

Proposta de otimização do consumo de energia elétrica através da programação da produção via programação linear

Marcelo Otavio Milani (FHO-Uniararas) m.o.milani@hotmail.com
Fernando César Mendonça (FHO-Uniararas) fernandomendonca@uniararas.br

Resumo:

A Programação Linear é uma técnica da Pesquisa Operacional que pode ser uma grande aliada das empresas no mundo atual, visto que a mesma tem como propósito otimizar processos das diversas atividades existentes em uma empresa, tais como transporte, alocação de recursos, planejamento e controle da produção, entre outros. Portanto, o estudo realizado neste trabalho mostrará a aplicação desta técnica na programação da produção em uma empresa de embalagens plásticas, localizada em Araras/SP, com o objetivo de propor um modelo matemático de programação linear para programação da produção, visando otimizar o consumo de energia elétrica das máquinas. Para a realizar o estudo, foi feito todo levantamento teórico sobre os principais temas abordados, demonstrando os conceitos mais importantes. Em seguida, foi realizada a metodologia, onde é possível encontrar os caminhos necessários para que fosse possível concretizar o estudo. Por último, como resultado do estudo, o modelo matemático de programação linear proposto para a programação da produção foi capaz de encontrar uma solução matematicamente ótima que otimiza o consumo de energia elétrica das máquinas.

Palavras chave: Programação Linear, Programação da Produção, Otimização.

Proposal for optimization on electric power consumption through production scheduling by linear programming

Abstract

The Linear Programming is an Operational Research technique, which can be a great ally of the companies in the current world, since it has the purpose to optimizing processes of the various existing activities in a company, such as transport, resources allocation, production planning and control, and others. Therefore, the study performed in this article will show the application of this technique in the production scheduling at a plastic packaging company, located in Araras/SP, in order to purpose a mathematical model of linear programming for production scheduling, aiming optimize the machines' electric power consumption. To carry out the study, it was performed all the theoretical survey on the main subjects covered, demonstrating the most important concepts. Then, it was performed the methodology, where it is possible to find the necessary paths in order to be possible to implement the study. Finally, as a result of the study, the mathematical model of linear programming suggested for production scheduling was able to find a mathematically optimal solution that optimizes the machines' electric power consumption.

Key-words: Linear Programming, Production Scheduling, Optimization.

1. Introdução

Atualmente, uma empresa que possui capacidade de programar sua produção voltada ao que o mercado necessita e de maneira eficiente, está mais apta em se manter à frente no mercado diante do cenário cada vez mais competitivo e cheio de imprevistos. Sendo assim, se torna notável a importância do Planejamento e Controle da Produção (PCP) para uma empresa, visto que o mesmo tem como responsabilidade sequenciar as operações, definir as prioridades (ordens) de ocorrência das atividades dentro de um sistema de operações, para que o objetivo seja atingido. Entretanto, dependendo do tipo de sistema produtivo e a quantidade de variáveis envolvidas, o conjunto de decisões podem ser complexos (CORRÊA; CORRÊA, 2009).

De acordo com Moreira (2008), uma programação da produção eficiente, faz com que a empresa manufacture produtos com custos menores, qualidade especificada, estoque menor e melhore o nível de atendimento para seus clientes, além de permitir à empresa uma margem de lucro maior.

Uma vez que se tenha conhecimento da relevância da programação da produção para uma organização, faz-se necessário que as atividades relacionadas ao PCP sejam executadas de maneira eficiente, com o intuito de contribuir para que os objetivos da organização sejam alcançados. Com isso, se torna oportuno a aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional, mais precisamente a Programação Linear, neste cenário.

Portanto, o presente artigo tem como objetivo principal propor um modelo matemático de programação linear para a programação da produção de uma determinada empresa, visando otimizar o consumo de energia elétrica das máquinas, que é um fator diretamente relacionado ao processo produtivo. Outros objetivos secundários podem ser avaliados neste artigo, tais como: aplicação da programação linear em um caso real e também a programação da produção de todos os produtos da empresa a ser estudada, em um único modelo matemático.

2. Revisão de Literatura

2.1 Planejamento e Controle da Produção

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem como responsabilidade realizar a gestão eficiente da utilização de equipamentos e pessoas, bem como o fluxo de material, com o objetivo de atender as necessidades dos clientes, utilizando para tal, a capacidades dos fornecedores, da estrutura interna e, em determinadas situações, dos clientes para que a demanda possa ser atendida (VOLLMAHN et al., 2006).

