

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS (DCA)**

Cesar Augusto Greff da Silveira

**Otimização bidimensional de corte de estoque –
o caso da manufatura de capacitores eletrolíticos**

Porto Alegre
2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS (DCA)**

Cesar Augusto Greff da Silveira
0022144

**Otimização bidimensional de corte de estoque –
o caso da manufatura de capacitores eletrolíticos**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Departamento de Ciências
Administrativas da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Administração.

Orientador: Prof. Denis Borenstein, Ph.D

Porto Alegre
2008

Dedico esse trabalho a minha esposa e filhos sempre carinhosamente tolerantes ante minha ausência para necessárias jornadas de estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para o meu crescimento intelectual e profissional, especificamente aos professores e funcionários da UFRGS, instituição que sempre guardarei com carinho. Agradeço em especial à atenção e disponibilidade do meu orientador professor Denis Borenstein, de quem nesse tempo obtive valiosos ensinamentos.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	13
2.1. Histórico da empresa	13
2.2. Atuação	14
2.3. Visão Geral do Processo de Manufatura	15
2.4. O Processo de Manufatura de Folhas de Alumínio	17
2.5. Decisões de alocação de material.....	19
2.5.1. Restrições e variáveis da alocação	19
2.5.2. Dimensão longitudinal da alocação para corte.....	20
2.6. Limitações das decisões atuais	21
3. JUSTIFICATIVA.....	22
4. QUESTÕES DE PESQUISA.....	24
5. OBJETIVOS	25
6. MÉTODO DE PESQUISA.....	26
6.1. Estudos exploratórios.....	27
6.2. Construção do modelo.....	27
6.3. Implementação computacional	27
6.4. Validação do modelo.....	27
7. REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
7.1. Tipologia do corte de estoque.....	30
7.1.1. Dimensionalidade.....	30
7.1.2. Atribuição ou seleção	31
7.1.3. Sortimento de objetos	31
7.1.4. Sortimento de itens	31
7.1.5. Padrões de corte unidimensionais	33
7.1.6. Padrões de corte bidimensionais	35
7.1.7. Corte guilhotinado e não-guilhotinado.....	36
7.2. Considerações sobre métodos de solução.....	37

7.2.1. Abordagens baseadas em programação linear.....	37
7.2.2. Abordagem por Métodos heurísticos.....	37
7.2.3. Métodos híbridos de solução.....	39
8. MODELAGEM DA SOLUÇÃO	40
8.1. Variáveis para modelagem	40
8.2. Resolução por programação linear.....	43
8.3. Método heurístico.....	44
8.4. Decisão desempenhada pelo operador.....	46
8.5. Resultados comparativos dos métodos aplicados	47
9. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	49
9.1. implementação computacional	49
10. CONCLUSÃO.....	50
11. ANEXOS	51
11.1. Anexo A – Otimizador em MS VB 6.0 e LINDO.....	51
11.2. Anexo B – Exemplo de chamada a função de otimização	54

Lista de figuras

Figura 1 – Processo de bobinagem.....	16
Figura 2 – Capacitor de alumínio do tipo radial	18
Figura 3 – Navalhas seccionando o rolo e refugando a borda direita da folha.....	19
Figura 4 – Cadeia de transformação de insumos e informações	21
Figura 5 – Processo de análise quantitativa.....	26
Figura 6 – Fenomenologia de problemas de corte e empacotamento (Dyckoff, 1990)32	
Figura 7 – Padrão de corte unidimensional.....	33
Figura 8 – Padrão de corte unidimensional compartimentado	34
Figura 9 – Padrão de corte bidimensional.....	35
Figura 10 – Padrões de corte bidimensionais guilhotinados e não-guilhotinados	36
Figura 11 – Exemplo de script para software LINGO	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Proporção de estoque de folhas de alumínio (em mil R\$).....	22
Tabela 2 – Projeção de um mês de consumo de folhas de alumínio (em mil R\$)....	22
Tabela 3 – Lote exato (em rolos).....	41
Tabela 4 – Demanda de corte de folhas	42
Tabela 5 – Rolos de materiais (alumínio).....	42
Tabela 6 – Excesso de fornecimento (em m2)	43
Tabela 7 – Aplicação de programação linear	44
Tabela 8 – Perda / excesso de material classificada.....	45
Tabela 9 – Aplicação de método heurístico.....	46
Tabela 10 – Decisão do operador	46
Tabela 11 – Tabela comparativa de métodos de decisão	47
Tabela 12 – Comparativo de geração de estoques.....	48

Lista de quadros

Quadro 1 – Resumo de características da tipologia de Dyckoff	32
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

abrev.	Significado da abreviatura
ERP	Enterprise Resource Planning
MES	Manufacturing Execution System
PO	Pesquisa Operacional

Resumo

A melhor utilização de recursos na manufatura continua sendo um elemento muito importante para competitividade das organizações industriais. Nesse contexto o melhor uso de materiais e otimização de estoques tem grande contribuição. No caso da manufatura de componentes eletrônicos, a técnica e exatidão na alocação de recursos representa grande vantagem competitiva em seus mercados. Assim, para a programação da produção de capacitores eletrolíticos a otimização no uso de folhas de alumínio com o manuseio e emprego da forma mais otimizada possível representa grande redução de custos. Neste trabalho faz-se a análise dos problemas de corte de estoque, e foca-se na geração de quantidades mais exatas possíveis para atendimento de demandas tecnicamente muito específicas. Também explora-se aplicabilidade de programação linear e aplicação de heurísticas na resolução desse tipo de problema, com resultados muito significativos em relação às decisões que vinham sendo aplicadas na produção do corte de folhas de alumínio.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura nas indústrias de tecnologia, em especial as do setor eletroeletrônico, vêm cada vez mais sendo pressionadas a serem mais eficientes no planejamento e uso de insumos, isso em decorrência de vários fatores concorrenciais e de regulação.

Em seu processo produtivo informação é transformada concomitantemente à transformação de insumos em grau de importância similar devido ao rigor de controle estabelecido nos processos internos. Nesse cenário de informações abundantes e restrições de toda ordem, a temática da escassez atribui grande relevância a decisão baseada em informação.

Nesse contexto complexo situa-se o problema de corte de estoque de folhas de alumínio, problemática comum a vários tipos de indústrias e amplamente estudada no meio acadêmico, mas que na manufatura de capacitores ganha nuances que desafiam experientes planejadores em seu dia-a-dia e nesse trabalho representa a oportunidade de exploração de vasto arcabouço teórico relacionado a métodos de otimização.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Histórico da empresa

Em Porto Alegre a 20 de julho de 1955, quatro jovens industriais, os irmãos Mânicas (Alcides, Ernesto, Hermínio e Júlio) uniram-se para formar uma pequena indústria com a finalidade de produzir condensadores para rádios. Surgia desta união a Indústria Brasileira de Condensadores PAMA. Como toda a indústria gaúcha nova que surgia na época, esta também localizava-se em um prédio alugado no fundo do quintal da Av. Brasil, nº 1091, onde mais tarde (1962) tomaria conta de todo o terreno devido ao seu pioneirismo na área industrial eletrônica no sul do Brasil. Seus produtos eram vendidos quase que exclusivamente para o centro do país, mais especificamente São Paulo.

Na mesma cidade de Porto Alegre, em meados de 1957, surgia uma grande empresa interessada em instalar-se, no mesmo ramo de atuação da PAMA, e na procura de uma área física. A SIEMENS depara-se com uma empresa já instalada e necessitando de recursos para expandir-se. As máquinas chegaram ao porto de Porto Alegre e são descarregadas na sede da Teleunião e a SIEMENS, através de seu diretor Sr. Knapp, ainda não conseguia convencer os irmãos Mânicas das vantagens da associação, quando um dos irmãos (Júlio) resolve, por curiosidade, ir conhecer as máquinas da futura, até então, concorrente e alarmado pela superioridade consegue convencer os demais irmãos da necessidade da associação.

A nova empresa recebe um melhoramento na área física e um reforço na área técnica com a chegada de técnicos alemães da SIEMENS que estavam incumbidos de montar as máquinas e começar a produção de seus produtos. Com o passar dos anos, os técnicos retornaram à Alemanha, a empresa foi crescendo e necessitando de mais espaço. Em 1962 iniciava-se uma nova fase na empresa, agora já em paralelo, na cidade vizinha de Gravataí, produzindo em regimes de turnos de trabalho, com um total aproximado de mil funcionários.

