

OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE MATÉRIAS-PRIMAS NA PRODUÇÃO DO VIDRO PLANO INCOLOR

Julio Cesar Lopes Lemos
juliocesar.lemos@hotmail.com
AEDB

Otávio Barbosa de Paula
otaviobarbosa7@gmail.com
AEDB

Rodrigo Alexandre de Alencar Nascimento
rodrigoaanascimento@hotmail.com
AEDB

Vinicius Magalhães Campos
viniciusmagalhaesc@hotmail.com
AEDB

Washington Macedo Lemos
washington.lemos@aedb.br
AEDB

Resumo: O objetivo do presente artigo é desenvolver um novo método de determinação da receita usada na produção de vidros planos, de forma a obter um custo ótimo, sem alterações nas especificações e qualidade do produto. Para chegar a essa condição que se resulta no custo mínimo, foi utilizado uma extensão no Excel, que se chama Solver. Essa ferramenta considera o custo e a composição química de cada matéria-prima, a fim de determinar qual a porcentagem ideal na receita, tendo como resultado uma solução ótima. Utilizando conceitos de Pesquisa Operacional, foram consideradas algumas restrições e especificações máximas e mínimas do vidro para indicar ao Solver a porcentagem de cada óxido que deve ter no vidro, sendo esses dados consultados em uma empresa fabricante de vidros na região.

Palavras Chave: Vidro - Custo ótimo - Solver - Pesquisa Operacional -



1. INTRODUÇÃO

Esse estudo apresenta uma visão sobre a história de descobrimento do vidro, o processo de produção, composição e propriedades, tendo em vista desenvolver uma otimização na formulação de produção da composição, mantendo seus aspectos.

Um dos processos mais importantes da fabricação de qualquer produto atualmente é a dosagem adequada de matérias-primas, assim a composição química do vidro é constituída de várias matérias-primas, com proporções determinadas, que no forno se fundem devido o efeito do calor sendo transformadas em vidro.

A economia na utilização das matérias-primas, além de reduzir os custos implica também em um volume maior de vidro produzido. De forma geral devem ser observadas as propriedades do vidro, aparência do produto, rendimento de fabricação, agressão ao meio-ambiente, energia necessária para elaboração, agressão aos equipamentos, higiene e segurança, estratégia de suprimento e custo, sendo o custo um dos itens de maiores relevâncias estudado no trabalho que se apresenta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. HISTÓRIA DO VIDRO

A descoberta do vidro é muito antiga, foi aproximadamente no ano 5000 a.C., quando os fenícios ao fazerem uma fogueira na areia á beira da praia, utilizando a Trona (mineral rico em óxido de sódio) afim de apoiarem suas painelas, descobriram acidentalmente que areia aliado a Trona e o fogo ocasionaram uma reação, originando-se em um líquido transparente que hoje se chama vidro (AKERMAN, 2000b).

Em 100 a.C., os romanos já produziam o vidro por técnicas de sopro nos moldes, para a confecção de janelas. Entre os anos 500 e 600 d.C., um nova maneira possibilitou a produção do vidro plano por sopro de uma esfera, através da sua ampliação por rotação em forno, depois que a bolha estava grande suficiente, cortava-se o fundo, deixando a parte que estava presa no tubo e com a rotação deste se produzia um disco de vidro aproximadamente

plano, que era utilizado para fazer vidraças e vitrais (AKERMAN, 2000b).

Por volta do ano de 1300, o vidro moldado a rolo foi introduzido através de uma técnica trazida do Oriente em Veneza, mas especificamente na Ilha de Murano que se especializou na produção desse vidro, que foi revolucionário para a época, surgindo também o cristal, esses processos existem até os dias de hoje (AKERMAN, 2000b).

Em 1900 foi dado o início da produção de vidro plano contínuo, através do estiramento da folha de vidro na vertical, sendo que em 1952 foi inventado na Inglaterra, por Pilkington o processo Float, onde o vidro fundido é escorrido sobre um banho de estanho líquido que solidifica sobre ele, revolucionando o setor. A partir daí ocorreram diversos estudos no processo de fabricação da “folha” a fim de melhorar a tecnologia de produção do vidro plano, como a redução da distorção óptica e o custo de produção (AKERMAN, 2000b).

