_j \in \Pi_j} g(\pi_j)$ pela hipótese de indução, podemos dizer com certeza que $g(\pi_{j+1}^{AIE}) \leq g(\pi_{j+1})$. Portanto, o teorema é verdadeiro neste caso.

Caso 2. $C_j^{AIE} + p_{j+1} > C_{j+1}^*$. Como não é mais possível ocorrer $C_{j+1}^{AIE} = C_{j+1}^*$, o algoritmo programa inicialmente $j+1$ de modo que $C_{j+1}^{AIE} = C_j^{AIE} + p_{j+1}$, avaliando o valor de $e_{\text{primeiro}(l)}^{AIE}$ e a relação entre $G(l)$ e $G(l^+)$. $j+1$ é inserida no bloco l . Considerando a hipótese de indução e a convexidade de $g_{j+1}(C_{j+1})$, podemos dizer que $g_{j+1}(C_{j+1}^{AIE}) \leq g_{j+1}(C_{j+1}^{AIE} + \varepsilon)$ onde $C_{j+1}^* < C_{j+1}^{AIE} \leq C_{j+1}^{AIE} + \varepsilon$. Com essa consideração, sabemos que $g(\pi_{j+1})$ só pode ser diminuída caso haja uma antecipação Δ do bloco l . Sem perda de generalidade, vamos supor que as antecipações não gerem união dos blocos l e $l-1$.

Se em algum momento $e_{\text{primeiro}(l)}^{AIE} = 0$, o algoritmo não faz mais movimentações e o teorema prova a otimalidade do mesmo pois não há uma antecipação Δ que possa fazer com que o valor da função-objetivo diminua. Por outro lado, se nas movimentações $e_{\text{primeiro}(l)}^{AIE} \neq 0$, o algoritmo antecipa o bloco l até que aconteça um dos dois subcasos abaixo:

Subcaso 2a. A desigualdade $G(l) \leq G(l^+)$ torna-se verdadeira, sendo que na antecipação corrente, $[n]$, avaliou-se a região da função-objetivo e constatou-se que ela é equivalente ao tipo 3, 4 ou 5. Pela convexidade de $G(l) = \sum_{j \in l} g_j(C_j)$, a desigualdade é suficiente para garantir a que o mínimo esteja compreendido no intervalo z desde que a soma das amplitudes das movimentações à direita e à esquerda seja no máximo z . O teorema está provado para este subcaso.

⁴ Do ponto de vista prático, z é facilmente justificável visto que os horários de término geralmente não são penalizados numa base contínua. A especificação do desejo de término sempre vai acontecer num intervalo de tempo. A solicitação de entrega de um produto acontece no dia 5 por exemplo, e não na hora 12,34 do dia 5. Esse intervalo, que pode ser um dia, uma hora, ou qualquer outro intervalo, especifica que sob o ponto de vista do custo do programa, é indiferente qualquer que seja o término dentro desse intervalo pré-especificado.

Subcaso 2b. A desigualdade $G(l) \leq G(l^*)$ torna-se verdadeira, sendo que na antecipação corrente, $[n]$, avaliou-se a região da função-objetivo e constatou-se que ela é equivalente ao tipo 2. Pelo tipo de construção do algoritmo, na antecipação $[n-1]$ a região era do tipo 1, e por consequência, houve uma inversão do sinal da derivada da função-objetivo entre as iterações $[n-1]$ e $[n]$. Haverá uma busca utilizando o método da seção áurea na região pertencente ao intervalo $[C_{\text{primeiro}(l)}^{AIE[n]}, C_{\text{primeiro}(l)}^{AIE[n-1]}]$. Considerando o lema 2, pode-se dizer que acontecerão k iterações até que $z^{k|} \leq z$. Isso termina a prova do teorema. ////

3.3. Implementação computacional e questões relacionadas

Parte do algoritmo apresentado vai ser implementado com a utilização de filas de prioridade, que de acordo com TARJAN (1983, p. 33), podem ser definidas como estruturas de dados abstratas consistindo de uma coleção de itens, cada um dos quais possuindo um valor real associado denominado chave.

Para cada bloco de ordens b é mantida uma fila de prioridade $P(b)$, que determinará o quanto cada um poderá ser movimentado. Em outras palavras, haverá uma fila de prioridade para cada bloco. Cada fila de prioridade deverá manter dois valores de cada item: o primeiro é o índice das ordens pertencentes a $Dim(b)$; o segundo é o valor equivalente a $C_j - C_j^*$ (quantidade máxima que e_j pode ser diminuída, enquanto diminui o atraso de j) para cada índice $j \in Dim(b)$, doravante denominado chave da fila de prioridade.

O algoritmo foi implementado considerando oito operações. Para n o número de itens da fila de prioridade, e considerando que as filas de prioridade sejam representadas por árvores binárias, os tempos de solução no pior caso (os 6 primeiros retirados de TARJAN, cap. 3) e as oito operações são definidas a seguir:

- Operação 1.** $CriaFilaPrior(P)$. $O(1)$. Cria uma fila de prioridade vazia denominada P . A criação de uma pilha com n elementos demanda tempo $O(n)$;
- Operação 2.** $EncontraMin(P)$. $O(1)$. Encontra um item de mínima chave na fila de prioridade P e apresenta essa chave sem remover o item da mesma;
- Operação 3.** $ApagaMin(P)$. $O(\log n)$. Encontra um item de mínima chave na fila de prioridade P . Apresenta seu índice e remove o item da mesma. Essa operação elimina o nó do primeiro nível da árvore e une os dois ramos que eram filhos do nó que foi eliminado, definindo o novo nó do primeiro nível;
- Operação 4.** $Insere(j, x, P)$. $O(1) + O(\log n) = O(\log n)$. Insere o item j com chave x na fila de prioridade P . A operação consiste em criar uma nova fila de prioridade com o item j (com tempo $O(1)$) e depois unir essa fila com a fila P ($O(\log n)$);
- Operação 5.** $Une(P_1, P_2)$. $O(\log(n_1 + n_2)) = O(\log n)$. Une as filas de prioridade P_1 e P_2 de itens disjuntos (com n_1 e n_2 elementos respectivamente) em uma nova fila de prioridade que se transforma em P_1 . A fila de prioridade P_2 torna-se vazia. Maiores detalhes podem ser encontrados em TARJAN (pp. 39-40);
- Operação 6.** $AdicionaParaTodasChaves(x, P)$. $O(1)$. Adiciona-se x para todas as chaves dos itens pertencentes à fila de prioridade P . Neste caso, a árvore deve manter como chave não seu valor em si, mas o incremento que um nó filho tem sobre o nó pai. Assim, o valor de uma

chave específica num nó y pode ser obtido somando-se os valores de todos os nós que estão no caminho entre o nó do primeiro nível e o nó y . Com isso, esta operação adiciona x apenas ao nó raiz.

Operação 7: $\text{DefineTipoRegiãoEm}(-x)$. $O(n)$. A operação calcula $G(l)$ e $G(l^*)$ com uma antecipação de x e avalia o tipo de região.

Operação 8: $\text{SeçãoÁurea}(a,b,f,z)$. $O(\log(d_{max}/z))$. O método da seção áurea vai demandar $n = 1 + \log(z/\Delta) / \log(2/(1+\sqrt{5})) = 1 + \log(\Delta/z) / \log((1+\sqrt{5})/2) = O(\log(\Delta/z))$ (onde Δ é uma antecipação) iterações até que o valor de indecisão seja z . A maior antecipação possível será d_{max} ; ponto mais distante onde o algoritmo colocaria a ordem de modo que houvesse antecipações. Utiliza o método da seção áurea para a definição da posição de mínimo custo para o bloco. Dada uma função f , e o intervalo $[a,b]$ onde a busca deve ser realizada, a operação localiza, com uma precisão de z , a posição que leva o bloco a ter mínimo custo.

Apresenta-se adiante o pseudocódigo do AIE descrito anteriormente. O procedimento é chamado InsereEspera2 , conforme Figura 2, e tem como procedimento auxiliar o procedimento Antecipa2 , conforme Figura 3.

O código computacional do método da seção áurea é bastante comum e pode ser encontrado em diversas fontes como por exemplo em PRESS et al. (1992, pp. 390-5).

<p>procedimento <u>Insere Espera2</u> (σ, z) início para $j:=1$ até n faça $C_j^* := \text{argming}_j(C_j)$ $l:=1$; $\text{primeiro}(l):=1$; $\text{último}(l):=1$; se $C_1^* < p_1$ então $C_1 := p_1$; caso contrário $C_1 := C_1^*$; $G_j(l) := g_1(C_1)$; $\text{CriaFilaPrior}(P(1))$; para $j:=1$ até $n-1$ faça se $C_j + p_{j+1} < C_{j+1}^*$ então início $l:=l+1$; $C_{j+1} := C_{j+1}^*$; $\text{primeiro}(l):=j+1$; $\text{último}(l):=j+1$; $G_j(l) := g_{j+1}(C_{j+1})$; $\text{CriaFilaPrior}(P(l))$; fim; caso contrário início $\text{último}(l):=j+1$; $C_{j+1} := C_j + p_{j+1}$; $\text{Insere}(j+1, C_{j+1} - C_{j+1}^*, P(l))$; $G_j(l) := G_j(l) + g_{j+1}(C_{j+1})$; enquanto $G_v(l) > G_v(l^*)$ e $C_{\text{primeiro}(l)} - P_{\text{primeiro}(l)} \neq 0$ faça <u>Antecipa2</u>; fim de enquanto; fim; fim.</p>	<p>1 Uma seqüência completa e o intervalo de indecisão máximo é a 2 entrada do procedimento. 3 Cálculo de todos os horários de término desejados. 4 5 Atribuição da ordem $\bar{j}=1$ ao último bloco que também é o primeiro. 6 Se o horário de término desejado é anterior ao instante inicial. 7 Define-se o horário efetivo de início de $\bar{j}=1$. 8 9 Define-se o horário efetivo de início de $\bar{j}=1$. 10 Define-se os custos do bloco. Cria-se a primeira fila de prioridade. 11 Cálculo dos horários de início das outras ordens. 12 Se o hor. de término de $j+1$ sem espera é anterior ao hor. de 13 término desejado de $j+1$. 14 Cria-se um novo bloco b inserindo-se $j+1$ nele; atribui-se os custos 15 ao bloco bem como o hor. de término efetivo da ordem. 16 17 18 Se o hor. de término de j é posterior ou igual ao horário de 19 término desejado de $j+1$. 20 Insere-se a ordem no último bloco definindo seu horário de 21 término. 22 23 Se o bloco estiver num ponto onde uma antecipação faz com que 24 os custos diminuam então utiliza-se o procedimento 25 <u>Antecipa2</u>. 26 27 28 Final do procedimento.</p>
---	---