A escolha pela cidade de Gravataí possui um fato que deve ser lembrado para um paralelo entre os dias da transferência e os de hoje, o motivo além do espaço físico

foi a qualidade e limpeza da água encontrada no rio Gravataí. A água é necessária para o tratamento das folhas de alumínio, componentes dos produtos da empresa. Em 1965, transfere-se definitivamente para Gravataí desativando a sede de Porto Alegre e desde esta época a grande maioria da mão-de-obra absorvida pela empresa é do sexo feminino, pela melhor adaptabilidade com o tipo de trabalho. Passado os primeiros anos de instalação em Gravataí, a empresa foi investindo em sua expansão, seu crescimento e seus produtos.

Em 1999, a SIEMENS decide dividir suas linhas de componentes eletrônicos e criar uma nova empresa. Para isso, fez uma parceria com um grupo japonês e criam a **EPCOS – Electronic Parts and Components**. A EPCOS já nasce com 16 fábricas e 4 centros de design espalhados por diversos países e desponta como uma das maiores do mundo na área de componentes eletrônicos. A Icotron é integrada a esse novo grupo em outubro de 1999.

As instalações da indústria, ocupam uma área de 404.000 m². Concentra sua produção em capacitores eletrolíticos e plásticos, usados na armazenagem de energia, desde rádios de pilha até grandes equipamentos elétricos. Saem da indústria diariamente 3,0 milhões de capacitores e outros componentes numa gama de aproximadamente 7 mil itens. A produção apresenta um faturamento anual de U\$ 100.000.000,00, em média.

2.2. Atuação

A EPCOS do Brasil, devido a sua variedade de linhas de produção e a quantidade de itens, atua em diversos segmentos e fornece aos mais variados ramos da indústria, tais como automobilística, elétrica, eletrônica e de entretenimento.

Dentre as principais linhas de produtos da EPCOS do Brasil, destacam-se as de capacitores eletrolíticos de alumínio, capacitores de poliéster metalizado, capacitores AC, semicondutores e transistores de sinal.

No mercado interno, os maiores clientes da EPCOS do Brasil são Semp Toshiba, Philco, Philips, CCE, Springer, Multibrás, Ericson, Philips e Gradiente. Já no

mercado externo, a Icotron tem como principais clientes Ericson, Philips, OSRAM Treviso, Carrier, Ford e Sony. A EPCOS do Brasil possui atualmente grandes concorrentes somente no mercado externo. São poucos, e na sua grande maioria estão concentrados na Ásia (China e Tigres Asiáticos). Destacam-se a Matsushita, Murata, AVX e Arcotronics.

Para conseguir atender a uma capacidade de produção de 3 milhões de capacitores por dia, a EPCOS do Brasil trabalha com inúmeros fornecedores e parceiros. Steiner (Alemanha), SungMoon (Coréia), KAE (Brasil) e Sigmaplast (Brasil) são os mais expressivos.

Por ser o único fabricante de capacitores na América do Sul tem grande desafio em manter custos logísticos competitivos em nível mundial mesmo mantendo grande distância geográfica dos grandes centros de manufatura de eletrônicos da Ásia e Europa. Isso faz com que principalmente matérias-primas importantes do processo de manufatura sejam importadas via embarques marítimos, nesses casos os prazos de entrega se situam entre três a seis meses, em conseqüência dispense grande esforço de planejamento operacional para manter os níveis de estoque compatíveis com a concorrência com nível de confiabilidade de atendimento ao cliente nos padrões mais exigentes.

2.3. Visão Geral do Processo de Manufatura

Capacitores diferem entre si pelo tipo básico de matéria-prima, que pode ser plástico ou alumínio, dimensão, tipo de terminal, mas principalmente por suas características elétricas de tensão (V) e capacitância (μf).

No caso de capacitores de alumínio especificamente, suas características elétricas são determinadas por dois componentes básicos: anodo, componente elétrico positivo e o catodo como negativo. O catodo tem poucas variações de tipo de material por não ter tensão específica, embora influencie na capacitância do capacitor por trabalhar em conjunto com o anodo.

O anodo é preoxidado em tensão específica para aplicação no produto final, tem como matéria-prima principal uma folha de alumínio cauterizada com espessura extremamente precisa, em microns, a qual é submetida a banhos químicos em solução eletrolítica de grande condutividade que agregará a sua superfície uma camada de óxido que resultará na característica elétrica desejada.

Depois de pronto a bobina de material que tem comprimento variável e largura entre 480 mm e 500 mm será cortada em larguras menores. Essas larguras são determinadas de acordo com altura do produto final, na etapa seguinte o material será utilizado na fábrica na bobinagem do capacitor. O processo de bobinagem consiste em enrolar o anodo e o catodo em torno de um pequeno eixo usando um papel eletrolítico para separar ambos, ao final da bobinagem de folha de alumínio necessária a bobina serão adicionadas algumas voltas de papel para proteger o corpo de alumínio. A bobinagem é o processo que agrega o maior custo de material ao produto semi-acabado, daí o produto segue as etapas seguintes de montagem, solda, teste e embalagem.

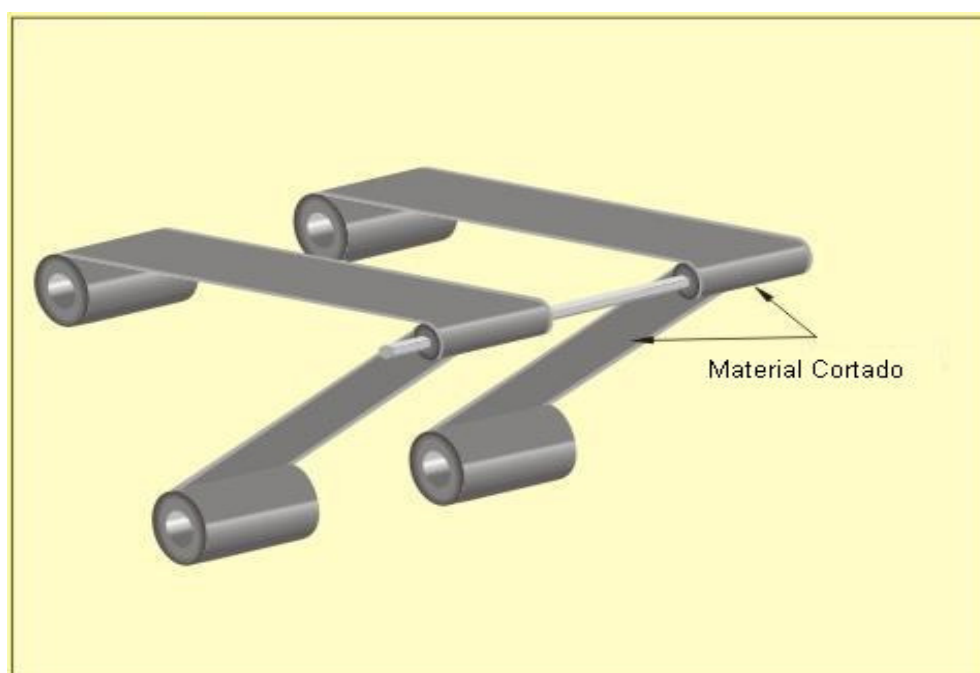


Figura 1 – Processo de bobinagem

2.4. O Processo de Manufatura de Folhas de Alumínio

O escopo de estudo terá como foco o processo de corte de anodo por esse concentrar um número considerável de variáveis de decisão. Pois mesmo com o apoio de sistemas de informação, a decisão depende atualmente da habilidade humana, que conjuga a experiência de repetição do evento com a capacidade limitada de processamento dessas variáveis.