2.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO

O processo de fabricação do vidro Float (Flutuar) é realizado em quatro principais etapas, divididas da seguinte maneira:

- **Dosagem e mistura das matérias primas:** As matérias-primas que compõem o vidro são medidas, pesadas e misturadas na quantidade pré-determinada no Batch House “Casa de mistura”. Em seguida a mistura da composição é enviada ao forno de fusão (AKERMAN, 2014).

- **Fusão:** No forno, a composição é fundida a uma temperatura de mais o menos 1600°C. Nesse processo existe uma determinada lentidão, sendo determinada pelas correntes internas do tanque de fusão, que podem atingir a capacidade de até 3.000 toneladas. Em seguida, o vidro é refinado para que as bolhas de gases que aparecem do processo sejam eliminadas. Após, a massa do vidro fundido é preparada à temperatura e viscosidade adequadas para serem transformadas (AKERMAN, 2014).

- **Transformação:** A massa de vidro fundido é despejada em um tanque com estanho derretido, a uma temperatura de 650 °C. Nesse processo o vidro flutua sobre o estanho feito óleo sobre a água, devido à diferença de densidade dos dois materiais sendo chamado de processo Float. A partir daí, o vidro é conduzido para fora do banho de estanho por máquinas especiais que determinam a largura da lâmina de vidro, onde a espessura da chapa é dada pela velocidade de extração do vidro de dentro do tanque de estanho (AKERMAN, 2014).

- **Recozimento:** A lâmina de vidro Float é recozida dentro de um forno linear e contínuo, onde a chapa de vidro é resfriada de forma controlada, permitindo assim que as tensões do material que acaba de passar do estado líquido para sólido sejam controladas, possibilitando o posterior corte do vidro (AKERMAN, 2014). A imagem abaixo representa o processo de produção:

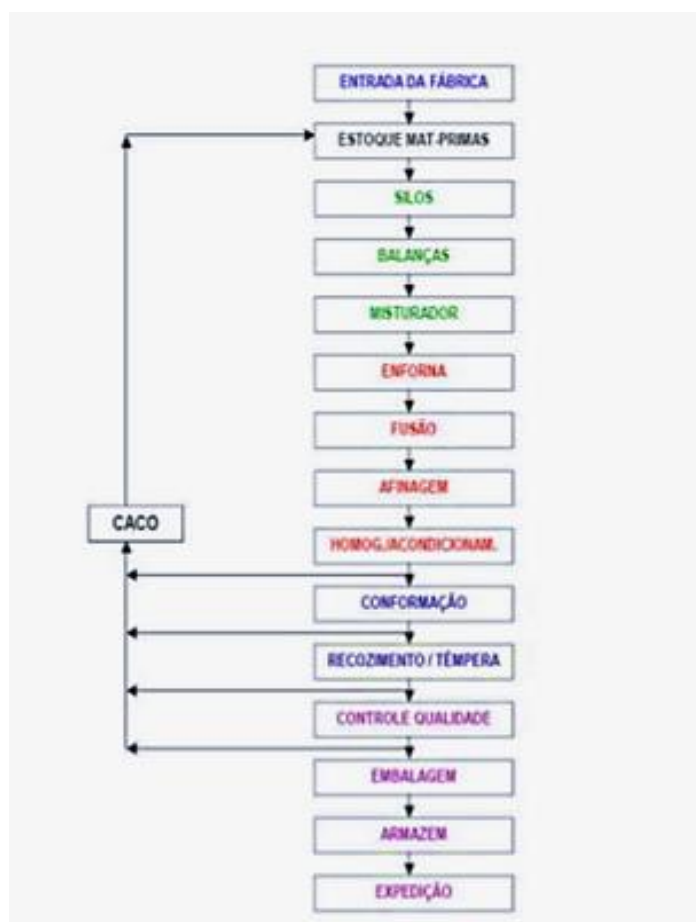


Figura 2 – O Processo de Produção do Vidro Plano

2.3. COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DO VIDRO

O vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, obtida através do resfriamento de uma massa a base de sílica em fusão. Sendo assim, todas as matérias-primas na fabricação do vidro devem ter sua composição química e granulométrica conhecidas, pois as características físicas e químicas do vidro são dependentes da sua composição, sendo importantes para o processo de fusão (AKERMAN, 2014).