Conforme Corrêa, Giansi e Caon (2010, p. 17) afirmam “Planejar é entender como a consideração conjunta da situação presente e da visão do futuro influencia as decisões tomadas no presente para que se atinjam determinados objetivos no futuro”.

Quando as metas e estratégias de um sistema produtivo são definidas, de acordo com Tubino (2000), fica sob responsabilidade do PCP, criar planos para atingi-las, gerenciar os recursos humanos e físicos conforme o plano e direcionar os recursos humanos sobre os físicos acompanhando esta ação e corrigindo se necessário.

Para atingir seus objetivos, o PCP deve gerenciar uma série de informações oriundas de diversas áreas do sistema produtivo, tais como: lista de materiais e estrutura do produto (Engenharia de Produto), roteiros de fabricação e *lead times* (Engenharia de Processo), entradas e saídas de materiais (Compras), planos de vendas e pedidos firmes (Marketing), planos de investimento e fluxo de caixa (Finanças), programas de treinamento (Recursos Humanos) e os planos de manutenção (Manutenção) (TUBINO, 2000).

É importante que o PCP atue nos três níveis hierárquicos existentes para o planejamento e controle das atividades de um sistema produtivo, que segundo Tubino (2009) são:

- a) Nível estratégico: em que são definidas as estratégias de longo prazo da empresa, com a participação deste setor na geração de um Plano de Produção através do Planejamento Estratégico da Produção;
- b) Nível tático: são estabelecidos os planos de médio prazo para a produção, em que o setor realiza o desenvolvimento de um Planejamento-mestre da Produção;
- c) Nível operacional: são preparados os programas de curto prazo e acompanhamento da produção, em que o PCP realiza a programação e o controle da produção, gerenciando estoques, ordens de compras e o sequenciamento de atividades.

2.2 Programação Linear

A Programação Linear é uma técnica de Pesquisa Operacional, que segundo Hillier & Lieberman (2006, p. 25) “envolve o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis”. Sendo a mesma, preocupada com a otimização (minimização ou maximização) de uma função linear, ao mesmo tempo que satisfaz um conjunto de restrições de igualdade ou desigualdade linear (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2010).

Segundo Colin (2015), um modelo de programação linear deve conter de forma geral:

- a) Variáveis de decisão: variáveis as quais temos poder de alterar;
- b) Parâmetros: variáveis as quais não podemos alterar;
- c) Função-objetivo: define e mensura o principal objetivo (minimizar ou maximizar);
- d) Restrições: combinam variáveis e parâmetros para se estabelecer regras, relações e limites do modelo;
- e) Modelo: contempla as variáveis de decisão, parâmetros, função-objetivo e restrições do problema real estudado, utilizando apenas funções lineares.

A aplicação da programação linear é possível em atividades cujo interesse seja na fabricação de produtos, na mistura de substâncias, no atendimento ao público, no transporte e armazenagem de mercadorias, entre outros (COLIN, 2015).

Uma grande vantagem desse modelo de acordo com Goldbarg e Luna (2005, p. 25), “está na extraordinária eficiência dos algoritmos de solução hoje existentes, disponibilizando alta capacidade de cálculo e podendo ser facilmente implementado até mesmo através de planilhas e com auxílio de microcomputadores pessoais”.

O algoritmo mais conhecido e usado é o simplex, que se trata de um algoritmo que possibilita obter uma solução ótima de um modelo de programação linear, caso possua, partindo de uma solução básica viável inicial, e busca a cada iteração, uma nova solução básica viável que contribua mais efetivamente com a função-objetivo (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

3. Metodologia

O presente trabalho foi realizado em uma empresa, denominada de “Empresa X”, que produz embalagens plásticas. Para a realização do estudo utilizou-se da abordagem de um estudo de caso, seguindo os preceitos de Hillier & Lieberman (2001) para estudos referentes à Pesquisa Operacional:

- a) 1º Definir o problema e coletar dados relevantes;
- b) 2º Elaborar um modelo matemático que represente o problema;
- c) 3º Criar um procedimento computacional para derivar soluções à partir do modelo;
- d) 4º Testar o modelo e ajustar se necessário;
- e) 5º Implementar o modelo.

Inicialmente, analisou-se todos os detalhes relevantes para o estudo em questão, com relação ao processo de manufatura e sistema produtivo da Empresa X. Em seguida, com base nas informações da empresa e o alinhamento com o objetivo deste trabalho, identificou-se as variáveis de decisão envolvidas e a respectiva função objetivo. Por último, definiu-se todas as restrições técnicas presentes no sistema.