O primeiro problema de decisão de uso é relativo a quantidade necessária para atender a produção, pois essa quantidade demandada varia para a mesma ordem de produção de produto pronto de acordo com as características elétricas do lote de material em análise em relação às características determinadas para o produto. Essa variabilidade impossibilita a reserva automática pelo MRP via a implementação de uma estratégia de seleção de lotes de material no ERP. A variabilidade da quantidade necessária para produto é explicada pelo produto necessitar determinada área (m²) de folha de alumínio internamente para atingir a capacitância especificada. A quantidade necessária é calculada para o planejamento de materiais usando um valor central de capacitância pontualmente, porém muito raramente um lote de folha de alumínio (anodo) tem exatamente a capacitância arbitrada de forma tão precisa. Portanto, a engenharia estabelece uma capacitância mínima e máxima para uso do material avaliado. Os valores mínimos e máximos de capacitância significam uma tolerância pré-aprovada e admitida para o processo e é baseada nos diâmetros mínimos e máximos tolerados para bobina. Ocorre que quanto menor a capacitância de um lote de folha de alumínio em relação ao solicitado para o produto, maior será a área de alumínio necessária na bobina do capacitor, isso significa mais voltas de bobinagem para atingir a características elétricas especificadas para o produto final. Ao passo que quanto maior a capacitância do material, menor será a necessidade de área de folha de alumínio na bobina para atingir as características elétricas do produto final.

Os diâmetros máximos e mínimos de uma bobina são determinados levando-se em consideração a limitação de espaço do invólucro que a bobina do capacitor recebe, esse invólucro de proteção é denominado caneca de alumínio. Para uma montagem segura, a bobina terá um diâmetro inferior ao diâmetro interno da caneca para que a inserção seja viável, por outro lado, o diâmetro não poderá ser pequeno o bastante que o espaço vago no interior da caneca propicie danos à bobina por movimentação, causada por impacto ou vibração, da mesma no interior da caneca.

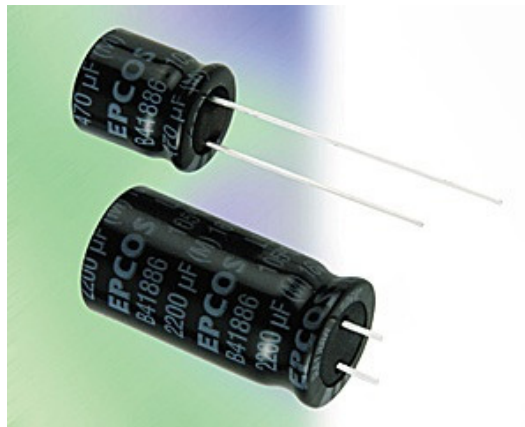


Figura 2 – Capacitor de alumínio do tipo radial

2.5. Decisões de alocação de material

O objetivo da programação do corte de material é alocar da forma mais otimizada possível a área de material necessária para o produto pronto no limite físico do rolo de material. Deve ser de forma que a combinação dessas múltiplas larguras, pois lote pode atender vários produtos, em um lote eletricamente compatível gere o menor refugo de material e setup. Cabe salientar que o menor tempo de preparação de máquina (setup) ocorre quando corta-se a totalidade de um rolo de material, pois na alocação parcial o saldo do lote aguarda em estoque uma programação futura. Esse objetivo de otimização é feita atualmente pelo programador do corte atualmente calculando quantas secções do rolo serão necessárias cortar, método que apresenta limitações que serão demonstradas a seguir. Para melhor entendimento denominaremos essa primeira decisão de “alocação ou otimização latitudinal” do rolo de material.

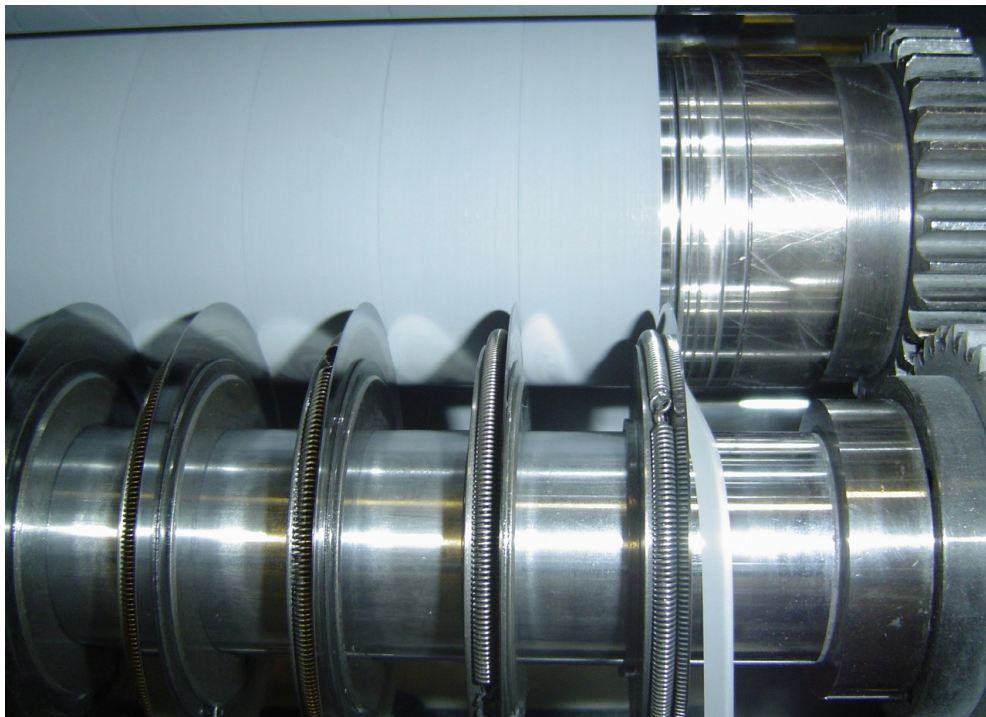


Figura 3 – Navalhas seccionando o rolo e refugando a borda direita da folha

2.5.1. Restrições e variáveis da alocação

Tolerância entre largura mínima e máxima da necessidade de corte: em dimensões maiores de produto (larguras de material maior) é permitida uma variação de largura

de corte que oscila entre 1 e 3 milímetros, isso ajuda na obtenção de 100% de alocação do rolo jumbo.

Largura útil do rolo diferente da largura total: nesse caso há refugo no rolo jumbo, é possível avançar um pequeno percentual sobre essa porção do rolo que não é paga ao fornecedor sem que haja prejuízo na qualidade do produto final.

Diâmetros de núcleo da máquina de bobinagem: só é possível agrupar necessidade para mesmo núcleo de material, se o diâmetro for diferente não será compatível com as máquinas de bobinar na fábrica.

Características elétricas compatíveis: só se podem agrupar necessidades de mesmo tipo de folha, tensão e capacitância do material dentro do intervalo estabelecido.

2.5.2. Dimensão longitudinal da alocação para corte

Outra dimensão de otimização do uso do material é o fato de que uma capacitância menor ou maior no lote de material resulta em comprimento de material necessário a bobinagem diferente, assim considerando a largura necessária do material inalterada. Sendo assim haverá o lote de material (rolo) que terá suas seções cortadas com comprimento de melhor ajustado ao múltiplo de comprimento necessário a bobina do capacitor. Essa análise que podemos denominar “otimização longitudinal” do rolo não é feita atualmente.

2.6. Limitações das decisões atuais

O principal limite do processo decisorial atual se traduz pela impossibilidade do programador do corte explorar um maior número de combinações de alocação e seu impacto no processo, ou seja, a cardinalidade percebida entre lote compatível e demanda compatível é 1 para “n” possibilidades ou 1 para 1 possibilidade. Dessa forma o mais usual é que o programador procure por um lote que atenda uma única demanda, assim por vezes verifique quais outras demandas podem ser atendidas por esse lote que será cortado. Quando o ideal seria submeter um grupo de demandas similares de bobinagem à combinação de alocação de vários lotes possíveis e selecionar os que possibilitem a melhor alocação de acordo com os critérios de otimização já expostos.

