



PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA À OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO EM SIDERURGIA: UM ESTUDO DE CASO – APERAM SOUTH AMERICA¹

Cláudio Teixeira Gomes²
Dair Jose de Oliveira³

Resumo

O problema de balanceamento de linha em uma indústria pode ter uma configuração bastante complexa quando possui processos de produção diferentes, compartilhando os mesmos equipamentos. O planejamento da produção deve considerar a demanda de clientes, as necessidades de matérias-primas e estoques, as capacidades dos equipamentos, a possibilidade de falhas nos equipamentos e restrições nos processos de fabricação. A filosofia adotada foi a de desenvolver uma ferramenta de simples manipulação e manutenção, com facilidade de divulgação e boa portabilidade. O modelo matemático desenvolvido visa o balanceamento da produção a partir do processamento da matéria prima até o atendimento ao pedido do cliente passando por todas as fases de produção. O modelo matemático resultante processa um do Plano de Produção e Vendas (PPV) com 2.328 variáveis e mais de 8.000 restrições em 40 segundos com a utilização da ferramenta de otimização Ipsolve, planilha eletrônica Excel e um computador desktop com Windows XP, um processador de 2 GHz e 1.47 GB de RAM.

Palavras-chave: Planejamento da produção; Programação linear; Lpsolve; Solver.

LINEAR PROGRAMMING APPLIED TO THE OPTIMIZATION OF PRODUCTION PLANNING IN STEEL PLANT: A CASE STUDY - APERAM SOUTH AMERICA

Abstract

The line balancing problem in a steel plant that has a quite complex configuration when have different production processes and share the same equipments. The production planning must consider the customers' demand, the needs of raw materials and inventory, the equipment's capacity, the possibility of equipment failure and restrictions in manufacturing. The adopted philosophy was to develop a tool with easy and simple manipulation and maintenance and also with ease of dissemination and good portability. The mathematical model, developed initially using the tool of the Excel Solver optimization, aims to balance the output from the processing of raw materials to supply the request of the client through all stages of production. The resulting mathematical model of the processes a Production and Sales Plan (PPV) with over 2,328 variables and 8,000 constraints in 40 using the optimization tool Ipsolve and a desktop computer with Windows XP, processor of 2 GHz and 1.47 GB of RAM.

Key words: Production planning; Linear programming; Lpsolve; Solver.

¹ Contribuição técnica ao 31º Seminário de Logística – Suprimentos, PCP, Transportes, 19 a 22 de junho de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² M.Sc. Engenharia Industrial, Especialista da Gerência de Melhoria Contínua e Qualidade da Aperam; Timóteo, MG.

³ Dr. Eng. Elétrica, Professor Adjunto da Universidade Federal de Itajubá/Campus Itabira, MG.



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

1 INTRODUÇÃO

A capacidade produtiva dos ativos (equipamentos e estoques) é muito importante na gestão de uma empresa, pela oferta ao mercado, pelo custo do estoque de alto valor agregado, pela manutenção do processo produtivo, pela entrega de valor ao cliente e, principalmente, pela margem de contribuição resultante. A gestão da capacidade produtiva dos ativos constitui um componente importante da administração do portfólio da empresa, principalmente quando possui limitações de capacidade em alguns equipamentos como é o caso de grande parte das empresas.⁽¹⁾

Frente a este contexto, a otimização do planejamento de produção torna-se cada vez mais importante para as organizações. A melhor utilização dos equipamentos, menores níveis de estoques, menores custos de produção, menor tempo de produção (*lead-time*) e garantia do nível de serviço são estratégias que muitas vezes caminham em sentidos opostos.

A maioria das empresas tem uma variedade de produtos que chegam muitas vezes à casa de centenas. Dessa forma, torna-se muito difícil, senão impossível, efetuar uma previsão de demanda para cada um dos produtos fabricados. Deve-se definir uma metodologia para agrupar esses produtos e, conseqüentemente, as diferentes demandas em um conjunto menor, que seja representativa do todo. A demanda prevista para esse grupo ou família de produtos é denominada demanda agregada.⁽¹⁾

Outra necessidade das empresas, que reflete diretamente no custo total, é o balanceamento do fluxo produtivo. No caso da indústria siderúrgica, os custos dos ativos são extremamente altos. Uma forma de diluir estes custos é manter a fábrica na sua capacidade máxima.⁽²⁾