Para a aplicação do modelo de programação linear proposto, utilizou-se a ferramenta *Solver*, um suplemento presente no *software Microsoft Excel*.

4. Estudo de caso

4.1 Empresa X

A unidade da Empresa X a ser estudada está localizada na cidade de Araras, interior do estado de São Paulo, e faz parte de um grupo multinacional que produz embalagens plásticas para diversos segmentos existentes, tais como, produtos alimentícios em geral, higiene e saúde, automotivos, entre outros.

Uma característica importante é que cada Empresa X possui uma produção *In House*, ou seja, a planta produtiva da empresa se localiza na mesma área onde se encontra a planta do cliente, para que os produtos possam sair do fornecedor e chegar de maneira imediata ao cliente. Portanto, a Empresa X localizada em Araras, possui apenas um cliente específico.

Atualmente, 5 tipos de produtos são manufaturados na planta, denominados neste estudo de:

- a) Produto A;
- b) Produto B;
- c) Produto C;
- d) Produto D;
- e) Produto E.

O sistema produtivo da empresa pode ser compreendido de acordo com a figura abaixo:

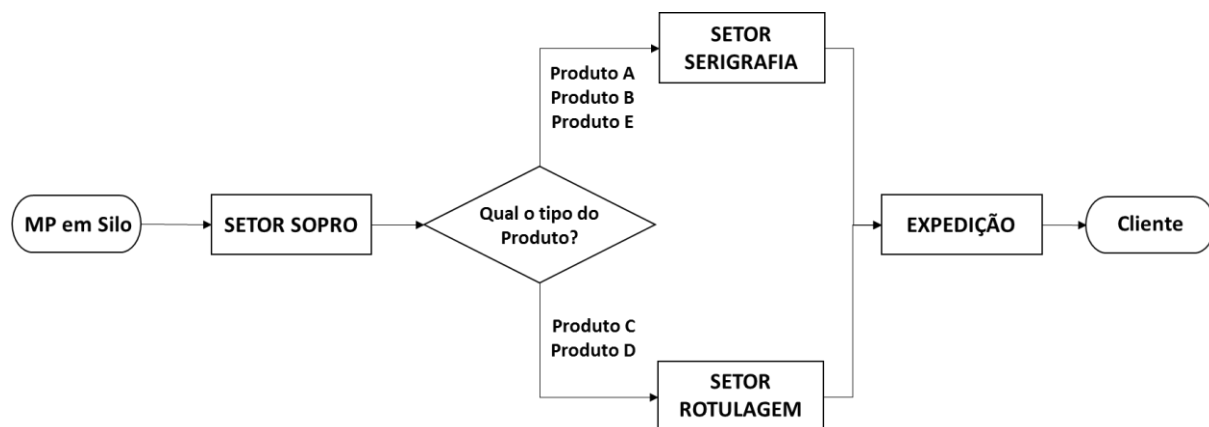


Figura 1 – Fluxograma do sistema produtivo da Empresa X

Um ponto relevante é que todos os produtos são manufaturados no “Setor Sopro”. Em seguida, de acordo com suas características específicas, cada produto segue o seu fluxo de acordo com a Figura 1, através de frascodutos.

Abaixo, seguem algumas tabelas contendo informações sobre a empresa, que serão importantes para a formulação do modelo de Programação Linear:

	Setor Sopro	Setor Serigrafia	Setor Rotulagem		Setor Sopro	Setor Serigrafia	Setor Rotulagem
Produto A	Máquina 2 Máquina 3 Máquina 8 Máquina 9 Máquina 10	Máquina 13 Máquina 14 Máquina 16 Máquina 17 Máquina 18 Máquina 19 Máquina 20	-	Produto D	Máquina 11	-	Máquina 23
Produto B	Máquina 4 Máquina 6	Máquina 15 Máquina 16	-	Produto E	Máquina 3 Máquina 4 Máquina 8 Máquina 9	Máquina 18 Máquina 19	-
Produto C	Máquina 1 Máquina 5 Máquina 7 Máquina 12	-	Máquina 21 Máquina 22				

Fonte: Autores (2017) com base em dados coletados na Empresa X

Tabela 1 – Designação dos produtos i nas máquinas j no sistema produtivo

Em que as informações contidas na Tabela 1, descrevem a seguinte situação:

- Produto A pode ser manufaturado no “Setor Sopro” pelas máquinas 2, 3, 8, 9 e/ou 10 e no “Setor Serigrafia” pelas máquinas 13, 14, 16, 17, 18, 19 e/ou 20;
- Produto B pode ser manufaturado no “Setor Sopro” pelas máquinas 4 e/ou 6 e no “Setor Serigrafia” pelas máquinas 15 e/ou 16;
- Produto C pode ser manufaturado no “Setor Sopro” pelas máquinas 1, 5, 7 e/ou 12 e no “Setor Rotulagem” pelas máquinas 21 e/ou 22;
- Produto D pode ser manufaturado no “Setor Sopro” pela máquina 11 e no “Setor Rotulagem” pela máquina 23;
- Produto E: pode ser manufaturado no “Setor Sopro” pelas máquinas 3, 4, 8 e/ou 9 e no “Setor Serigrafia” pelas máquinas 18 e/ou 19.

Nome do Equipamento	Capacidade (unidade/hora)	Nome do Equipamento	Capacidade (unidade/hora)	Nome do Equipamento	Capacidade (unidade/hora)	Nome do Equipamento	Capacidade (unidade/hora)
Máquina 1	8282	Máquina 7	4500	Máquina 13	12000	Máquina 19	11999
Máquina 2	8286	Máquina 8	9601	Máquina 14	12000	Máquina 20	11998
Máquina 3	12001	Máquina 9	9601	Máquina 15	12001	Máquina 21	19200
Máquina 4	13088	Máquina 10	48000	Máquina 16	12002	Máquina 22	10801
Máquina 5	8280	Máquina 11	3756	Máquina 17	11994	Máquina 23	4205
Máquina 6	8999	Máquina 12	6063	Máquina 18	11996		

Fonte: Autores (2017) com base em dados coletados na Empresa X

Tabela 2 – Capacidade de Produção das máquinas

Os dados da Tabela 2 foram fornecidos pelo responsável da área de PCP, de acordo com a seguinte razão: “Quantidade boa”/“tempo necessário para produzir quantidade boa”. Evitando assim a influência de algumas variáveis, tais como refugo e parada de máquina.

Nome do Equipamento	Potência (kW)	Nome do Equipamento	Potência (kW)	Nome do Equipamento	Potência (kW)	Nome do Equipamento	Potência (kW)
Máquina 1	67,05	Máquina 7	34,64	Máquina 13	6,09	Máquina 19	3,86
Máquina 2	65,94	Máquina 8	58,23	Máquina 14	5,20	Máquina 20	5,14
Máquina 3	85,41	Máquina 9	63,41	Máquina 15	8,16	Máquina 21	41,91
Máquina 4	84,70	Máquina 10	87,52	Máquina 16	5,59	Máquina 22	22,91
Máquina 5	63,70	Máquina 11	103,38	Máquina 17	5,59	Máquina 23	30,17
Máquina 6	72,70	Máquina 12	106,17	Máquina 18	3,19		

Fonte: Autores (2017) com base em dados coletados na Empresa X

Tabela 3 – Potência elétrica das máquinas

Os dados da Tabela 3 foram fornecidos por um especialista da área de manutenção da empresa, não sendo, portanto, valores nominais.

4.2 Proposta do modelo de programação linear

Para a elaboração do modelo de Programação Linear para programar a produção com o objetivo de otimizar o consumo de energia elétrica das máquinas, algumas considerações são apresentadas:

- a) A proposta do modelo de programação linear será para a Programação da Produção da Empresa X, ou seja, atuará no nível operacional;
- b) A Empresa X produz apenas para um único cliente, isso faz com que a demanda seja mandatória, portanto a preocupação principal ao programar a produção é saber qual produto será manufaturado por qual máquina em um determinado período de tempo, visto que um produto pode ser produzido por mais de uma máquina e uma máquina pode produzir mais de um produto de acordo com a Tabela 1;
- c) As demandas dos produtos são determinísticas e a programação da produção é feita de forma diária, ou seja, o cliente informa a demanda de cada produto que precisará para o dia seguinte;
- d) A matéria-prima utilizada para os 5 produtos é a mesma: o polietileno. Outros insumos, como tinta e rótulos, juntamente com a matéria-prima estão atrelados a quantidade demandada pelo cliente, portanto para o sistema em estudo, os mesmos não são restrições;
- e) A disponibilidade das máquinas é um fator que deve ser considerado ao se programar a produção, sendo então, uma restrição do sistema. A Empresa X opera em 03 (três) turnos de 08 (oito) horas cada e possui tempo médio de *setup* de 01 (uma) hora para as máquinas que manufaturam mais de um produto;
- f) Os funcionários não são considerados no modelo pois não estão diretamente ligados ao consumo de energia elétrica das máquinas e a empresa considera que os mesmos já estão dimensionados de maneira adequada para atender o sistema produtivo;
- g) Outros equipamentos que auxiliam no funcionamento das máquinas não são considerados no modelo, pois não possuem comportamento linear e o objetivo do trabalho é otimizar o consumo de energia elétrica das máquinas, que representa 70% do total de energia elétrica consumida pela Empresa X.