Figura 2: Pseudocódigo para inserção de espera em seqüência predefinida; custos das ordens representados por funções convexas dos horários de término

procedimento Antecipa2	
início	Inicialização do procedimento.
$\Delta 1 := \text{EncontraMin}(P(l));$	29
se $l=1$ então	30 Máximo adiantamento das ordens atrasadas do bloco l de modo
$\Delta 2 := C_1 - p_1;$	31 que uma primeira delas saia de $\text{Dec}(l)$ e vá para $\text{Cre}(l)$.
caso contrário	32 Máxima movimentação de l se houver só um bloco.
$\Delta 2 := C_{\text{primeiro}(l)} - P_{\text{primeiro}(l)} - C_{\text{último}(l-1)};$	33
$\Delta := \min\{\Delta 1, \Delta 2\};$	34 Máxima movimentação de l se houver mais do que um bloco.
$\text{NovaRegião} := \text{DefineTipoRegiãoEm}(-\Delta);$	35 Máxima movimentação de l em qualquer caso.
se $\text{NovaRegião} = \text{Tipo2}$ então	36 Verifica a região da função para uma antecipação de Δ
$\Delta := \text{SeçãoÁurea}(C_{\text{primeiro}(l)} - \Delta,$	37
$C_{\text{primeiro}(l)}, G_f(l), z);$	38 Utiliza o método da seção áurea para definir a antecipação ideal.
$\text{AdicionaParaTodasChaves}(-\Delta, P(l));$	39 Antecipação do bloco em uma magnitude de Δ .
$C_{\text{primeiro}(l)} := C_{\text{primeiro}(l)} - \Delta; C_{\text{último}(l)} := C_{\text{último}(l)} - \Delta;$	40 Redefinição dos horários de término.
enquanto $\text{EncontraMin}(P(l)) = 0$ faça	41 Enquanto houver ordens que deixaram de estar atrasadas.
$k := \text{ApagaMin}(P(l));$	42 Retira a ordem de l .
fim de enquanto;	43
se $l > 1$ e $C_{\text{último}(l-1)} = C_{\text{primeiro}(l)} - P_{\text{primeiro}(l)}$ então	44 Se l encostou em $\Gamma 1$.
início	45
$\text{Une}(P(l-1), P(l)); \text{último}(l-1) := \text{último}(l);$	46 Une l e $\Gamma 1$. Redefine a última ordem de l .
$G_f(l-1) := G_f(l-1) + G_f(l); l := l-1;$	47 Redefine os custos de l . Redefine l .
fim;	48
fim;	49 Final do procedimento.

Figura 3: Pseudocódigo do procedimento Antecipa2

No pseudocódigo não se introduziu uma definição de α pois ela é dependente de características do problema a ser analisado. Além dessa dependência do problema, o cálculo de α não oferece maiores complicações nem tem um impacto significativo no tempo computacional do algoritmo.

O leitor pode verificar que $G(l)$ ora é usada como $G_f(l)$ e ora como $G_v(l)$. A diferença entre ambas é que a primeira representa a função $G(l)$ e a segunda o valor numérico da função $G(l)$. Embora não haja uma explicitação, $g_j(C_j)$ segue o mesmo padrão nas operações de atribuição, ou seja, se $x := G_f(l) + g_j(C_j)$, estamos querendo dizer que a função $g_j(C_j)$ está sendo acrescentada à função $G_f(l)$, enquanto que se a operação for do tipo $x := G_v(l) + g_j(C_j)$, estamos querendo dizer que o valor de $g_j(C_j)$ está sendo adicionado a $G_v(l)$.

Proposição. O tempo computacional do algoritmo sugerido é de $O(|J| \max\{|J|, \log(d_{\max}/z)\})$, onde d_{\max} é a maior data de entrega, $|J|$ é o número de ordens e z é a precisão com que o procedimento de busca vai definir a região ótima.

Demonstração: Desconsiderando as linhas 36, 37, 38, 41, 42 e 43, o tempo de execução do procedimento Antecipa2 pode ser considerado como $O(1)$. O tempo para a realização do método da seção áurea (linhas 37 e 38), como visto anteriormente, é $O(\log(d_{\max}/z))$ e o tempo para realização da operação $\text{DefineTipoRegiãoEm}(x)$ demanda $O(j)$ considerando que o bloco contenha j ordens. No pior caso, as operações serão utilizadas tantas vezes quanto o procedimento Antecipa2 o for. O procedimento ApagaMin (l. 41, 42 e 43) possui tempo $O(\log j)$ para j ordens na pilha. No pior caso, o procedimento Antecipa2 será utilizado $|J|-1$ vezes. Assim, o tempo total demandado pode ser definido como

$$\sum_{j=1}^{|J|-1} \{\log(d_{\max}/z) + j\} = (|J|-1)\log(d_{\max}/z) + \frac{(|J|-1)|J|}{2}$$

$$= O(|J| \max\{|J|, \log(d_{\max}/z)\}).$$

Se o procedimento Antecipa2 foi utilizado $|J|-1$ vezes, a operação Insere (l. 21) também o foi. O tempo de execução das linhas 3 a 10 é $O(|J|)$ e das linhas 12 a 22 é $\sum_{j=1}^{|J|} \log j$. Considerando a concavidade da função $\log j$, e que $\log x = \ln x / \ln 2$, podemos dizer que

$$\sum_{j=1}^{|J|} \log j \leq \int_1^{|J|+1} \log x dx = \frac{1}{\ln 2} x \ln x \Big|_1^{|J|+1} = O(|J| \log |J|).$$

Portanto, no pior caso, o tempo total demandando pelas linhas 12 a 22 é $O(|J| \log |J|)$. Portanto o tempo total do procedimento Insere Espera2 é

$$O(|J| \log |J|) + O(|J| \max\{|J|, \log(d_{\max}/z)\}) = O(|J| \max\{|J|, \log(d_{\max}/z)\}),$$

conforme queríamos demonstrar. ////

A ordem do tempo no pior caso poderia ser um pouco melhorada em alguns casos se considerássemos que a realização dos $|J|-1$ métodos da seção áurea demanda tempo $\sum_{j=1}^{|J|-1} \{\log(d_j/z)\}$ ao invés de $\sum_{j=1}^{|J|-1} \{\log(d_{\max}/z)\}$.