A literatura mostra abordagens de programação linear para o problema de mistura com aplicação geral,⁽³⁾ específico para siderurgia, sem considerar os estoques,⁽⁴⁾ e considerando os estoques de produtos acabados.⁽⁵⁾

Propõe-se, neste trabalho, uma modelagem para o Plano de Produção e Vendas (PPV) na forma clássica da programação linear, utilizando-se da planilha eletrônica para a solução do problema modelado. O problema se constitui em definir a melhor mistura de produção com agregação de produtos e considerando vários períodos de planejamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O Plano de Produção e Vendas (PPV) de uma siderúrgica é um plano que distribui a demanda anual do cliente no fluxo produtivo em períodos mensais. Essa distribuição é limitada pela capacidade dos equipamentos do fluxo e pela política de estoque adotada. Esse problema pode ser modelado como um problema de programação linear tendo como função objetivo a maximização ou minimização de uma equação linear. No problema de balanceamento de linha foi definida como maximização do lucro da empresa. Em outro contexto, poderia ser a minimização do custo.

As variáveis de decisão são as quantidades de produtos em elaboração (PE), processados em determinados equipamentos e as quantidades de produtos acabados (PA) entregues aos clientes. Essas quantidades de produtos serão expressas em toneladas (t), tanto na fase de elaboração quanto na estocagem.

As restrições determinam limites mínimos e máximos para: i) quantidade de produto entregue ao cliente; ii) quantidade de cada produto em processamento em um



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

determinado equipamento; e iii) quantidade de produto em elaboração ou acabado em estoque.

As restrições também determinam limites mínimos e máximos de agrupamentos, como: i) quantidade total de estoque de produto em um determinado local de armazenamento; ii) quantidade total produzida de um determinado equipamento; e iii) quantidade total de horas consumidas de cada equipamento.

Diferentemente das abordagens encontradas na literatura,⁽⁶⁾ considerou-se a existência de estoques em todas as fases de produção e a transferência dos mesmos entre os vários períodos de planejamento, tanto para produto acabado quanto para produto em elaboração. O balanceamento considera também vários produtos em uma mesma linha orientados pelo resultado financeiro da empresa, ou seja, considera a margem do produto, o custo do estoque e os custos de cada fase de produção.

A abordagem determinística, utilizando programação linear, mostrou-se bastante eficiente na implementação do modelo em planilha eletrônica com a biblioteca Ipsolve.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS

Uma usina siderúrgica integrada, segundo Mourão et al.,⁽⁷⁾ possui um processo que vai das matérias-primas ao produto final e é constituído pelas seguintes etapas: extração do ferro de seu minério nos altos-fornos; conversão do ferro gusa, produto intermediário, em aço; o lingotamento do aço líquido de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes; e, finalmente, a conformação do metal na forma de produto.

O fluxo produtivo da Aperam é considerado integrado e complexo (Figura 1). Integrado devido ao fato de partir da matéria prima (minério) e processá-lo até a laminação final do produto e complexo pelo fato de se produzir, paralelamente ou em sequência, vários tipos de aços com composições bem distintas.

Para o problema de planejamento da produção para vários períodos e considerando a evolução dos estoques é possível desenvolver um modelo de programação linear para determinar a programação ótima de produção, podendo produzir mais do que o necessário em determinado mês e reter as unidades excedentes para entregar em meses posteriores.⁽⁸⁾ Sendo possível estocar produto em elaboração em excesso de um período ao seguinte.

Considerar na função objetivo o volume e variação dos estoques leva a minimização do custo financeiro de se manter o estoque ao longo do horizonte de planejamento. As restrições consideradas para os estoques são:

- limites superiores definido pela área física e pelas diretrizes da empresa; e
- limite inferior ditado pela política de estoque considerando o estoque de segurança que garanta a continuidade operacional.

O estoque, no planejamento de produção, pode também contribuir com a função objetivo de maximizar o lucro abrindo a possibilidade de flutuação de capacidade produtiva. A produção de um equipamento em um determinado período pode ser processada ou entregue a clientes nos períodos futuros onde os equipamentos envolvidos podem não ter a mesma disponibilidade.

Foi considerada na modelagem, a passagem de estoque intermediário de um período para o outro período subsequente, ou seja, modelagem em multiperíodos (Figura 2). O estoque resultante do período M passa a ser o estoque inicial para o período M + 1.