4.2.1 Variáveis de Decisão

De acordo com as informações contidas na Tabela 1, definiu-se as variáveis de decisão:

Variáveis de Decisão	Descrição das variáveis	Variáveis de Decisão	Descrição das variáveis
X1	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 1	X12	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 12
X2	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 2	X13	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 13
X3A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 3 para o Produto A	X14	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 14
X3E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 3 para o Produto E	X15	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 15
X4B	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 4 para o Produto B	X16A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 16 para o Produto A
X4E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 4 para o Produto E	X16B	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 16 para o Produto B
X5	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 5	X17	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 17
X6	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 6	X18A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 18 para o Produto A
X7	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 7	X18E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 18 para o Produto E
X8A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 8 para o Produto A	X19A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 19 para o Produto A
X8E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 8 para o Produto E	X19E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 19 para o Produto E
X9A	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 9 para o Produto A	X20	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 20
X9E	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 9 para o Produto E	X21	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 21
X10	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 10	X22	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 22
X11	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 11	X23	Quantidade diária de horas de utilização da Máquina 23

Fonte: Autores (2017)

Tabela 4 – Variáveis de Decisão

4.2.2 Função Objetivo

Para a formulação da função objetivo utilizou-se as informações contidas na Tabela 4 e levou-se em consideração como coeficientes das variáveis de decisão, os valores encontrados na Tabela 3. A seguir, encontra-se a função:

$$\text{Min CEE} = 67,05X1 + 65,94X2 + 85,41(X3A + X3E) + 84,70(X4B + X4E) + 63,70X5 + 72,70X6 + 34,64X7 + 58,23(X8A + X8E) + 63,41(X9A + X9E) + 87,52X10 + 103,38X11 + 106,17X12 + 6,09X13 + 5,20X14 + 8,16X15 + 5,59(X16A + X16B) + 5,59X17 + 3,19(X18A + X18E) + 3,86(X19A + X19E) + 5,14X20 + 41,91X21 + 22,91X22 + 30,17X23$$

Em que:

a) CEE: Consumo diário de Energia Elétrica das Máquinas (em kWh).

4.2.3 Restrições do Sistema

Analizando as considerações para o modelo proposto, estabeleceu-se as restrições do sistema que estão relacionadas com a demanda, através das informações contidas na Figura 1 e nas Tabelas 1, 2 e 4:

Restrição	Função Restrição
Fabricação do Produto A no Setor Sopro	$(8286)X2 + (12001)X3A + (9601)X8A + (9601)X9A + (48000)X10 = Da$
Fabricação do Produto B no Setor Sopro	$(13088)X4B + (8999)X6 = Db$
Fabricação do Produto C no Setor Sopro	$(8282)X1 + (8280)X5 + (4500)X7 + (6063)X12 = Dc$
Fabricação do Produto D no Setor Sopro	$(3756)X11 = Dd$
Fabricação do Produto E no Setor Sopro	$(12001)X3E + (13088)X4E + (9601)X8E + (9601)X9E = De$
Fabricação do Produto A no Setor Serigrafia	$(12000)X13 + 12000(X14) + (12002)X16A + (11994)X17 + (11996)X18A + (11999)X19A + (11998)X20 = Da$
Fabricação do Produto B no Setor Serigrafia	$(12001)X15 + (12002)X16B = Db$
Fabricação do Produto C no Setor Rotulagem	$(19200)X21 + (10801)X22 = Dc$
Fabricação do Produto D no Setor Rotulagem	$(4205)X23 = Dd$
Fabricação do Produto E no Setor Serigrafia	$(11996)X18E + (11999)X19E = De$

Fonte: Autores (2017)

Tabela 5 – Restrições de Demanda

Em que:

- a) Da: Demanda diária para o Produto A;
- b) Db: Demanda diária para o Produto B;
- c) Dc: Demanda diária para o Produto C;
- d) Dd: Demanda diária para o Produto D;
- e) De: Demanda diária para o Produto E.