Observe que no caso particular onde $d_{\max} = d_j \ (\forall j)$, $\sum_{j=1}^{|J|-1} \{\log(d_j/z)\}$

$$= \sum_{j=1}^{|J|-1} \{\log(d_{\max}/z)\}.$$

A proposição mostra portanto que o algoritmo tem tempo de solução **polinomial** com o tamanho de entrada, pois depende de $\log(d_{\max})$, ou mais formalmente, o tempo de solução é limitado por uma função polinomial do número de *bits* necessários para especificar uma instância do problema em representação binária⁵.

4. Discussão adicional

Os procedimentos aqui propostos devem ser utilizados em *softwares* de programação da produção. Os procedimentos são melhorativos e de grande detalhamento pois geram informações que provavelmente não precisam de tratamento adicional para serem utilizadas.

O tema tratado parece ter desdobramentos interessantes na criação de procedimentos que o utilizem. Como ele já tem uma função-objetivo bastante genérica e o AIE associado possui um tempo de solução baixo, parece improvável a obtenção de resultados adicionais muito interessantes. A expansão da abordagem para funções multimodais talvez possa ser interessante do ponto de vista teórico.⁶

⁵ Considerando que $[x]$ represente a parte inteira de x , o número de *bits* $w(n)$ necessários para representar um número inteiro n em um registro é dado por $w(n) = [\log |n|] + 1$, se $n \neq 0$ e $w(n) = 1$ caso contrário. Se o algoritmo dependesse de d_{\max} ao invés de $\log(d_{\max})$ ele seria pseudopolinomial, ou seja, polinomial caso a instância seja especificada em representação unária.

⁶ Este trabalho é uma versão condensada de COLIN (2000, cap. 2).