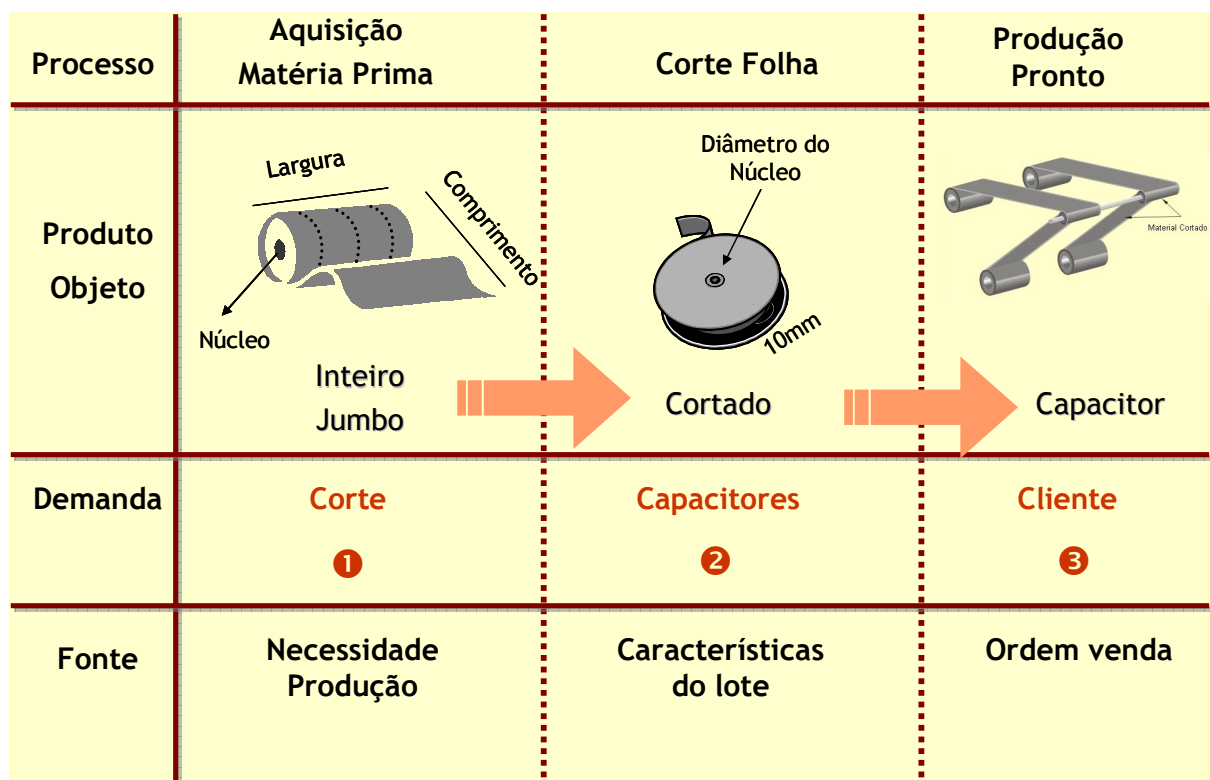


Figura 4 – Cadeia de transformação de insumos e informações

3. JUSTIFICATIVA

O planejamento de demanda de folhas de alumínio é feito atualmente com base em consumo histórico (estocástico), pois não é possível o planejamento determinístico baseado nas informações do MRP pelo fato do alcance da carteira de pedidos prover programação firme para apenas de quatro a seis semanas de produção, prazo insuficiente especialmente se comparado aos prazos de reposição possíveis para aquisição de folhas de alumínio, que compreendem em média 98 dias úteis e tendo como melhor caso 75 dias úteis em fornecimento com embarque marítimo.

Nesse cenário qualquer consumo inesperado pode significar atrasos em entrega para clientes, havendo ainda a possibilidade de penalidades financeiras em contrato para casos de parada de linha, prática muito comum em acordos de fornecimento para indústria automotiva.

Em grande parte dos produtos prontos a folha de alumínio representa cerca de 40% do custo total de manufatura e ainda que com giro de estoque satisfatório, as folhas de alumínio representaram em setembro/2007 77,2% do total de estoque da unidade de negócio conforme descrito na tabela 1 de classificação ABC de estoque.

Tabela 1 – Proporção de estoque de folhas de alumínio (em mil R\$)

Classificação ABC	Estoque de folhas	% do Total	Estoque total
A	1892	48.3%	3915
B	309	19.9%	1556
C	168	9.0%	1864

O valor de um mês de consumo desse grupo de materiais supera qualquer outro insumo, para ilustrar a magnitude do valor financeiro do consumo projetou-se , com base em informações de setembro/2007, o que seria o montante de consumo de folha de alumínio dessa unidade de negócio e esse atinge quase 84% do total do consumo de materiais.

Tabela 2 – Projeção de um mês de consumo de folhas de alumínio (em mil R\$)

Classificação ABC	Consumo de folhas	% do Total	Consumo Total
A	2411	54,2%	4452
B	176	21,1%	834
C	24	8,6%	278

Assim em função do valor unitário desses itens serem elevados, considerando o custo total de aquisição, qualquer ponto percentual reduzido no consumo ou perda em processo representa grande ganho econômico e operacional.

O aprimoramento tecnológico no planejamento e processamento desses materiais representa diferencial competitivo, pois o setor eletroeletrônico sofre concorrência de empresas asiáticas principalmente e especificamente no caso de manufatura de capacitores, essas fábricas têm custos de transporte mais baixo e tempos de reposição mais curtos devido a proximidade dos fornecedores.

O fato de problemas de corte de estoque serem comuns a vários tipos de indústria faz com que a realidade complexa da manufatura de componentes eletrônicos um importante campo de aplicação com possibilidade de extensão e adaptabilidade a outros processos industriais similares. Aliado ao aumento da capacidade de processamento de dados propiciado pelos recursos computacionais disponíveis na atualidade, abrem-se perspectivas de viabilidade na resolução de problemas de natureza combinatória outrora não praticáveis, propiciando assim a avaliação e validação de arcabouço teórico disponível e inestimável para o desenvolvimento das técnicas de gestão da produção.

4. QUESTÕES DE PESQUISA

As questões importantes quanto a operação de programação de corte de folhas de alumínio para atendimento da manufatura de capacitores eletrolíticos, são:

Como planejar a alocação do material levando em consideração seqüenciamento das secções do material e aproveitamento de área concomitantemente?

Qual a viabilidade de um modelo para apoio à decisão que leve em conta as características dinâmicas da demanda de corte combinadas às características dos insumos?

Como mensurar até que ponto as simplificações do processo decisorial oneram os custos de produção?

5. OBJETIVOS

Desenvolver um modelo que auxilie no planejamento da operação de corte de folhas de alumínio, atividade também denominada como programação da produção, visando minimizar os custos associados a esse tipo de manufatura com vistas à elevação dos padrões de eficiência dessas atividades.

Objetivos específicos:

- Identificar quais variáveis que são consideradas na análise e decisão de alocação de materiais no processo de programação de corte de folhas de alumínio;
- Mapear quais variáveis necessariamente devem ser consideradas na decisão de alocação de materiais no processo de corte;
- Identificar possíveis razões para não utilização das informações necessárias na decisão de alocação e programação;
- Desenvolver algoritmos computacionais capazes de maximizar o uso da área alocada no rolo de material, levando em consideração o comportamento dinâmico da demanda combinada com a qualificação do insumo;
- Avaliar e validar os modelos e algoritmos desenvolvidos;
- Demonstrar vantagens dos métodos desenvolvidos para o processo de manufatura de capacitores como um todo;
- Mensurar os ganhos de eficiência com a incorporação do modelo ao sistema de execução de manufatura (MES) ou ERP.
- Avaliar se decisões humanas são viáveis de substituição pelo modelo proposto, e ainda quais decisões podem ser mais acuradas se auxiliadas pelo mesmo.

6. MÉTODO DE PESQUISA

Esse trabalho se apoiará nos preceitos metodológicos da pesquisa operacional, por esse trabalho apresentar uma parte exploratória para diagnóstico e identificação de variáveis, fatores críticos e possíveis *tradeoffs* do processo de manufatura, a metodologia de PO apresenta-se como alternativa mais apropriada. Essa metodologia, como apresentado por Wagner (1986), divide-se basicamente em: (1) estudos exploratórios, na qual identifica-se e formula-se o problema de forma estruturada; (2) construção do modelo, fase em que se desenha-se solução via artifícios formais matemáticos ou não capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando as tecnologias apropriadas de apoio a decisão; (4) Validação do modelo, através de testes comparativos baseados em informações das decisões tomadas na forma não assistida pelo modelo proposto.