Com as informações contidas nas Tabelas 1 e 4, estabeleceu-se as restrições do sistema com relação à disponibilidade das máquinas:

Restrição	Função Restrição	Restrição	Função Restrição
Disponibilidade Máquina 1	$X1 \leq H1$	Disponibilidade Máquina 13	$X13 \leq H13$
Disponibilidade Máquina 2	$X2 \leq H2$	Disponibilidade Máquina 14	$X14 \leq H14$
Disponibilidade Máquina 3	$X3A + X3E \leq H3$	Disponibilidade Máquina 15	$X15 \leq H15$
Disponibilidade Máquina 4	$X4B + X4E \leq H4$	Disponibilidade Máquina 16	$X16A + X16B \leq H16$
Disponibilidade Máquina 5	$X5 \leq H5$	Disponibilidade Máquina 17	$X17 \leq H17$
Disponibilidade Máquina 6	$X6 \leq H6$	Disponibilidade Máquina 18	$X18A + X18E \leq H18$
Disponibilidade Máquina 7	$X7 \leq H7$	Disponibilidade Máquina 19	$X19A + X19E \leq H19$
Disponibilidade Máquina 8	$X8A + X8E \leq H8$	Disponibilidade Máquina 20	$X20 \leq H20$
Disponibilidade Máquina 9	$X9A + X9E \leq H9$	Disponibilidade Máquina 21	$X21 \leq H21$
Disponibilidade Máquina 10	$X10 \leq H10$	Disponibilidade Máquina 22	$X22 \leq H22$
Disponibilidade Máquina 11	$X11 \leq H11$	Disponibilidade Máquina 23	$X23 \leq H23$

Disponibilidade Máquina 12 $X_{12} \leq H_{12}$

Fonte: Autores (2017)

Tabela 6 – Restrições de disponibilidade das máquinas

Em que:

a) $H_1, H_2, \dots, H_{22}, H_{23}$: Horas diárias disponíveis para suas respectivas máquinas.

5. Resultado da aplicação do modelo

Com o intuito de testar e avaliar o desempenho do modelo de Programação da Produção via Programação Linear proposto neste estudo, utilizou-se as informações referente a 01 (um) dia de produção da Empresa X, que são detalhados na tabela abaixo:

Produção diária do Produto A com base na demanda (D_a)	1.357.800 unidades
Produção diária do Produto B com base na demanda (D_b)	313.400 unidades
Produção diária do Produto C com base na demanda (D_c)	204.880 unidades
Produção diária do Produto D com base na demanda (D_d)	22.500 unidades
Produção diária do Produto E com base na demanda (D_e)	132.300 unidades
Disponibilidade das máquinas sem necessidade de <i>setup</i>	24 horas
Disponibilidade das máquinas com necessidade de <i>setup</i>	23 horas
Consumo de Energia Elétrica das Máquinas	14.786,57 kWh

Fonte: Autores (2017)

Tabela 7 – Informações de 01 (um) dia de produção da Empresa X

Os valores mostrados pela Tabela 7 para a “Disponibilidade das máquinas sem necessidade de *setup*” e “Disponibilidade das máquinas com necessidade de *setup*” é em decorrência da escolha de um determinado dia de produção, em que todas as máquinas estavam disponíveis para serem utilizadas caso necessário. Ainda analisando a Tabela 7, os valores da produção diária dos produtos com base em suas respectivas demandas, estão acrescidos com uma porcentagem que a Empresa X considera contribuir para seu estoque de segurança.

Em seguida, com as informações das tabelas 4, 5, 6 e 7 mais a função objetivo, elaborou-se o modelo proposto através do *software Microsoft Excel*. Com a utilização do suplemento *Solver* e a escolha do método simplex para resolução, foi possível resolver o modelo e os resultados são apresentados abaixo:

Célula do Objetivo (Mín.)

Célula	Nome	Valor Original	Valor Final
\$B\$8	Mínimo Consumo de Energia Elétrica das Máquinas (KWh)	0	9789,95