Referências bibliográficas

- BAZARAA, Mokhtar S.; SHERALI, Hanif D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming: theory and algorithms**. 2. ed. New York, Wiley, 1993.
- COLIN, Emerson C. Beam search filtrado com inserção de ociosidade na programação de uma máquina em ambiente do tipo JIT. **Gestão & Produção**, v. 5, n. 2, pp. 117-32, 1998.
- COLIN, Emerson C. **Distribuição de carga e variação de capacidade na programação da produção**: resultados na inserção de espera e na utilização de capacidade adicional. São Paulo, 2000. 108 pp. Tese (Doutoramento) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- COLIN, Emerson C.; SHIMIZU, Tamio. Algoritmo de programação de máquinas individuais com penalidades distintas de adiantamento e atraso. 10 pp. A aparecer em **Pesquisa Operacional**, 2000.
- DAVIS, J. Steve; KANET, John J. Single-machine scheduling with early and tardy completions costs. **Naval Research Logistics**, v. 40, pp. 85-101, 1993.
- FRY, Timothy D.; ARMSTRONG, Ronald D.; BLACKSTONE, John H. Minimizing weighted absolute deviation in single machine scheduling. **IIE Transactions**, v. 19, n. 4, pp. 445-50, 1987.
- GAREY, Michael R.; TARJAN, Robert E.; WILFONG, Gordon T. One-processor scheduling with symmetric earliness and tardiness penalties. **Mathematics of Operations Research**, v. 13, n. 2, pp. 330-48, 1988.
- LAWLER, E. L. A "pseudopolynomial" algorithm for sequencing jobs to minimize total tardiness. **Annals of Discrete Mathematics**, v.1, pp. 331-42, 1977.
- LUENBERGER, David G. **Linear and nonlinear programming**. 2 ed. Reading, Addison-Wesley, 1984.
- MORTON, Thomas E.; PENTICO, David W. **Heuristic scheduling systems**: with applications to production systems and project management. New York, Wiley, 1993.
- PRESS, William H.; TEUKOLSKY, Saul A.; VETTERLING, William T.; FLANNERY, Brian P. **Numerical recipes in FORTRAN**: the art of science computing. 2. ed. Cambridge, MA, Cambridge University Press, 1992.
- TARJAN, R. E. **Data structures and network algorithms**. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1983.
- YANO, Candace Arai; KIM, Yeong-Dae. Algorithms for a class of single-machine weighted tardiness and earliness problems. **European Journal of Operational Research**, v. 52, pp. 167-78, 1991.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PRO/001 - Um Modelo de Procedimento para a Avaliação da Produtividade na Administração dos Materiais - ROBERTO GIRO MOORI, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/002 - O Pensamento Clássico em Administração e Engenharia de Produção e o Modelo Japonês: esboço de análise a partir do paradigma da complexidade - MAURO ZILBOVICIUS
- BT/PRO/003 - Trabalho de Formatura 1988 - 1992: Histórico das Áreas e Emprego de Métodos Quantitativos - EDUARDO OSAMU TSUJIMURA, CELMA DE OLIVEIRA RIBEIRO, HUGO YOSHIDA YOSHIZAKI
- BT/PRO/004 - Modelo Econômico de Empresa Sucroalcooleira - EDUARDO HEIJI TOMIYA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/005 - Organisation Et Systeme de Gestion: A La Recherche D'Une Nouvelle Coherence - PHILIPPE ZARIFAN
- BT/PRO/006 - Estudo Sobre o Impacto da Estruturação da Tecnologia da Informação na Organização e Administração das Empresas - FERNANDO JOSÉ BARBIN LAURINDO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/007 - Sistema Flexíveis de Informações Baseadas em Medidas de Produtividade - WAGNER DÄUMICHEN BARRELA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/008 - Análise de Contagens Multivariadas - LINDA LEE HO, PEDRO L. O. COSTA NETO, JULIO DA MOTTA SINGER
- BT/PRO/009 - Desenvolvimento de um Sistema de Medidas de Desempenho em uma Trading - MATHEUS MORGAN VILLARES, MÁRCIA TERRA DA SILVA
- BT/PRO/010 - Análise Organizacional e Análise do Trabalho em uma Indústria de Alimentos - ANA VALÉRIA CARNEIRO DIAS, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/011 - QS-9000: Sistema de Garantia da Qualidade para Indústrias Automobilísticas - RENÉ MARCELO GONÇALVES, MELVIN CYMBALISTA
- BT/PRO/012 - Planejamento Estratégico e Competitividade: Contribuições ao Processo e Ferramenta de Análise em Empresa Petroquímica - LUCIANO NITRINI GUIDOLIN, HENRIQUE LUIZ CORRÊA
- BT/PRO/013 - Proposta para Avaliação Ambiental: O Caso dos Danos Florestais - LUIZ CESAR RIBAS, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/014 - Sistemas Flexíveis de Informações na Manufatura - ACÁCIO FELICIANO NETO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/015 - As Três Dimensões da Gestão da Qualidade - MAURÍCIO SALOMÃO JARDINI, JOSÉ JOAQUIM DO AMARAL FERREIRA
- BT/PRO/016 - Barreiras e Facilitadores na Transferência de Tecnologia da Engenharia P&D para a Produção: Caso de uma Transnacional - ROBERTO R. DE VASCONCELLOS, AFONSO CARLOS CORREA FLEURY
- BT/PRO/017 - Organização do Trabalho em Serviços: A Questão da Autonomia em Postos de Atendimento - MÁRCIA TERRA DA SILVA, AFONSO CARLOS CORREA FLEURY
- BT/PRO/018 - A Utilização da Engenharia Simultânea no Aprimoramento Contínuo e Competitivo das Organizações: Estudo de Caso do Modelo EMBRAER - JORGE MUNIZ JUNIOR, GUILHERME ARY PLONSKI, PAULO T. M. LOURENÇÃO
- BT/PRO/019 - Considerações sobre o Planejamento para a Qualidade de Serviços e os Fatores de Sucesso de Novos Empreendimentos - TUPANANGYR GOMES FILHO, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/020 - Time Based Competitiveness in Brazil: Whys and Hows - SANDRA S. ROHR, HENRIQUE L. CORRÊA
- BT/PRO/021 - Tecnologia e Competitividade na Indústria de Máquinas Têxteis - Um Estudo sobre Capacitação e Aprendizagem Tecnológica - NEUSA SERRA, GUILHERME PLONSKY
- BT/PRO/022 - Autonomia e Trabalho em Grupo na Indústria Brasileira: Estudos de Casos - ROBERTO MARX, AFONSO CARLOS CORREA FLEURY
- BT/PRO/023 - O Perfil das Micro e Pequenas Empresas Industriais Mecânicas de Bauru sob o Enfoque da Gestão de Produtos: Problemas e Soluções - SYLVIO GUILHERME DE MELLO, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/024 - Gerenciamento Participativo de Projetos para a Introdução de Tecnologia Digital em Processos Contínuos - PAULINO GRACIANO FRANCISCHINI, AFONSO C. C. FLEURY
- BT/PRO/025 - Considerações sobre Mudanças Técnicas na Manufatura: Estudo de Casos na Indústria Siderúrgica - NADIA GEOSEF BANDOUK, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/026 - O Impacto da Globalização sobre as Indústrias do Setor Automobilístico Brasileiro - VANESSA MÜLLER, MÁRCIO ABRAHAM
- BT/PRO/027 - Sistema de Apoio a Decisões em uma Indústria de Embalagens de Papelão Ondulado - CARLOS ROGÉRIO YASUMI TANAKA, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/028 - Sistema para Gestão de Recursos de Fundos de Pensão - ALEXANDRE DE ZAGOTTIS, JOSÉ WOILER
- BT/PRO/029 - Uma Aplicação de Modelos de Programação Linear e de Estoques na Gestão Linear e de Estoques na Gestão de Carteiras - ANDRÉ SILVA TELLES LION, CELMA DE OLIVEIRA RIBEIRO
- BT/PRO/030 - Avaliação de Desempenho: Em Busca de Consistência Estratégica e Cultural - LEONARDO NICOLAS LETELIER PIMSTEIN, MÁRCIA TERRA DA SILVA