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

Além do atendimento ao fluxo produtivo do período corrente, pode haver a passagem de estoque PE e/ou estoque PA de um período para o outro período subsequente.

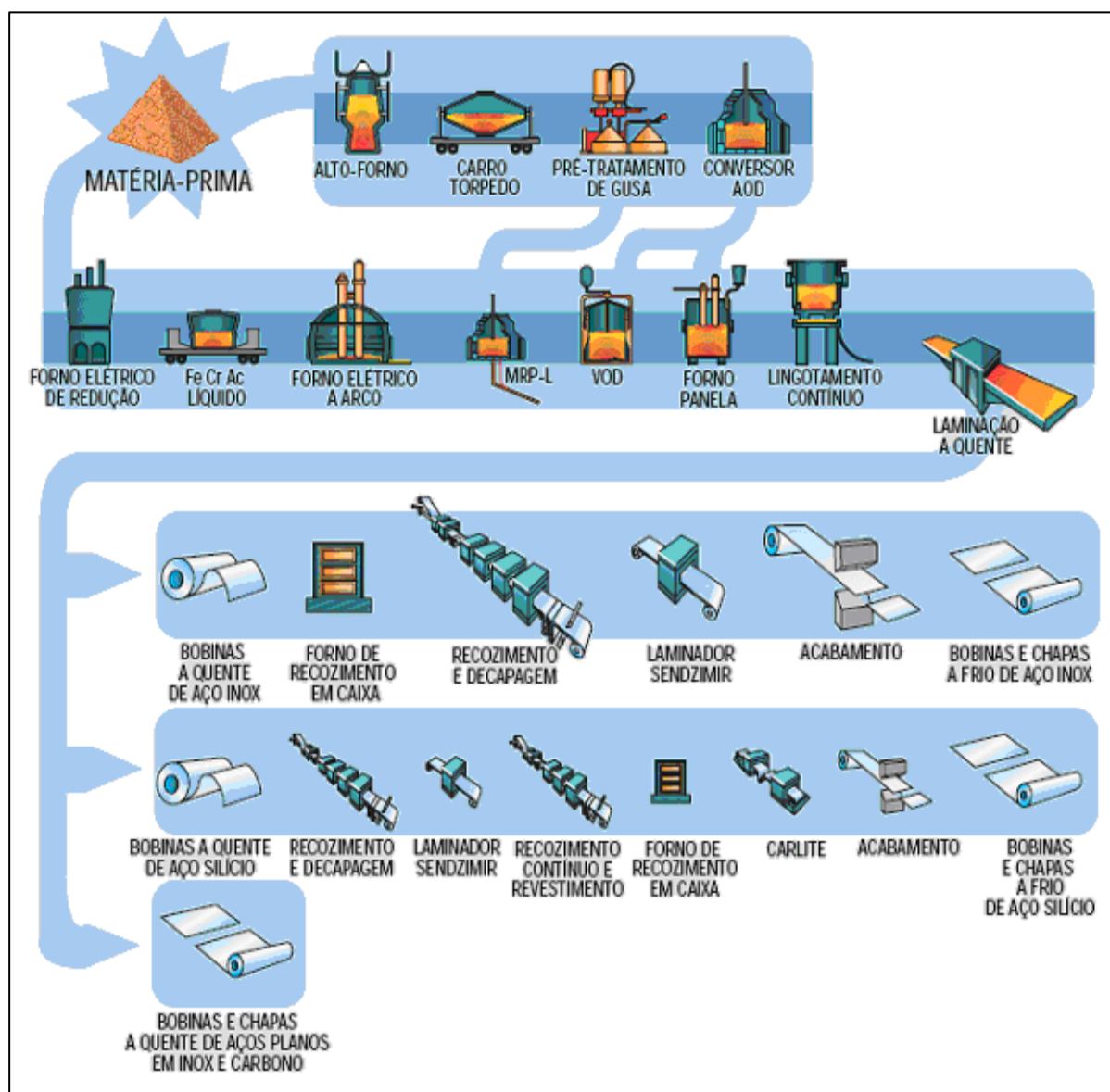


Figura 1. Fluxo de produção da Aperam South América (Aperam).