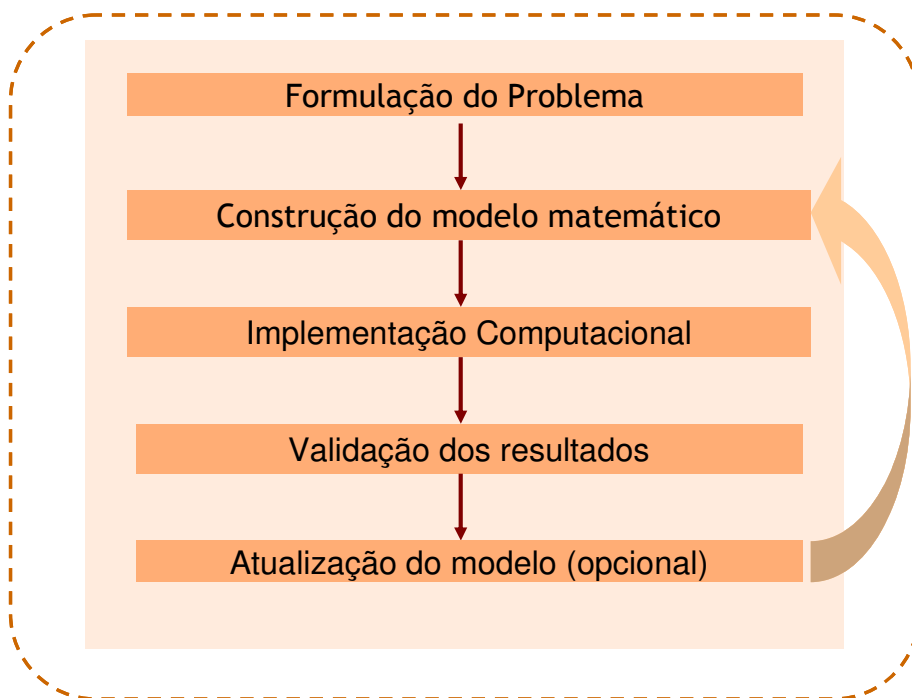


Figura 5 – Processo de análise quantitativa

6.1. Estudos exploratórios

A primeira etapa do trabalho que consiste em entrevistas e observações *in loco*, bem como, levantamento de dados do ERP e sistema de apoio a manufatura da empresa para definir precisamente o contexto tecnológico e econômico do processo de corte de folhas de alumínio. A coleta dessas informações servirá de base para identificação das variáveis estáticas, dinâmicas e definição dos parâmetros de avaliação de eficiência do processo, o conjunto desse diagnóstico formará a base de informações para proposição do modelo.

6.2. Construção do modelo

A partir da identificação dos objetivos, restrições, e situação problemática do processo de corte de folhas subsidiado por referenciais de estudos acadêmicos similares, se fará a modelagem do problema cruzando com as variáveis do cenário de aplicação com vistas a implementação computacional.

6.3. Implementação computacional

Na implementação computacional se fará uso das ferramentas de modelagem computacional para transposição do modelo matemático e seus algoritmos para serem trabalhados de forma mais interativa, o que será na verdade, uma prototipação de solução para o problema de corte de folhas de alumínio. Pois dessa forma já será viável aplicar alguns dados (entradas) e avaliar o comportamento do modelo frente a isso (saídas).

6.4. Validação do modelo

A validação do modelo tratará de aplicação dos dados de produção coletados em determinado período que reflitam com exatidão como foram as decisões de programação da produção em tempo. Essas mesmas informações de quantidades e características de demanda e de insumos será aplicada no modelo computacional e seus resultados serão comparados com as decisões convencionalmente

desempenhadas no período, daí se julgará se o modelo procedeu conforme as estimativas planejadas.

7. REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de corte de estoque e empacotamento ocorre em muitas indústrias conduzido por diferentes objetivos e sujeito a variadas restrições. As indústrias moveleiras, papel e celulose são os exemplos mais comuns de cenário desse tipo de problema, com casos de corte de formas regulares, mas ainda há aplicações mais sofisticadas de corte, tais como na indústria têxtil e coureiro calçadista onde há aplicações de cortes irregulares, bem como, objetos irregulares.

Define-se então, problema de corte e empacotamento como problema de otimização, com o objetivo obter arranjo de formas ou áreas menores (itens), com dimensões e quantidades especificadas, em uma região delimitada maior (objetos) da melhor maneira possível. O caso de corte de rolos de materiais, usualmente remete a forma mais clássica do problema de corte de estoque (Carvalho, 1998), que seria definir o uso do menor número de rolos de largura W que devem ser cortados para satisfazer a demanda de m clientes com b_i de rolos menores de largura w_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

Devido a grande variedade de aplicabilidade do arcabouço teórico em torno do problema de corte e empacotamento, para uma melhor organização e caracterização do assunto optou-se pela divisão dessa análise em duas etapas: na primeira tratamos do estudo da tipologia do corte e a segunda parte é dedicada às abordagens e técnicas de solução do problema.

7.1. Tipologia do corte de estoque

De acordo com o sistema de Dyckoff (Dyckoff, 1990) a definição da tipologia do corte passa pela identificação de quatro características relevantes definidas a seguir.

7.1.1. Dimensionalidade

É a característica mais relevante do problema de corte, pois consiste no número mínimo de dimensões reais consideradas para descrever a geometria do padrão de corte.

- Unidimensional, representa-se pelo número **1**, significa que apenas um das dimensões é relevante para o processo de corte. Problema comum no processo de corte de barras de aço, bobinas de papel, rolos de laminados em geral.
- Bidimensional, representa-se pelo número **2**, significa que duas das dimensões são consideradas no processo de corte. Exemplificando, sendo as dimensões largura e comprimento, o padrão bidimensional é gerado pela combinação geométrica dos itens ao longo do comprimento e largura dos objetos. Esse processo é bastante comum na indústria moveleira no processo de corte de chapas de MDF, por exemplo.
- Tridimensional, representa-se pelo número **3**, quando uma terceira dimensão é relevante, por exemplo, no caso de alocação de espaço em containeres, onde a altura do compartimento também é relevante (Morabito, 1992).
- Multidimensional, representa-se por **N**, onde $N > 3$.

Segundo Dyckoff a dimensionalidade é influenciada pela relevância da forma dos itens em relação aos objetos e os padrões, podendo ser dimensão espacial ou não, por exemplo: tempo.

7.1.2. Atribuição ou seleção

Característica que relaciona a seleção dos itens segundo as restrições associadas aos objetos, tendo duas possibilidades.

Todos os objetos e uma seleção de itens, representa-se pela letra B, assim a quantidade de objetos disponíveis em estoque não são suficientes para atender a demanda de itens, por conseguinte, alguns itens são selecionados, por exemplo: alocação de cargas em paletes.

Uma seleção de objetos e todos os itens, o que significa que a quantidade de objetos existentes em estoque é suficiente para atender os itens de demanda, por conseguinte, alguns objetos são selecionados. Esse caso representa-se pela letra V

7.1.3. Sortimento de objetos

Define características de variabilidade de forma e tamanho dos objetos

- (O) Objeto único
- (I) Figura idêntica
- (D) Figura diferente

7.1.4. Sortimento de itens

Define características de forma e variabilidade dos itens.

- (F) Poucos itens de tamanhos diferentes
- (M) Muitos itens de muitos tamanhos diferentes
- (R) Muitos itens de poucos tamanhos diferentes
- (C) Itens de tamanhos iguais

Quadro 1 – Resumo de características da tipologia de Dyckoff

Característica	Domínio
Dimensionalidade	(1), (2), (3), (N)
Atribuição ou seleção	(B), (V)
Sortimento de objetos	(O), (I), (D)
Sortimento de itens	(F), (M), (R), (C)