As matérias primas são muito importantes no processo de produção do vidro, pois tudo o que entra no forno de fusão sai na forma de vidro, dessa forma, não existe recurso de separar o que entrou errado no forno, assim como todo erro acaba comprometendo a

qualidade dos produtos (EDUARDO, CONSENZA, BARROSO; 2007).

A composição dos vidros é evidenciada pela análise química. Quando se analisa um vidro, seus elementos constituintes são representados pelos seus respectivos óxidos e a soma do peso dos mesmos é igual ao peso da amostra analisada. (AKERMAN, 2000b).



Figura 3: Composição Química do Vidro Plano

- **Viscosidade**

É a propriedade mais importante na produção do vidro, pois é a dificuldade do líquido escoar, é o inverso de fluidez. Para a formação do vidro é necessário alta viscosidade a fim de impedir a cristalização de suas moléculas, sendo esse ponto atingido através da temperatura de fusão no forno (AKERMAN, 2014).

Durante o processo de conformação o vidro vai esfriando e ficando mais viscoso.

Quando ele atinge a forma ideal desejada da viscosidade, o mesmo passa a não fluir mais. Após a conformação a peça de vidro possui tensões ocasionadas do processo e precisa passar pelo processo de recozimento que aquece o vidro até uma determinada temperatura a fim de abaixar a viscosidade para o alívio das tensões (AKERMAN, 2014).

A figura abaixo representa de forma qualitativa, como as propriedades dos vidros variam em relação ao aumento dos seus óxidos constituintes.

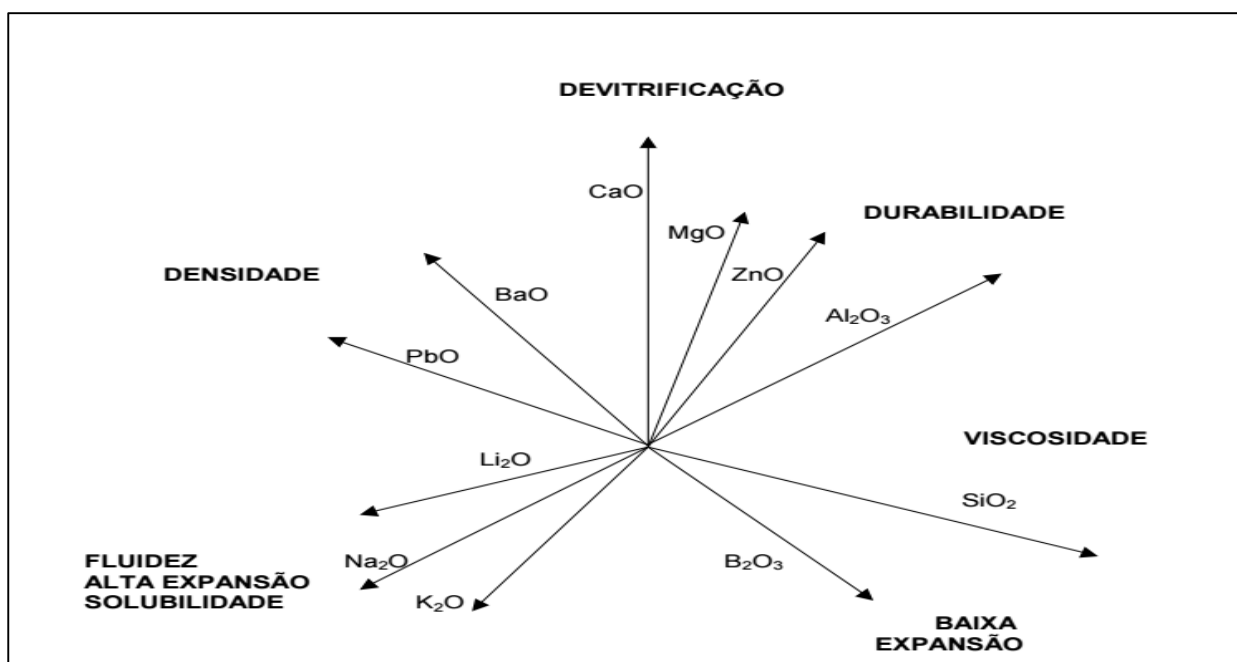


Figura 4: Variação das Propriedades

Por exemplo, se for retirado 1% de Na_2O e em seu lugar for colocado 1% de SiO_2 , o efeito sobre o aumento da viscosidade é dobrado pois, ambas modificam no mesmo sentido de aumento da viscosidade (AKERMAN 2000b).