- BT/PRO/031 - Aplicações do OEE - Overall Equipment Effectiveness em uma Indústria Automobilística - LÚCIA CORREIA RAMA, MÁRCIO ABRAHAM
- BT/PRO/032 - Metodologia para o Lançamento de Produtos na Indústria de Alimentos - MAURÍCIO MAKOTO MIYASAKI, NILTON NUNES TOLEDO
- BT/PRO/033 - A Intranet como Solução Tecnológica para Organizações em Redes - EDUARDO GRITZ, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/034 - QOS: Um Sistema Gerencial e sua Implementação - RENATA BARTOLI DE NORONHA, MÁRCIO ABRAHAM
- BT/PRO/035 - Gereciamento da Tecnologia na Área Médica - JORGE NICOLAU RUFCA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/036 - Gestão Competitiva de Preços Uma Visão Integrada - JOSÉ PAULO ALVES FUSCO, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/037 - Rede UNESP: Protótipo de Gestão da Interação Academia-Empresa em uma Universidade Multicampi - JANIO ITIRO AKAMATSU, GUILHERME ARY PLONSKI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PRO/038 - Aplicação da Teoria dos Sistemas Difusos em Processos de Decisão de Múltiplos Estágios com Múltiplos Objetivos - WALDEMAR GARÁ FILHO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/039 - Modelos para Produção, Produção de Modelos: Contribuição à Análise da Gênese, Lógica e Difusão do Modelo Japonês - MAURO ZILBOVICIUS, AFONSO FLEURY
- BT/PRO/040 - Ergonomia e Usabilidade na Concepção de Sistemas de Informação - LUÍS ALVES DA SILVA, LAERTE IDAL SZNELWAR
- BT/PRO/041 - Organização e Produção Industrial de Serviços - PHILIPPE ZARIFIAN, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/042 - O Planejamento com Balanceamento de Linha - LUÍS FERNANDO PINTO DE ABREU, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/043 - Rede de Indicadores de Desempenho para Gestão de uma Usina Hidrelétrica - ANSELMO ALVES BANDEIRA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/044 - ISO 14001 - Sistemas de Gestão Ambiental - RICARDO GROSS HOJDA, JOSÉ JOAQUIM DO AMARAL FERREIRA
- BT/PRO/045 - Inserção de Ociosidade e Beam Search Filtrado: Aplicações à Programação de uma Máquina em Ambiente do Tipo JIT - EMERSON C. COLIN, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/046 - A Practical Approach to Interval Estimation for the Weibull Mean Lifetime - ENRICO A. COLOSIMO, LINDA L. HO
- BT/PRO/047 - Análise Ergonômica do Trabalho e Projeto Organizacional: Uma Discussão Comparada - MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/048 - Aplicação de um Modelo de Redes Neurais à Programação da Produção - CELSO SAMI SAAD, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/049 - Políticas de Cobrança e Controle sobre o Efluente Industrial pelo uso dos Recursos Hídricos - MILTON SPENCER VERAS NETO, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/050 - Uma Generalização de Indicadores Técnicos Através do Filtro de Kalman - CELMA DE OLIVEIRA RIBEIRO, JULIO MICHAEL STERN
- BT/PRO/051 - Pensando Sistemáticamente: Estudo de Caso Ilustrativo da Integração de duas Abordagens de Intervenção Organizacional - TÁCIDO VELLOSO NOBRE, AFONSO C. C. FLEURY
- BT/PRO/052 - Gestão da Qualidade de Dados - LUCIO COLANGELO FILHO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/053 - O Projeto do Trabalho na Manufatura Metal-Mecânica Automatizada Flexível - EDUARDO GOMES BENTO, AFONSO C. C. FLEURY
- BT/PRO/054 - A Gestão da Qualidade em Serviço - KLEBER CAVALCANTI NÓBEGA, PEDRO LUIZ DE OLIVEIRA COSTA NETO
- BT/PRO/055 - A Família de Normas NBR ISSO 9000 no Ambiente de Serviços - FERNANDO GIACHINI LOPES, JOSÉ JOAQUIM DO AMARAL; FERREIRA
- BT/PRO/056 - Projeto de Organização do Trabalho em Grupos Semi-Autonômos na Indústria de Processos Contínuos - MARCELO CRESCENTI AULICINO, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/057 - Avaliação do Uso de Novas Tecnologias de Informação nas Empresas - Internet, Intranet e Extranet - Estudos de Casos - ANTONIO FRANCISCO FERREIRA DE CASTILHO, MARCELO SCHNECK DE PAULA PESSOA
- BT/PRO/058 - Administração da Qualidade e Produtividade por Macroprocessos Organizacionais: Um Estudo Sistemático de Estratégias Competitiva Provendo Valor ao Cliente - CLOVIS ARMANDO ALVARENGA NETTO, PEDRO LUIZ DE OLIVEIRA COSTA NETO
- BT/PRO/059 - Um Sistema de Apoio às Decisões de Pequenas Indústrias - REINALDO PACHECO DA COSTA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/060 - Estudo da Estratégia Adotada pelas Empresas de Autopeças - RODRIGO MORETTI BRANCHINI, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/061 - Modelo para Geração de Planos de Melhoria em uma Indústria Têxtil - Orientação para o Cliente - ALCIDES SANTO PETRO JÚNIOR, GREGÓRIO BOUER
- BT/PRO/062 - A Fundamental Analysis of Brazilian Stock Returns - MAURO HALFELD