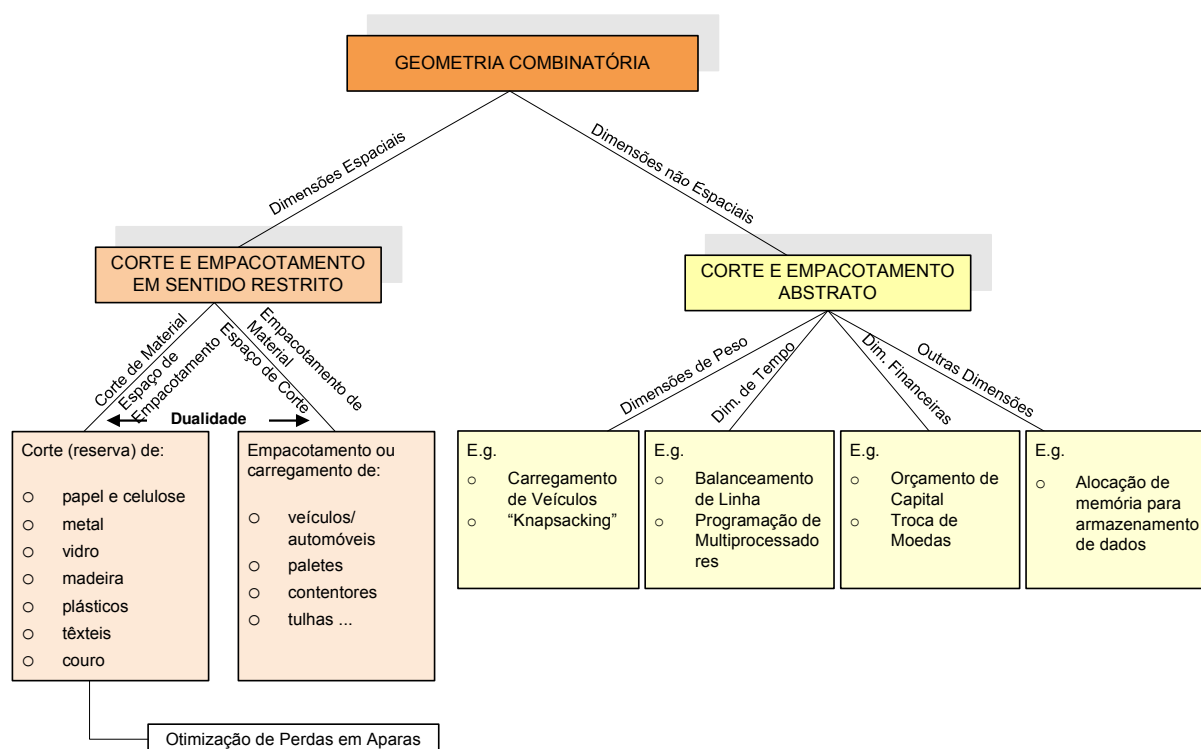


Figura 6 – Fenomenologia de problemas de corte e empacotamento (Dyckoff, 1990)

7.1.5. Padrões de corte unidimensionais

Define-se como corte unidimensional quando apenas uma das dimensões é relevante no processo de corte. Este problema ocorre, por exemplo, no corte de barras de aço, bobinas de papel, etc. Na Figura 7 ilustra-se exemplos de padrões de corte para o caso unidimensional, onde os objetos, nesse caso rolos de material em estoque possuem largura L e serão cortados para atender a demanda dos itens de larguras menores l_i , $i=1,\dots,M$.

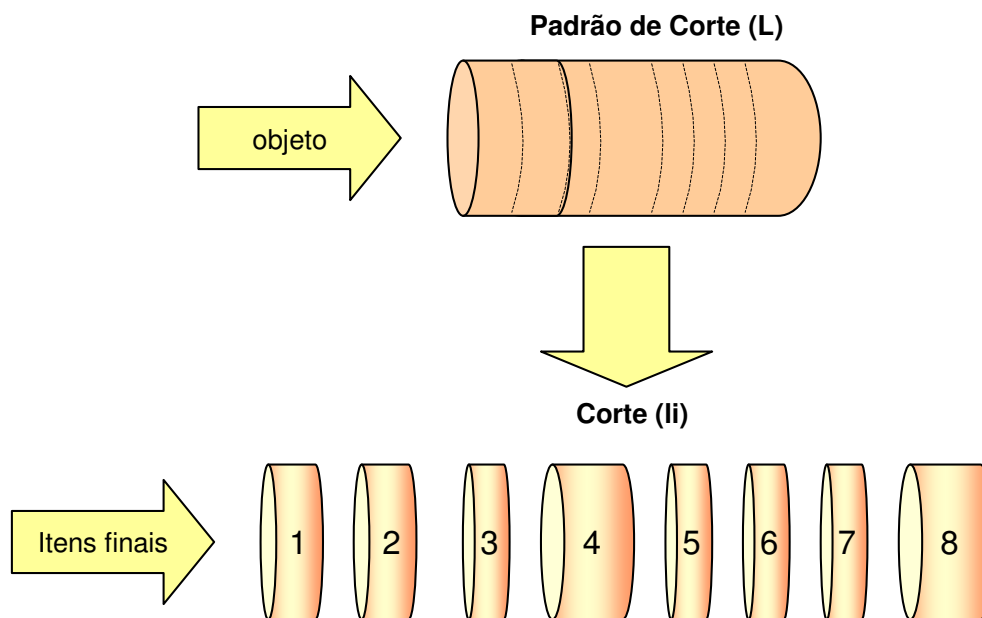


Figura 7 – Padrão de corte unidimensional

Dependendo do processo de corte ao que o objeto é submetido esse corte pode ser estagiado ou compartimentado conforme descrito na figura 8.

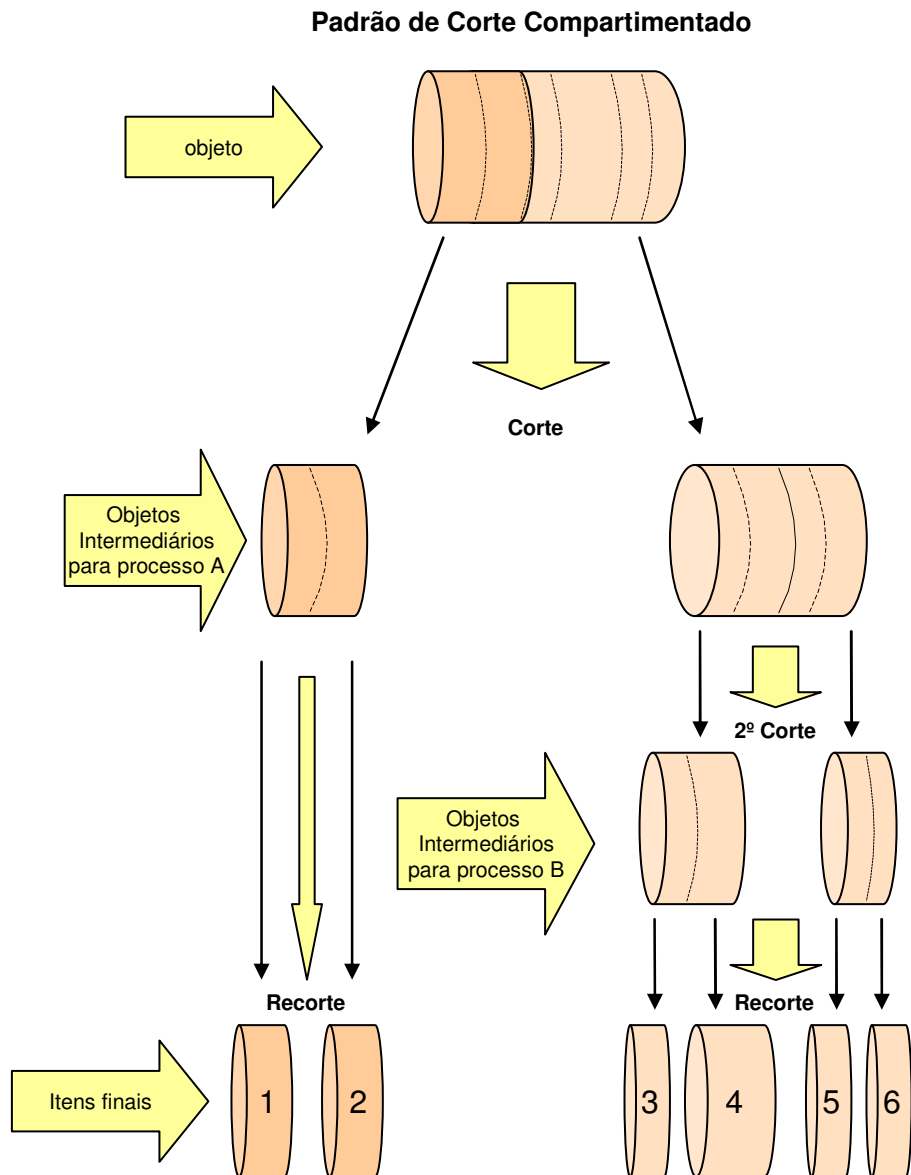


Figura 8 – Padrão de corte unidimensional compartimentado

7.1.6. Padrões de corte bidimensionais

Define-se como corte bidimensional quando duas dimensões, por exemplo, comprimento e largura, são relevantes no processo de corte. Neste caso, gerar um padrão bidimensional consiste em combinar geometricamente os itens ao longo do comprimento e da largura dos objetos. Este tipo de problema é freqüente em indústrias moveleiras. Um padrão de corte para o caso bidimensional é ilustrado na figura 9, onde os objetos em estoque possuem largura L e comprimento C e devem ser cortados para atender a demanda de itens com largura l_i e comprimento c_i , $i=1,\dots,M$.