Células Variáveis

Célula	Nome	Valor Original	Valor Final
\$B\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 1 (X1)	0,00	0,00
\$C\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 2 (X2)	0,00	0,00
\$D\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 3 para o Produto A (X3A)	0,00	0,00
\$E\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 3 para o Produto E (X3E)	0,00	0,00
\$F\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 4 para o Produto B (X4B)	0,00	23,00
\$G\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 4 para o Produto E (X4E)	0,00	0,00
\$H\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 5 (X5)	0,00	24,00
\$I\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 6 (X6)	0,00	1,38
\$J\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 7 (X7)	0,00	1,37
\$K\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 8 para o Produto A (X8A)	0,00	9,22
\$L\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 8 para o Produto E (X8E)	0,00	13,78
\$M\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 9 para o Produto A (X9A)	0,00	12,22
\$N\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 9 para o Produto E (X9E)	0,00	0,00
\$O\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 10 (X10)	0,00	24,00
\$P\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 11 (X11)	0,00	5,99
\$Q\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 12 (X12)	0,00	0,00
\$R\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 13 (X13)	0,00	6,20
\$S\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 14 (X14)	0,00	24,00
\$T\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 15 (X15)	0,00	3,11
\$U\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 16 para o Produto A (X16A)	0,00	0,00
\$V\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 16 para o Produto B (X16B)	0,00	23,00
\$W\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 17 (X17)	0,00	24,00
\$X\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 18 para o Produto A (X18A)	0,00	23,00
\$Y\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 18 para o Produto E (X18E)	0,00	0,00
\$Z\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 19 para o Produto A (X19A)	0,00	11,97
\$AA\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 19 para o Produto E (X19E)	0,00	11,03
\$AB\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 20 (X20)	0,00	24,00
\$AC\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 21 (X21)	0,00	0,00
\$AD\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 22 (X22)	0,00	18,97
\$AE\$7	Quantidade de horas diária de utilização da Máquina 23 (X23)	0,00	5,35

Figura 2 – Resultado do modelo para a Função Objetivo e Variáveis de decisão

Restrições

Célula	Nome	Valor da Célula	Fórmula
\$AF\$12	Fabricação do Produto A no Setor Sopro	1357800	\$AF\$12=\$AH\$12
\$AF\$13	Fabricação do Produto B no Setor Sopro	313400	\$AF\$13=\$AH\$13
\$AF\$14	Fabricação do Produto C no Setor Sopro	204880	\$AF\$14=\$AH\$14
\$AF\$15	Fabricação do Produto D no Setor Sopro	22500	\$AF\$15=\$AH\$15
\$AF\$16	Fabricação do Produto E no Setor Sopro	132300	\$AF\$16=\$AH\$16
\$AF\$17	Fabricação do Produto A no Setor Serigrafia	1357800	\$AF\$17=\$AH\$17
\$AF\$18	Fabricação do Produto B no Setor Serigrafia	313400	\$AF\$18=\$AH\$18
\$AF\$19	Fabricação do Produto C no Setor Rotulagem	204880	\$AF\$19=\$AH\$19
\$AF\$20	Fabricação do Produto D no Setor Rotulagem	22500	\$AF\$20=\$AH\$20
\$AF\$21	Fabricação do Produto E no Setor Serigrafia	132300	\$AF\$21=\$AH\$21
\$AF\$22	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 1 Função Restrição	0,00	\$AF\$22<=\$AH\$22
\$AF\$23	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 2 Função Restrição	0,00	\$AF\$23<=\$AH\$23
\$AF\$24	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 3 Função Restrição	0,00	\$AF\$24<=\$AH\$24
\$AF\$25	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 4 Função Restrição	23,00	\$AF\$25<=\$AH\$25
\$AF\$26	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 5 Função Restrição	24,00	\$AF\$26<=\$AH\$26
\$AF\$27	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 6 Função Restrição	1,38	\$AF\$27<=\$AH\$27
\$AF\$28	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 7 Função Restrição	1,37	\$AF\$28<=\$AH\$28
\$AF\$29	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 8 Função Restrição	23,00	\$AF\$29<=\$AH\$29
\$AF\$30	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 9 Função Restrição	12,22	\$AF\$30<=\$AH\$30
\$AF\$31	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 10 Função Restrição	24,00	\$AF\$31<=\$AH\$31
\$AF\$32	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 11 Função Restrição	5,99	\$AF\$32<=\$AH\$32
\$AF\$33	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 12 Função Restrição	0,00	\$AF\$33<=\$AH\$33
\$AF\$34	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 13 Função Restrição	6,20	\$AF\$34<=\$AH\$34
\$AF\$35	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 14 Função Restrição	24,00	\$AF\$35<=\$AH\$35
\$AF\$36	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 15 Função Restrição	3,11	\$AF\$36<=\$AH\$36
\$AF\$37	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 16 Função Restrição	23,00	\$AF\$37<=\$AH\$37
\$AF\$38	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 17 Função Restrição	24,00	\$AF\$38<=\$AH\$38
\$AF\$39	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 18 Função Restrição	23,00	\$AF\$39<=\$AH\$39
\$AF\$40	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 19 Função Restrição	23,00	\$AF\$40<=\$AH\$40
\$AF\$41	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 20 Função Restrição	24,00	\$AF\$41<=\$AH\$41
\$AF\$42	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 21 Função Restrição	0,00	\$AF\$42<=\$AH\$42
\$AF\$43	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 22 Função Restrição	18,97	\$AF\$43<=\$AH\$43
\$AF\$44	Disponibilidade de horas diária para a Máquina 23 Função Restrição	5,35	\$AF\$44<=\$AH\$44