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

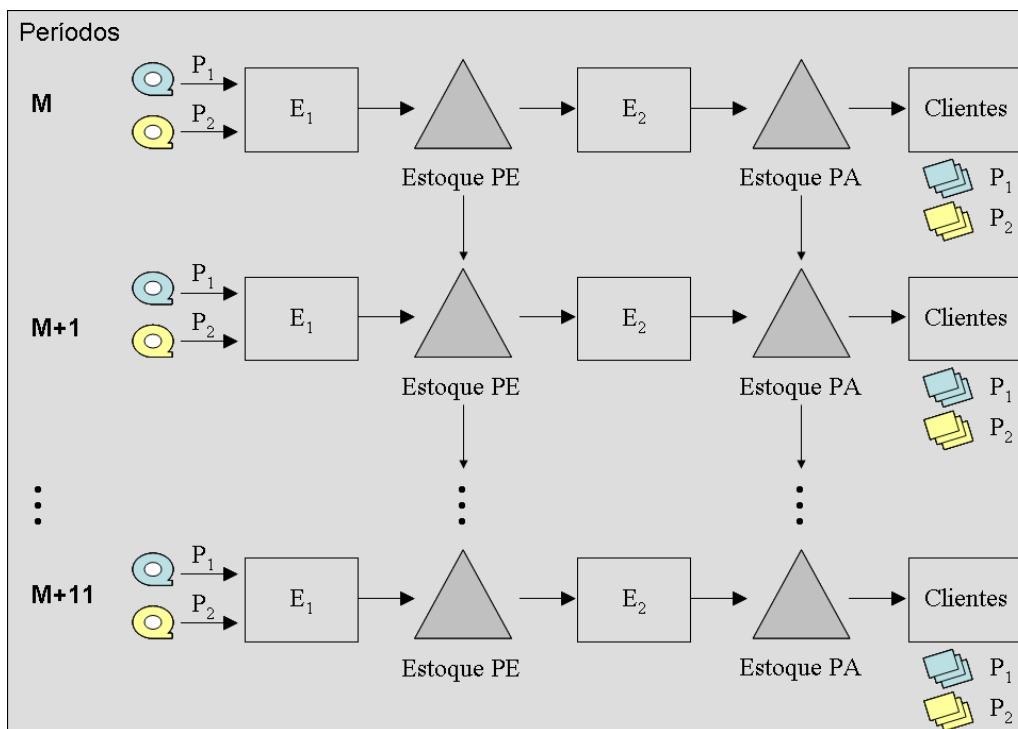


Figura 2. Planejamento anual em multiperíodos.

A implementação computacional foi realizada utilizando o Visual Basic Application (VBA) para integrar a ferramenta de modelagem matemática Ipsolve 5.5 à planilha Excel® (Figura 3). O Ipsolve, cuja licença é pública, foi desenvolvido por Michel Berkelaar, Kjell Eikland e Peter Notebaert em 2004.

A		B		C O D E F G H I J K L M N O												
Função Objetivo: Maximizar Lucro		BALANCEAMENTO DE LINHA														
		395,0 MR\$ / ano			283,6 kt / ano			PL Anual		PL Mês a Mês		Zerar Variáveis				
Solução Ótima Encontrada		Estoque Inicial	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂		
E ₁	P ₁	21.393	19.170	-	17.249	14.396	15.977	-	19.110	10.651	18.110	14.396	5.326			
	P ₂	15.401	-	23.957	17.824	4.034	14.803	19.385	15.010	23.399	18.175	4.034	11.396			
	Total (t)	36.794	19.170	23.957	35.072	18.430	30.781	19.385	34.120	34.050	36.286	18.430	16.722			
	Ocupação (h)	744	360	532	720	360	629	431	692	720	744	360	353			
Estoque E ₂	P ₁	-	4.299	0	0	3.000	0	0	0	0	0	3.000	0	0		
	P ₂	-	981	0	4.572	5.000	0	0	0	3.614	4.221	5.000	0	0		
	Total (t)	-	5.280	0	4.572	8.000	0	0	0	3.614	4.221	8.000	0	0		
E ₂	P ₁	16.667	22.883	-	13.893	16.961	15.576	0	18.633	10.385	14.733	16.961	5.193			
	P ₂	14.060	956	18.900	16.961	8.808	14.433	18.900	11.111	22.222	16.961	8.808	11.111			
	Total (t)	30.727	23.839	18.900	30.854	25.770	30.011	18.900	29.744	32.607	31.694	25.770	16.304			
	Ocupação (h)	744	672	360	720	652	720	360	744	720	744	652	360			
Produto Acabado	P ₁	-	0	660	0	0	5.850	0	0	0	0	5.850	0			
	P ₂	-	0	0	0	5.850	0	3.322	0	0	0	5.850	0			
	Total (t)	-	0	660	0	5.850	5.850	3.322	0	0	0	5.850	0			
À Produzir	P ₁	15.000	20.000	594	12.503	10.000	19.285	-	16.769	9.347	13.259	10.000	9.938			
	P ₂	12.654	860	17.010	10.000	13.193	10.000	20.000	10.000	20.000	10.000	13.193	10.000			
	Total (t)	27.654	20.860	17.604	22.503	23.193	29.285	20.000	26.769	29.347	23.259	23.193	19.938			