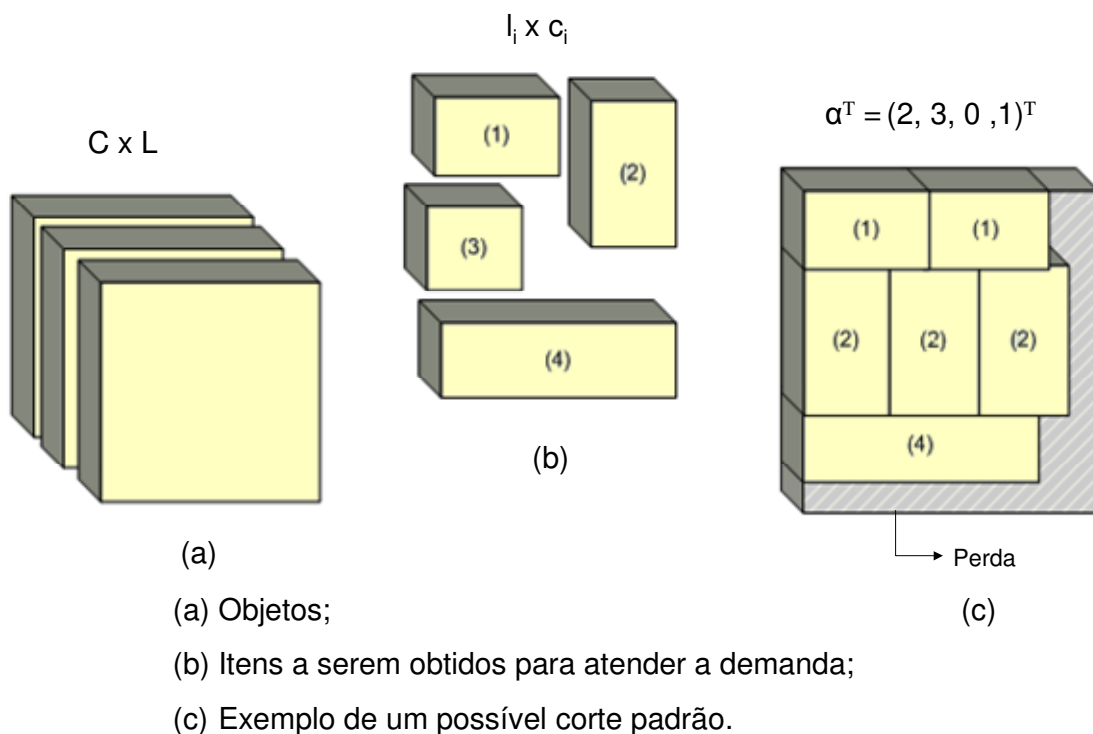
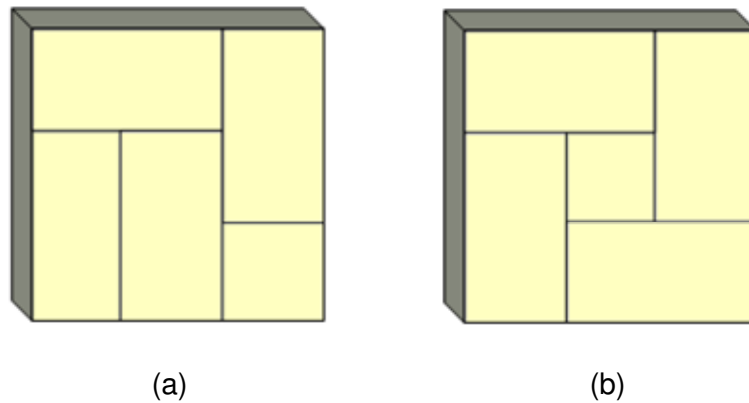


Figura 9 – Padrão de corte bidimensional

No exemplo da figura 9 o vetor α constitui um padrão possível para atender a demanda de corte. O valor 2 significa que o primeiro item terá duas unidades produzidas, o valor 3 significa que o segundo item terá três unidades produzidas, o zero na terceira posição significa que o terceiro item não será produzido nesse padrão e por o quarto item será produzido uma única vez.

7.1.7. Corte guilhotinado e não-guilhotinado

Um padrão de corte é definido como guilhotinado quando for possível um corte de um lado a outro do objeto com o objetivo de produzir os itens demandados, os casos em que não for possível são denominados não-guilhotinados.



(a) Corte guilhotinado; (b) Corte não-guilhotinado.

Figura 10 – Padrões de corte bidimensionais guilhotinados e não-guilhotinados

Um corte bidimensional também pode ser feito em várias etapas, usualmente alternando direção do corte sobre o objeto ou sobre partes dele. Etapas sucessivas, no caso de cortes ortogonais, geram peças ortogonais ao corte produzido na etapa antecessora. Caso o número de estágios seja limitado a k , o corte guilhotinado é classificado como k -estagiado (Morabito e Arenales, 1996).

7.2. Considerações sobre métodos de solução

Muitos estudos e artigos têm sido escritos na área de pesquisa operacional tratando do problema de corte, conforme mostra os exames feitos na literatura desse assunto (Sweeney e Paternoster, 1992), várias abordagens de solução têm surgido e nesse estudo dividiremos em dois grandes grupos: o primeiro de soluções exatas baseados em programação linear e outro de métodos de aproximação baseado em heurísticas e métodos híbridos.

7.2.1. Abordagens baseadas em programação linear

Os estudos mais referenciados nessa abordagem são os artigos de Gilmore e Gomory (1961, 1963). Os autores propõem a solução do problema de corte unidimensional em dois estágios, assim reduz-se a quantidade de padrões de corte gerados para obtenção da solução. A estratégia é resolver o problema principal contendo um número limitado de padrões, depois passa-se os “dual prices” gerados para um problema menor tipo knapsack que vai selecionar o padrão de corte que maximiza a solução. Esse novo padrão selecionado é anexado ao problema principal que é novamente submetido a uma nova solução recursivamente. Essa abordagem de, em cada interação, anexar mais colunas de corte à solução é denominado como geração de colunas. O grande mérito dessa estratégia de solução é a redução drástica de passos para atingir a solução ótima, por conseguinte, apresenta uma redução também significativa de tempo e recurso computacional. O artifício de abordar o problema em dois estágios distintos em soluções exatas foi adotado em vários estudos posteriores conciliados com outras técnicas tais como branch-and-bound (Carvalho, 1998), programação dinâmica com knapsack (Hifi e Zissimopoulos, 1996) e ainda soluções exatas usando branch-and-bound para corte e empacotamento bidimensional (Martello e Vigo, 1998).

7.2.2. Abordagem por Métodos heurísticos

Mesmo com o aperfeiçoamento dos métodos de solução exata baseados em programação linear, muitos estudos sustentam que são factíveis para um número

muito limitado de aplicações em função da expansão exponencial do espaço de busca. Logo de acordo com esses estudos, problemas de corte, assim definidos NP-difíceis seriam melhor suportados por métodos heurísticos, ou seja, soluções de aproximação.

Nos problemas de corte, heurísticas são utilizadas principalmente em problemas bidimensionais, em especial em casos em que a posição do item seja relevante, de forma que sendo movido ou rotacionado seja possível o melhor aproveitamento do objeto (Burke et al., 2004).

Então um objetivo importante na otimização do corte é a etapa de seleção e alocação de itens na área disponível no objeto de forma a obter o melhor aproveitamento possível. Nesse intuito surgem dois tipos básicos de heurísticas: dedicadas a seleção de itens e outro grupo dedicado a atribuição dos itens aos objetos.