Os óxidos que compõem o vidro podem ser classificados como:

- **Óxidos formadores:** Fundamentais para a formação do vidro, por exemplo, os óxidos de silício e de boro (AKERMAN 2000b).
- **Óxidos estabilizadores:** São utilizados para garantir no vidro uma boa resistência química e a não cristalização, por exemplo, óxidos de cálcio, magnésio e a alumina (AKERMAN 2000b).
- **Óxidos fundentes:** Possuem a função de diminuir a temperatura da mistura de óxidos permitindo que o vidro possa ser “trabalhado” a temperaturas mais baixas, por

exemplo, os óxidos de sódio e de potássio (AKERMAN 2000b).

3. METODOLOGIA

3.1. PESQUISA OPERACIONAL E PROGRAMAÇÃO LINEAR

O modelo de estudo para nosso trabalho se baseia em fenômenos estatísticos e, por isso, denominados determinísticos, no qual se haja dados conhecidos à prioridade não exista eventualmente variação em tal processo. Divergente aos métodos estocásticos, nos quais há provável ocorrência de aleatoriedade, partindo-se ao campo da probabilidade (FRAZÃO, et. al., 2014, p.1669).

O problema presente trata da Pesquisa Operacional (PO) para a solução de um melhor ajuste nas matérias primas dos vidros em uma indústria vidreira. A PO foi abordada de forma organizada durante as operações militares da Segunda Guerra Mundial, na qual times de engenheiros, cientistas e demais especialistas utilizaram o método científico para a resolução dos problemas que lhes eram impostos formulando respostas hipotéticas e decisões inovadoras.

Segundo Cardoso (2011, p. 5) um estudo de PO é desenvolvido em algumas etapas, como indicado abaixo.

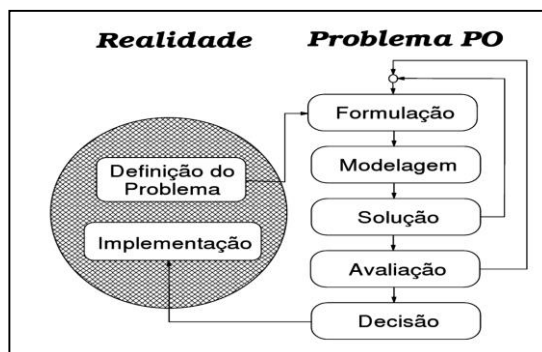


Figura 5: Estrutura do Modelo de PO

Os problemas devem ser definidos e então formulados. A etapa de **formulação** busca a elaboração dos elementos e referências; a **modelagem** consiste na concepção do modelo básico; a **solução** pode ser realizada matematicamente ou por algoritmos; a **avaliação** se traduz na aprovação do modelo ou realização de alterações; a **decisão** é a seleção para funcionalização da solução (ANDRÉA, 2011, p. 6).

O modelo utilizado para a solução do problema é referente à programação linear (PL), a qual tem sido considerada um dos mais importantes avanços científicos de meados do século XX e já evitou que diversas empresas no mundo desperdiçassem muito dinheiro. O

método visa a melhor alocação possível para recursos escassos entre atividades concorrentes, determinando quanto de cada recurso será realmente necessário para cada atividade (HILLIER, LIEBERMAN, 2013, p.20).

Muitos dos problemas de PL são relacionados ao aumento de lucratividade ou redução de gastos nas empresas, as quais citam suas restrições, ou seja, as limitações impostas pelo processo produtivo. Porém o modelo também pode ser utilizado em diversas outras áreas, como na área médica como controle de Kilorads (unidade de medida de potência em radioterapias para cada ponto do corpo) e no planejamento agrícola (HILLIER, LIEBERMAN, 2013).

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. DADOS

Para a construção do modelo de programação linear utilizado para determinar o Batch (Lote) ótimo, foram coletados os dados necessários em uma empresa fabricante de vidros planos (com exceção das especificações). O batch (Lote) desta empresa é composto por 6 matérias-primas:

MP1: Matéria-prima 1

MP2: Matéria-prima 2

MP3: Matéria-prima 3

MP4: Matéria-prima 4

MP5: Matéria-prima 5

MP6: Matéria-prima 6

Devido aos termos de confidencialidade da empresa, as informações apresentadas nas figuras a seguir sofreram alterações.