Figura 3. Planilha de interface do modelo matemático do plano de produção.

A rotina em VBA, partindo do modelo matemático em Excel, gera o modelo na forma algébrica na memória ou em arquivo. Esse modelo na forma algébrica é processado pela rotina de otimização Ipsolve e os resultados retornam à planilha para elaboração de relatório e análise dos resultados (Figura 4).

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

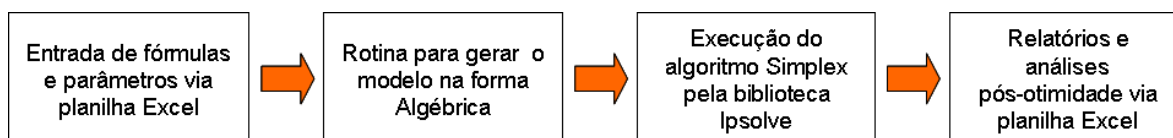


Figura 4. Fluxo de execução da otimização do PPV com a rotina Ipsolve.

O modelo gerado na forma algébrica pode também ser processado por outros softwares de otimização tais como: Cplex, Xpress, Matlab ou Lindo.

Na forma algébrica (1), cada produto ou grupo de produtos (denominado família) tem seu preço previamente definido, com base em históricos e projeções de cenários futuros e que são definidos como premissas para o planejamento. A função objetivo busca maximizar o lucro da empresa. Os coeficientes da função objetivo (c) serão os preços de cada grupo de produto entregue ao cliente. Portanto, para cada unidade do produto x_j entregue ao cliente, tem-se um preço c_j associada. A função objetivo é a maximização da soma de todos os produtos entregues aos clientes multiplicados por seus respectivos preços. Porém a cada equipamento do fluxo produtivo incide o custo de material adicionado e de transformação e equipamentos similares podem ter custos diferenciados. Portanto, cada produto, em cada equipamento tem o respectivo custo associado. O peso desses custos é agregado à função objetivo multiplicado a quantidade do produto em elaboração processado no equipamento pelo custo individual de produção e somando à expressão da função objetivo nos 12 períodos de planejamento.

$$z = \sum_{s=1}^{12} \left(\sum_{j=1}^p c_{sj} x_{sj} + \sum_{j=p+1}^n c_{sj} x_{sj} \right)$$

Maximizar

Sujeito a:

$$\sum_{s=1}^{12} \left(\sum_{j=1}^n a_{sij} x_{sj} \right) \leq b_{si} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{sj} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad e \quad s = 1, 2, \dots, 12$$
(1)

Em que x é o vetor de variáveis com n componentes, sendo a variável x_{sj} é a quantidade do produto j produzida em um determinado equipamento no período S ; c é o vetor de coeficientes da função objetivo z com n componentes; sendo que para os primeiros p elementos, c_{sj} é o lucro unitário do produto j produzido no período S e para os demais $n - p$ elementos, c_{sj} é o custo de se produzir o produto j e de mate-lo em estoque no período S .



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

A é a matriz de coeficientes tecnológicos com dimensão $m \times n$, e o elemento a_{ij} de cada período S será:

- no caso de restrição de estoque, igual a 1 quando o produto j for produzido para ser estocado no estoque i e será $-1/\eta_j$ quando o produto j for produzido a partir do estoque i ;
- no caso de limitação de produção, igual a 1 quando o produto j for produzido no equipamento i e 0 caso contrário; e
- no caso de ocupação do equipamento, igual a $1/prod_j * if_j$ para todos os j produtos produzido no equipamento i .