- BT/PRO/063 - Sistemas de Medição de Desempenho: Uma Revisão da Literatura – ROBERTO ANTONIO MARTINS, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/064 - Consórcio Modular e Condomínio Industrial: Elementos para Análise de Novas Configurações Produtivas na Indústria Automobilística – ANA VALÉRIA CARNEIRO DIAS, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/065 - Modelo Interativo Empresa-Universidade no Desenvolvimento de Produtos – JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DA SILVA, GUILHERME ARY PLONSKI
- BT/PRO/066 - Uma Análise de Redes de Cooperação nas Pequenas e Médias Empresas do Setor das Telecomunicações – JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DA SILVA, GUILHERME ARY PLONSKI
- BT/PRO/067 – O TQM em Empresas Líderes: Uma Discussão sobre Organização e Gestão – MÔNICA DE FATIMA BIANCO, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/068 – Gestão do Conhecimento: Aspectos Conceituais e Estudo Exploratório sobre as Práticas de Empresas Brasileiras – JOSÉ CLÁUDIO CYRINEU TERRA, GUILHERME ARY PLONSKI
- BT/PRO/069 – O Conceito de Evento na Análise Organizacional das Atividades de Manutenção Corretiva – CARLOS ARTHUR MATTOS TEIXEIRA CAVALCANTE, AFONSO CARLOS CORREA FLEURY
- BT/PRO/070 - Does Bank Interest - Trate Risk Depend on Inflation Levels? – MAURO HALFELD
- BT/PRO/071 – Análise de Algumas Práticas Utilizadas no Cálculo do BDI – Bonificação e Despesas Indiretas – Para a Fixação de Preços de Obras na Construção Civil – MARIA ALICE PIUS, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/072 – Gestão Integrada da Informação: Proposição de um Modelo de Organização Baseado no uso da Informação como Recurso da Gestão Empresarial – LUCIANO RAIZER MOURA, MARCELO SCHNECK DE PAULA PESSÔA
- BT/PRO/073 – Parceria Industrial – Sem Envolvimento Acionário, com Foco nas Fases de Projeto e Fabricação – RAUL ELOY DA SILVA DINIZ, JOÃO AMATO NETO
- BT/PRO/074 – Estimating the Shelf-Life Time by Logistic Regression in the Sensorial Tests – LINDA LEE HO
- BT/PRO/075 – Diagnóstico Estratégico das Operações de uma Empresa do Segmento Têxtil – MARCELO ANDRADE ABDO; ANTÔNIO CANTIZANI FILHO
- BT/PRO/076 – Estudo dos Seis-Sigma: a Qualidade como Estratégia de Negócios – NELSON RUSSO FERREIRA; MÁRCIO ABRAHAM
- BT/PRO/077 – Análise de Viabilidade Econômica de Novos Produtos através da Teoria de Portfolios – DENIS BARROS PEDREIRA; CELMA DE OLIVEIRA RIBEIRO
- BT/PRO/078 – Considerações sobre o Custeio Integrado ABC-EVA e Aplicação Prática em uma Confecção – TANIA SZTAMFATER; ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/079 – Gestão por Processos: Um Estudo de caso do Processo de Desenvolvimento de Novos Produtos no Setor de Autopeças – NILSON JAIR SANTIN, ROBERTO MARX
- BT/PRO/080 – A Informação sobre a Satisfação do Cliente e seu Papel na Gestão da Qualidade em Empresas de Alimentos – AYMEE TAMARA TORRES PÉREZ, ROBERTO GILIOLI ROTONDARO
- BT/PRO/081 – Métricas para Orçamento e Planejamento da Produção de Software – ANDRÉ LUIZ PRESENDE TRINDADE, MARCELO SCHNECK DE PAULA PESSÔA
- BT/PRO/082 – Uso de uma Estratégia de Sistemas Abertos, em Tecnologia da Informação, Tendo como Base uma Construção de uma Arquitetura – VENICIO VILAS – BÔAS, MARCELO PESSOA
- BT/PRO/083 – Novas Formas Organizacionais na Área de Projetos do Subsetor de Edificações como Estratégia Competitiva: Estudo de Casos – SANDRA RUFINO, JOÃO AMATO NETO
- BT/PRO/084 – Indicadores de Desempenho para a Avaliação do Desenvolvimento de Projetos nas Indústrias de Software – GABRIELA BARBARÁN – PAULINO GRACIANO FRANCISCHINI
- BT/PRO/085 – Hoshin Kanri – Uma Análise na Implementação em Operações de Manufatura no Brasil – JOÃO BATISTA TURRIONI, PEDRO LUIZ DE OLIVEIRA COSTA NETO
- BT/PRO/086 – Controle Estatístico de Processo na Presença de Dados Autocorrelacionados – ALBERTO WUNDERLER RAMOS, PEDRO RODRIGUES BUENO NETO
- BT/PRO/087 – A Practical Method to Find the Optimum Mean Location Under a Quadratic Cost in a Poor Capability Process – LINDA LEE HO, ROBERTO QUININO
- BT/PRO/088 – Estrutura Organizacional para Instituições do Terceiro Setor – MARIANA SERRAJORDIA ROCHA DE MELLO, MARCIA TERRA DA SILVA
- BT/PRO/089 – Custeio de Atendimento Bancário via Caixa – Eletrônico – RENATO GNECCO AVELAR, MÁRCIO NOVAES COELHO
- BT/PRO/090 – Modelo de Otimização da Estrutura de Capital para o Setor de Telefonia Móvel Brasileiro – BRUNO MARTINS SILVA, MAURO ZILBOVICIUS
- BT/PRO/091 – Utilização da Análise Ergonômica do Trabalho para Concepção e Aplicação de Uma Metodologia para Avaliação da Exposição ao Ruído de Obras – MARIA DE LOURDES MOURE, LAERTE IDAL SZNELWAR
- BT/PRO/092 – Análise de um Projeto de Implementação de Trabalho em Grupo Semi-Autônomos – ELIANE SHIOBARA, ROBERTO MARX