	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
SiO₂	99.71		0.12	1.46		2.70
Al₂O₃	0.03		0.02	0.19		0.75
Fe₂O₃	0.04	0.02	0.04	0.14	0.01	96.56
CaO			56.20	34.95		
MgO			0.39	19.11		
Na₂O		58.41		0.19	43.55	
K₂O	0.00		0.03	0.16		
SO₃					56.19	

Figura 6: Composição Química das Matérias-Primas (%)

	Min	Max
SiO₂	70	72.5
Al₂O₃		1.5
Fe₂O₃		0.3
CaO	8	10
MgO	4	5
Na₂O	13	14
K₂O		1
SO₃		0.25

Figura 7: Especificações do Vidro (%)

MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
100.00	500.00	50.00	200.00	400.00	600.00

Figura 8: Custo Total de Cada Matéria-Prima (R\$/ton)

4.2. MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

A relação de taxas de matéria prima (variáveis de decisão) é multiplicada pelo custo de cada produto na **função objetivo**, definindo se o objetivo básico é minimizar ou maximizar algo. Para nosso caso a solução busca a minimização.

As **restrições** são limites a serem impostos e podem se referir a outros dados que afetem a fórmula do local de destino. Cada restrição deve ser apresentada como uma relação linear de igualdade ou desigualdade utilizando-se as variáveis de decisão (JESUS, FAVONI, 2016, p. 1; JÚNIOR, SOUZA, 2004, p.1).

A partir dos dados coletados é possível construir o modelo abaixo. As variáveis X serão as quantidades de cada matéria-prima na mistura, de forma a satisfazer as especificações.

Função objetivo	$100 \cdot X_{MP1} + 500 \cdot X_{MP2} + 50 \cdot X_{MP3} + 200 \cdot X_{MP4} + 400 \cdot X_{MP5} + 600 \cdot X_{MP6}$	
Sujeito a:		
SiO ₂	$99.71 \cdot X_{MP1} + 0.12 \cdot X_{MP3} + 1.46 \cdot X_{MP4} + 2.70 \cdot X_{MP6}$	≥ 70
	$99.71 \cdot X_{MP1} + 0.12 \cdot X_{MP3} + 1.46 \cdot X_{MP4} + 2.70 \cdot X_{MP6}$	≤ 72.5
Al ₂ O ₃	$0.03 \cdot X_{MP1} + 0.02 \cdot X_{MP3} + 0.19 \cdot X_{MP4} + 0.75 \cdot X_{MP6}$	≤ 1.5
Fe ₂ O ₃	$0.04 \cdot X_{MP1} + 0.02 \cdot X_{MP2} + 0.04 \cdot X_{MP3} + 0.14 \cdot X_{MP4} + 0.01 \cdot X_{MP5} + 96.56 \cdot X_{MP6}$	≤ 0.3
CaO	$56.20 \cdot X_{MP3} + 34.95 \cdot X_{MP4}$	≥ 8
	$56.20 \cdot X_{MP3} + 34.95 \cdot X_{MP4}$	≤ 10
MgO	$0.39 \cdot X_{MP3} + 19.11 \cdot X_{MP4}$	≥ 4
	$0.39 \cdot X_{MP3} + 19.11 \cdot X_{MP4}$	≤ 5
Na ₂ O	$58.41 \cdot X_{MP2} + 0.19 \cdot X_{MP4} + 43.55 \cdot X_{MP5}$	≥ 13
	$58.41 \cdot X_{MP2} + 0.19 \cdot X_{MP4} + 43.55 \cdot X_{MP5}$	≤ 14
K ₂ O	$0.0007 \cdot X_{MP1} + 0.03 \cdot X_{MP3} + 0.16 \cdot X_{MP4}$	≤ 1
SO ₃	$56.19 \cdot X_{MP5}$	≤ 0.25

Figura 9: Modelo de programação linear

Um dos métodos de solucionar um problema de programação linear é o método gráfico. Este método pode ser utilizado para solucionar qualquer problema de programação linear (PL) com até três variáveis de decisão, porém geralmente são utilizadas duas devido à grande complexidade em se utilizar iguais ou superiores a três.

Para tal, nosso problema pode ser resolvido de maneira acessível pelo método simplex. Este método foi desenvolvido por George Dantzig em 1947 e comprovou sua eficiência, podendo ser utilizado para solucionar grandes problemas nos computadores atuais (HILLIER, LIEBERMAN, 2013, p.83).