Se b é o vetor de quantidade de recurso disponível com m componentes; o elemento b_i será:

- no caso de limitação de estoque, a quantidade máxima de estoque admitida do produto i ;
- no caso de limitação de produção, a quantidade máxima admitida de produção do produto i ;
- no caso de ocupação de equipamento, a quantidade de horas disponíveis do equipamento no período S ;
- n é o número de variáveis;
- m é o número de restrições;
- S é o número de períodos.

4 DISCUSSÃO

O modelo possui as seguintes características:

- a ocupação dos equipamentos se dá em função da produtividade e índice de funcionamento;
- o balanço de massa se dá em função do rendimento e do estoque de entrada e saída;
- cada produto a produzir tem uma margem que pode variar a cada mês.
- o fluxo produtivo é definido por equações de planilha;
- pode-se definir mínimo e máximo para a produção de um determinado aço em um equipamento, assim como mínimo e máximo para: ocupação horária, produção total do equipamento, estoque por aço, estoque total no equipamento;
- a carteira de produtos (Plano de Vendas) é definida com o mínimo e com o máximo a produzir de cada produto acabado;
- os produtos em elaboração e acabados em estoque são custeados pela taxa de juros aplicada sobre custo do produto até a fase em que se encontra; e
- o custo da complexidade é simulado agregando custo adicional a fluxos alternativos.

A abordagem determinística do plano, utilizando programação linear, mostrou-se bastante eficiente na implementação do modelo em planilha eletrônica com a biblioteca Ipsolve. Esse modelo, de forma compacta e com grande facilidade de



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

operacionalização, envolvendo 2.328 variáveis e 8.280 restrições, resulta em uma matriz de coeficientes altamente esparsa (1% de elementos não nulos).

O tempo de processamento foi de 40 segundos, utilizando um computador *desktop* com Windows XP, um processador de 2 GHz e 1.47 GB de RAM.

5 CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido considerou os diversos parâmetros operacionais e demandas. Considerou-se também a existência de estoques em todas as fases de produção, incluindo-se o custo financeiro de se manter esses estoques de um período a outro. Os produtos foram tratados de forma agregada tanto na demanda quanto na linha de produção.

A eficácia do modelo proposto é comprovada com a utilização dessa nova abordagem na elaboração do Plano de Produção e Vendas na Aperam a partir de 2008.

A filosofia proposta pelo trabalho foi desenvolver uma ferramenta de simples manipulação e manutenção, com facilidade de divulgação e boa portabilidade. Outra característica é a flexibilidade do modelo para acompanhar a dinâmica imposta pelo ambiente de planejamento.

REFERÊNCIAS

- 1 MARTINS, PETRÔNIO G.; LAUGENI, Fernando Piero. Administração da Produção. 2. ed.. São Paulo: Saraiva, 2005.
- 2 SLACK, NIGEL; CHAMBERS, STUART; JOHNSTON, ROBERT; Administração da Produção. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002
- 3 HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J., Introdução à Pesquisa Operacional. McGraw-Hill, 8.ed. São Paulo, 2006.
- 4 CHEN, M.; WANG, W. A linear programming model for integrated steel production and distribution planning. International Journal Of Operations & Production Management, v..17, p. 592-610, 1997.
- 5 MOREIRA Jr, JOSÉ CECILIO. Programação Linear no planejamento agregado de produção e vendas de uma indústria siderúrgica, 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- 6 GOMES, C. T. Programação linear aplicada à otimização do planejamento de produção em siderurgia Um estudo de caso – Arcelormittal Inox Brasil, 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Industrial) – UNILESTEMG, Coronel Fabriciano, 2009.
- 7 MOURÃO, MARCELO BREDÁ; YOKOJI, Akira; MALYNOWSKYJ, Antônio; LEANDRO, César A. S.; TAKANO, Cyro; QUITES, Eduardo E. C.; GENTILE, Erberto F.; SILVA, Guilherme F. B. L.; BOLOTA, José R.; GONÇALVES, Marcelo; FACO, Rubens J. Introdução à Siderurgia. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- 8 TAHA, HAMDY A. Pesquisa Operacional. 8. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.