- BT/PRO/093 – Implementando um Protótipo de Sistema Flexível de Informação – JACQUELINE PETINON, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/094 – Projeto de Redes Logísticas com Consideração de Estoques e Modais: Aplicação de Programação Linear Mista – ANTÔNIO CARLOS MARTOS, HUGO T. Y. YOSHIKAZI
- BT/PRO/095 – Um Estudo Sobre a Avaliação da Eficácia da Tecnologia da Informação nas Organizações – FERNANDO JOSÉ BARBIN LAURINDO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/096 – Inserção de Ociosidade e Beam Search Filtrado: Aplicações à Programação de uma Máquina em ambiente do Tipo JIT – EMERSON C. COLIN, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/097 – Metodologia de Gerenciamento da Qualidade em Ambiente de Projetos de Engenharia – LUIZ ANTONIO RODRIGUES VERDI, JOSÉ JOAQUIM DO AMARAL FERREIRA
- BT/PRO/098 – A Influência da Estrutura e da Organização do Trabalho na Qualidade do Atendimento: Um Estudo de Caso em Serviços – MILTON JUNGMAN, ROBERTO MARX
- BT/PRO/099 – A Liga do Açúcar: Integração da Cadeia Produtiva do Açúcar à Rede de Suprimento da Indústria de Alimentos – MARIA RITA PONTES ASSUMPTÃO ALVES, GUILHERME ARY PLONSKI
- BT/PRO/100 – Contribuição à Especificação Funcional do MRP/MRP II. Uma Aplicação em ERP – FERNANDO PIERO LAUGENI, PAULINO GRACIANO FRANCISCHINI
- BT/PRO/101 – Gestão da Qualidade nas Micro e Pequenas Empresas do Comércio Varejista – WILSON DE CASTRO HILSDORF, ROBERTO GILIOLI ROTONDARO
- BT/PRO/102 – Gestão e Trabalho em Cooperativas de Produção: Dilemas e Alternativas à Participação – NILSON TADASHI ODA, MARIO SERGIO SALERNO
- BT/PRO/103 – Contribuição à Medida de Desempenho em Células de Manufatura – CÉLIO OLDERIGI DE CONTI, PAULINO GRACIANO FRANCISCHINI
- BT/PRO/104 – Data Mining: Conceitos Básicos e Aplicações – JOSÉ ALBERTO FLORENTINO RODRIGUES FILHO, TAMIO SHIMIZU
- BT/PRO/105 – A Utilização do Conceito de Custos de Transação na Seleção de Fornecedores de Insumos Produtivos na Indústria Farmacêutica – GERMANO MANUEL CORREIA, JOÃO AMATO NETO
- BT/PRO/106 – Análise de Modelos e Práticas de Planejamento e Programação da Produção: Um Estudo de Caso na Indústria Farmacêutica – MARCO AURÉLIO DE MESQUITA, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/107 – Repetitive Test as an Economic Alternative Procedure to Control Attributes With Diagnosis Errors – ROBERTO C. QUININO, LINDA LEE HO
- BT/PRO/108 – Os Relacionamentos na Cadeia de Suprimento sob o Paradigma da Desintegração Vertical de Processos: Um Estudo de Caso – ANDRÉ AMBROSIO ABRAMCZUK, JOÃO AMATO NETO
- BT/PRO/109 – Analisando a Indústria de Futebol e suas Dinâmicas: Quais as Forças que Empurram os Clubes de Futebol Rumo à Profissionalização de suas Atividades – MARVIO PEREIRA LEONCINI, MÁRCIA TERRA DA SILVA
- BT/PRO/110 – A Tecnologia da Informação nas Cadeias Produtivas: O Uso de EDI na Indústria Automobilística – RENATO GALLINA, AFONSO CARLOS C. FLEURY
- BT/PRO/111 – Avaliação do Impacto das Mudanças Mercadológicas sobre o Perfil de Competências Gerenciais nas Empresas Calçadistas Gaúchas Voltadas à Exportação – GIANCARLO MEDEIROS PEREIRA, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PRO/112 – Qualidade de Serviços nas Organizações do Terceiro Setor – CRISTIANO ROCHA HECKERT, MÁRCIA TERRA DA SILVA
- BT/PRO/113 – Metodologia para Avaliação de Investimentos em Projetos Ambientais – HELVÉCIO LUIZ REIS, ANTÔNIO RAFAEL NAMUR MUSCAT
- BT/PRO/114 – Avaliação de Desempenho: Uma Abordagem Estratégica Aplicada ao Controle das Variáveis do Setor Siderúrgico – ANSELMO ALVES BANDEIRA, ISRAEL BRUNSTEIN, LINDA LEE HO
- BT/PRO/115 – Comparison of Economic Design Models for \bar{X} and R Control Charts for Regenerative and Non-Regenerative Processes – OSIRIS TURNES, LINDA LEE HO, CHRISTIAN RAINIER IMAÑA
- BT/PRO/116 – Aplicação de Modelos de Gestão de Estoque na Área de Peças de Reposição de Empresa do Setor de Linha Branca – RODRIGO SALAMONI, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/117 – Aplicação da Análise Ergonômica no Trabalho da Recepcionista no Pronto Socorro de um Hospital Geral – SANDRA HORUMI TANAKA, MARLY MONTEIRO DE CARVALHO
- BT/PRO/118 – Ciclo de Evolução e Obsolescência Tecnológica – O Caso das Copiadoras – SOLANGE APARECIDA MACHADO, GUILHERME ARY PLONSKI
- BT/PRO/119 – Identifying Management Science/Operations Research Modeling Opportunities in Logistics – HUGO T. Y. YOSHIKAZI, GUILHERME A. PLONSKI
- BT/PRO/120 – Dois Estudos de Caso sobre Centralização e Descentralização de Atividades de Engenharia – DAVI NOBORU NAKANO, AFONSO CARLOS CORREA FLEURY
- BT/PRO/121 – Um Estudo para a Aplicação de "Benchmarking" nas Escolas da Rede Municipal de Ensino de São Paulo – MOACYR ALBANO BRAZ, JOSÉ JOAQUIM DO AMARAL FERREIRA
- BT/PRO/122 – Flexibilidade e Inovação na Indústria Bancária: O Banco Virtual – MARCOS BADER, ISRAEL BRUNSTEIN

- BT/PRO/123 – Implicações da Utilização de Políticas e Procedimentos de Estoques no Desempenho de Redes de Distribuição Física – JORGE LUIZ DE BIAZZI, MIGUEL CEZAR SANTORO
- BT/PRO/124 – Efeitos da Reestruturação Produtiva sobre as Competências dos Profissionais: O Caso do Engenheiro Químico do Brasil – CARMEN DOLORES STRAUBE, AFONSO C. CORREIA FLEURY
- BT/PRO/ 125 – Determinação da Vida de Prateleiras (*Shelf Life*) de um Produto Alimentício com Base em Avaliações Sensoriais: Uma Proposta Alternativa de Modelagem Estatística – MARTA AFONSO FREITAS, PEDRO RODRIGUES BUENO NETO, WAGNER BORGES
- BT/PRO/126 – Capacitação Tecnológica e Organizacional e Competitividade Brasileira nos Anos 90 – SUELY MUNIZ, GULHERME ARY PLONSKI