A ferramenta utilizada em nosso trabalho é o Excel Solver, que aplica rapidamente o método Simplex para encontrar uma solução ótima para o modelo.

Segundo Jesus e Favoni (2016, p. 2) de acordo com o manual do usuário do Office 2003 o Solver é uma parte de um conjunto de ferramentas que permite encontrar um valor ótimo para problemas lineares utilizando o algoritmo Simplex.

Para Martim, E., et. al. (2012, p.2) um algoritmo denominado Gradiente Reduzido Generalizado, desenvolvido por Leon Lasdon e Allan Warren da Universidade do Texas e de Cleveland respectivamente é utilizado para a resolução de problemas não lineares e um algoritmo desenvolvido pela Frontline Systems Inc. para sistemas lineares são utilizados para a resolução de problemas do Solver (apud MOURA, 2007).

4.3. RESOLUÇÃO DO MODELO NO SOLVER

Segundo Hillier e Lieberman (2013, p. 56-57) para se iniciar uma programação linear através de planilhas devem ser especificadas: 1. As decisões a serem tomadas; 2. As

restrições sobre tais decisões; 3. A sua medida de desempenho global.

1. As decisões a serem tomadas, para este caso, são as taxas necessárias de matéria-prima para a produção dos vidros.

2. As restrições são baseadas nas literaturas, pois como pode ser visto no conteúdo do trabalho, tolerâncias de densidade, durabilidade, expansão térmica, viscosidade que devem ser respeitadas para a fabricação dos vidros.

3. A medida de desempenho global é o **custo por Bach** (Lote), o qual o estudo busca maneiras de **minimizá-lo**.

Ao se utilizar o Solver os valores de X obterão resultados correspondentes à necessidade de cada produto utilizado no processamento do vidro.

Para habilitar o Solver é necessário adentrar-se no menu Ferramentas do Excel e selecionar, na caixa de diálogo, Suplemento, em seguida a opção “ir”. Na nova caixa seleciona-se “Solver” e, a partir deste ajuste, já é possível a utilização deste instrumento.

Munindo-se da planilha previamente organizada é necessário que se selecione cada item corretamente, de acordo com o objetivo de cada projeto, atribuindo suas células na caixa de diálogo do Solver.

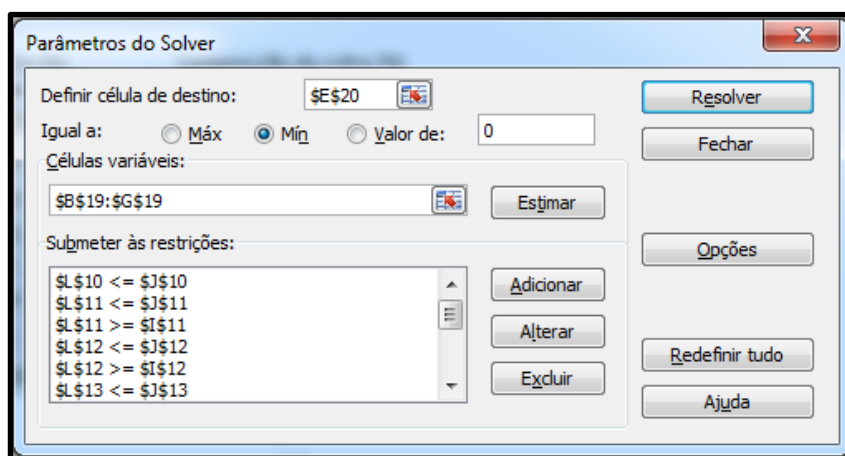


Figura 10: Caixa de diálogo dos Parâmetros da Ferramenta Solver.

- \$E\$20 é o custo por tonelada;
- \$B\$19:\$G\$19 são as variáveis respectivamente **MP1, MP2, MP3, MP4, MP5 e MP6**;
- As restrições são inseridas através do botão “Adicionar”. Todas elas podem ser visualizadas abaixo.