Figura 3 – Resultado do modelo para as restrições do sistema

Analisando a Figura 2 em comparação com a Tabela 7, nota-se que o modelo proposto encontrou uma solução matematicamente ótima para a Programação da Produção da Empresa X, que reduz cerca de 33,8% o consumo de energia elétrica das máquinas através de uma nova distribuição de processamento dos produtos nas máquinas existentes no sistema produtivo. Sabendo-se que o consumo de energia elétrica das máquinas representa 70% do consumo de energia elétrica total, a redução do consumo de energia elétrica total da fábrica é cerca de 23,66%.

Com relação a Figura 3, o modelo proposto foi capaz de atender todas as restrições do sistema, principalmente em relação as restrições de demanda dos produtos, onde os valores encontrados pelo modelo atingiram os valores de produção diária para cada produto apresentados na Tabela 7.

6. Considerações finais

O modelo matemático baseado em programação linear proposto neste estudo, permitiu a aplicação da programação linear em um caso real através da representatividade da programação da produção de uma empresa do ramo de embalagens plásticas. Com relação ao objetivo principal, proposta de otimizar o consumo de energia elétrica das máquinas, o modelo proposto se mostrou muito promissor no que tange a utilização dos recursos na programação da produção

quando comparado ao sistema que a empresa utiliza atualmente, pois conseguiu encontrar uma solução matematicamente ótima que otimiza o consumo de energia elétrica das máquinas em 33,8%, considerando o consumo de energia elétrica total da fábrica, a otimização é cerca de 23,66%. O outro objetivo secundário desse estudo também foi satisfeito, devido ao fato de o modelo proposto realizar a programação da produção de todos os produtos de maneira simultânea, visto que a sistemática atual da empresa funciona de maneira diferente.

Porém, sugere-se para estudos futuros algumas propostas com o intuito de tornar o modelo proposto mais robusto e aplicável na rotina da empresa. A primeira proposta a ser sugerida, refere-se à criação de interfaces em *Visual Basic for Applications (VBA)*, que execute o modelo proposto permitindo aos responsáveis pela programação da produção, determinarem os valores para os limitantes das restrições do modelo, baseado em informações obtidas do setor de manutenção (disponibilidade das máquinas) e também do cliente da empresa (demanda dos produtos).

Outra proposta considerável, é a implementação do parâmetro monetário no modelo para que a empresa possa obter o resultado da função objetivo em unidade monetária, baseado na modalidade tarifária de cobrança de energia elétrica em que a mesma se enquadra. Por último, é sugerido a realização de uma análise de sensibilidade através do modelo proposto, analisando diferentes cenários que possam surgir para a empresa perante ao mercado ao qual ela está inserida, visando encontrar novas configurações para as máquinas do sistema produtivo que sejam melhores que a atual.

Referências

BAZARAA, M.S; JARVIS, J.J; SHERALI, H.D. *Linear Programming and Network Flows*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 4th edition, 2010.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L.P. *Pesquisa operacional para cursos de Engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

COLIN, E.C. *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas* / Emerson Carlos Colin. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CORRÊA, H.L; CORRÊA, C.A. *Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica*. 2ª ed., 4ª reimpr. São Paulo: Atlas, 2009.

CORRÊA, H.L; GIANESI, I.G.N; CAON, M. *Planejamento, programação e controle da produção: MRP II/ERP: conceitos, uso e implantação: base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão*. 5ª ed., 4ª reimpr. São Paulo: Atlas, 2010.

GOLDBARG, M.C; LUNA, H.P.L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005 – 9ª Reimpressão.

HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, Inc., 2006.

HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. *Introduction to Operations Research*. New York: McGraw-Hill, Inc. 7th edition, 2001.

MOREIRA, D.A. *Administração da produção e operações*. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 624p.

TUBINO, D.F. *Manual de planejamento e controle da produção*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2000.

TUBINO, D.F. *Planejamento e controle da produção: teoria e prática*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VOLLMANN, T.E. et al. *Sistemas de planejamento e controle da produção para gerenciamento da cadeia de suprimentos*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.