	I	J	K	L	M
5				Restrições	
6	Especificação do vidro (%)		Composição do vidro (%)		
7	Min	Max			
8	70	72,5	SiO ₂	70 <=	72,50 <= 72,5
9		1,5	Al ₂ O ₃	0 <=	0,07 <= 1,5
10		0,3	Fe ₂ O ₃	0 <=	0,06 <= 0,3
11	8	10	CaO	8 <=	10,00 <= 10
12	4	5	MgO	4 <=	4,08 <= 5
13	13	14	Na ₂ O	13 <=	13,00 <= 14
14		1	K ₂ O	0 <=	0,04 <= 1
15		0,25	SO ₃	0 <=	0,25 <= 0,25

Figura 11: Apresentação da Localização das Restrições Utilizadas na Caixa de Diálogo Anterior.

Antes de resolver o modelo, é recomendado que se realize algumas alterações. Entre em “Opções” e selecione “Presumir modelo linear” e “Presumir não negativos”. Isso determina que se trata de um problema de programação linear e que são exigidas restrições de não negatividade para que seja rejeitada taxa negativa de matéria prima.

Pronto, agora é o momento de selecionar Resolver da Caixa de diálogo dos Parâmetros da Ferramenta Solver. O programa substitui os valores das células variáveis por valores ótimos e apresenta a caixa “Resultados do Solver” explicitando que a solução foi encontrada juntamente com as restrições e condições atendidas.

Pode ocorrer algum problema, o qual será transmitido pela mesma caixa de diálogo trazendo alguma das seguintes mensagens “O Solver não conseguiu encontrar uma solução viável” ou “Os valores Set Cell não convergem”, sendo então necessário algum tipo de ajuste em uma das etapas do trabalho.

5. RESULTADOS

Após a resolução no Solver proposta à que se desejava chegar o trabalho apresentado, obtivemos a seguinte receita ótima para este caso:

Composição da receita (%)					
MP1	MP2	MP3	MP3	MP4	MP5
60.10	18.14	4.02	17.29	0.37	0.07

Figura 12: Receita proposta

Sendo assim, conforme os resultados do Solver, o valor da receita seria de R\$ 239,34/ton. Isso representaria uma redução de 1% nos custos com relação à receita utilizada atualmente na empresa.

6. CONCLUSÃO

Pode-se observar com o desenvolvimento do trabalho ao analisar os resultados obtidos que a otimização da dosagem de matérias-primas tem sua complexidade devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo.

Se desconsiderarmos as variações que não puderam ser tratadas, podemos concluir que o modelo apresentado atende satisfatoriamente à resolução do problema proposto, visto que nos auxilia na tomada de decisão para a receita do processo produtivo estudado.

A utilização do modelo contribui muito com o processo de produção do vidro, pois o processo não ficará preso somente em uma instrução operacional e ao conhecimento empírico.

7. REFERÊNCIAS

AKERMAN, Mauro; Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro, Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain Vidros Brasil, Novembro de 2000b.

AKERMAN, Mauro; Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnologias na indústria do vidro. Relatório final, Ribeirão Preto, SP - Dezembro de 2014.

ABIVIDRO - <http://www.abividro.org.br> (acesso em Maio de 2016)

BNDES - ROSA, Sergio Eduardo S.; CONSENZA, José Paulo.; BARROSO, Deise Vilela; Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. Rio de Janeiro - Setembro de 2007.

CARDOSO, Andréa.; Fundamentos da Pesquisa Operacional. Alfenas: UNIFAL-MG, 2011. 102 p. Apostila.

FRAZÃO, Marcos; VERAS, Rodrigo; AITA, Keylla; MACHADO, Vinícius.; Ensino de Programação Linear Online. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 28 a 31 de julho de 2014, Brasília. Disponível em: < <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wei/2014/0041.pdf> > Acesso em: 15 jun.2016

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J.; Introdução à Programação Linear. Introdução à Pesquisa Operacional. 9. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. P. 20-82.

JESUS, João B.; FAVONI, Célio.; O Uso da Ferramenta Solver do Excel na Resolução de Problemas de Programação Linear. Jahu: FATEC, 2016. 5 p. Trabalho de Graduação.

JÚNIOR, Aloísio; SOUZA, Marccone.; Solver (Excel): Manual de Referência. Ouro Preto: UFOP, 2004. 19 p. Manual de Referência.

MARTIM, E.; FIATES, J.; ALMEIDA, L.; MARTIM, N. S. P. P.; Otimização de Processos Químicos Utilizando a Ferramenta Solver do Excel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19, 09 a 12 de setembro de 2012, Búzios.