Heurísticas de seleção:

Next Fit (NF): usa o objeto atual para atribuir a próxima peça, ou então abre um novo objeto e atribui a peça a ele.

First Fit (FF): considera os objetos abertos em ordem crescente e atribui o item ao primeiro da lista em que este servir.

Best Fit (BF): atribui ao item no objeto aberto em que este melhor se adeque, com mínimo de perda.

Worst Fit (WF): atribui o item ao objeto aberto onde o aproveitamento seja o menor possível.

Almost Worst Fit (AWF): atribui o item ao objeto aberto com o segundo pior aproveitamento.

First Fit Decreasing (FFD): ordena as peças em ordem decrescente e atribui a peça maior de acordo com FF.

Next Fit Decreasing (NFD): ordena as peças em ordem decrescente e a peça maior é atribuída de acordo com NF.

Das heurísticas de alocação as mais freqüentemente usadas pertencem a categoria de técnicas de deslizamento, em especial do tipo “bottom-left” . Essas heurísticas deslizam a peça partindo da região superior do objeto em direção a região inferior ate que o mesmo atinja uma posição satisfatória para alocação.

7.2.3. Métodos híbridos de solução

Estudos mais recentes dos problemas de otimização, em especial problemas de corte e empacotamento, vêm fazendo emergir com grande força abordagens que utilizam algoritmos genéticos, algoritmos evolutivos e redes neurais combinados com heurísticas mais tradicionais. Isso em muito motivado pelo custo computacional das soluções em programação linear e a possibilidade de heurísticas com soluções longe do ótimo possível ou desejado.

Nesse caso também temos a abordagem em dois estágios nesse caso, por exemplo, pode-se usar um algoritmo genético para determinar a melhor seqüência em que os itens serão alocados ao objeto e na segunda etapa da solução aplicar heurísticas para determinar como será feita a alocação sobre a área do objeto. Muitos estudos têm demonstrado que a combinação desses métodos tem gerado soluções de corte com melhor aproveitamento. Outra vantagem seria a possibilidade de soluções mais flexíveis, pois os métodos heurísticos propiciam respostas a problemas muito específicos apenas, na abordagem híbrida é possível uma solução. Uma possibilidade seria, implementar uma solução para cortes de formas distintas, regulares e irregulares, sob o mesmo objetivo de minimizar perdas no corte, isso é possível combinando, por exemplo, ressonância adaptativa das redes neurais com heurísticas de deslizamento (Poshyanonda e Dagli, 2004). Ou ainda utilizando métodos evolutivos, muito utilizados também em problemas para encontrar o melhor caminho, podem ser aplicados para encontrar um conjunto de padrões de corte e empacotamento de menor custo (Levine e Ducatelle, 2004).

8. MODELAGEM DA SOLUÇÃO

8.1. Variáveis para modelagem

Quando trata-se de problema de corte em duas dimensões é essencial trabalhar com a medida de área, no caso metros quadrados, para avaliar a alocação e definir a função objetivo. Sendo assim sempre se considerará a largura e comprimento para composição da alocação, tanto para demanda de corte como para o rolo (objeto) a ser seccionado.

Para determinar as variáveis relevantes no processo foi acompanhamento de alguns casos reais feitos por operadores e programadores da produção na própria fábrica. Nessas análises ficou evidente que o operador seleciona lotes com base em características técnicas de uma demanda que está para ser produzida, daí o sistema de execução da manufatura seleciona rolos compatíveis e indica que há outras demandas compatíveis e nesse caso também são atribuídas ao rolo de material para definição de um programa de corte de material. A análise qualitativa para determinação de rolos (lotes) compatíveis é muito bem assistida por sistema de informação e execução da manufatura, porém a análise da combinatória de vários rolos (lotes) versus várias demandas para determinar o programa de corte mais eficiente em termos de quantidades melhor ajustadas às necessidades da produção de capacitores não é feita em nenhum momento. A idéia fortemente presente é que não pode faltar material na linha de produção capacitores e o estoque excedente gerado em linha de produção não é analisado.

A segunda etapa do processo foi extrair dados de ordens de produção do ERP da empresa para compor não só a decisão de programação de corte, mas também o uso do material em ordens de produção de capacitores. Na decisão de programação levantou-se pelos identificadores de lotes nas ordens de produção de corte quais e como determinados rolos foram cortados. Nas ordens de produção de capacitores levantado qual lote de material cortado atendeu a ordem e em quais quantidades. Assim foi possível compor a cadeia de decisão no sistema o foi usado como base de informação para seleção de variáveis e proposição de uma função custo para o processo.

A definição da função objetivo tanto para abordagem por programação linear como para proposição de método heurístico foi pautada no fato de não ser possível gerar cortes em múltiplo exato da quantidade demandada, pois não é possível seccionar o rolo em mais de uma dimensão tal como é possível para alguns materiais. Essa quantidade excedente não é computada como quebra do processo de corte porque foi adequadamente produzido. O lote material, por ser caro e perecível, é utilizado totalmente no processo de bobinagem dos capacitores gerando um excedente de peças para estoque. A tabela a seguir, a partir de dados reais, denota a situação hipotética da possibilidade de um lote ideal com quantidade exata para produção, esse ainda não mensurado em m2 e sim em rolos de material conforme o lote de origem, ou seja, a quantidade de rolos R_i necessária para atender a demanda D_i .

Tabela 3 – Lote exato (em rolos)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	3.717	14.074	7.074	18.213	18.327	14.671	38.089	16.197	66.806
R2	3.839	14.536	7.306	18.811	18.928	15.152	39.339	16.728	69.000
R3	3.681	13.937	7.005	18.036	18.149	14.529	37.720	16.040	66.159
R4	3.938	14.912	7.495	19.298	19.419	15.545	40.359	17.162	70.787
R5	3.969	15.029	7.554	19.449	19.571	15.667	40.675	17.296	71.342
R6	3.503	13.263	6.666	17.164	17.271	13.826	35.895	15.264	62.958
R7	3.241	12.273	6.169	15.883	15.982	12.794	33.216	14.125	58.260
R8	4.952	18.749	9.424	24.264	24.416	19.545	50.744	21.578	89.003

A quantidade demandada é gerada pelo simples razão entre comprimento da necessidade de produção (demanda) e o comprimento do rolo selecionado conforme demonstrado nas tabelas a seguir.

Tabela 4 – Demanda de corte de folhas

Demanda	Qtd. Área (m2)	Largura (mm)	Comprimento Linear (m)
D1	24.322	16	1520.1
D2	69.073	12	5756.1
D3	34.717	12	2893.1
D4	89.388	12	7449.0
D5	44.974	6	7495.7
D6	36.002	6	6000.3
D7	249.255	16	15578.4
D8	59.620	9	6624.4
D9	163.943	6	27323.8

Tabela 5 – Rolos de materiais (alumínio)

Rolos Material	Largura (mm)	Comprimento (m)	Área (m2)
R1	483	409	197.547
R2	486	396	192.456
R3	488	413	201.544
R4	483	386	186.438
R5	487	383	186.521
R6	483	434	209.622
R7	484	469	226.996
R8	488	307	149.816

A partir da fração adicionada para arredondamento da quantidade do rolo cortado, pela simples multiplicação dela pela área resultante de cada rolo cortado calcula-se a quantidade de entrega excedente em área (m²) que será a quantidade que deve ser proposta a minimização.

Tabela 6 – Excesso de fornecimento (em m²)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	1.854	4.547	4.547	3.864	1.652	0.808	5.961	2.957	0.475
R2	1.022	2.207	3.299	0.900	0.170	2.014	4.185	0.968	0.001
R3	2.110	0.311	4.931	4.776	2.108	1.168	1.849	3.569	2.083
R4	0.382	0.407	2.339	3.252	1.346	1.054	3.961	2.912	0.493
R5	0.190	4.463	2.051	2.532	0.986	0.766	1.993	2.426	1.513
R6	3.454	3.839	1.739	4.356	1.898	0.454	0.729	2.876	0.109
R7	5.694	4.091	4.679	0.660	0.050	0.580	5.881	3.695	2.083
R8	0.238	0.923	2.123	2.712	1.076	0.838	1.257	1.166	1.837

8.2. Resolução por programação linear

O problema de corte de folhas de alumínio não se adequa a resolução como problema de atribuição pela possibilidade de um rolo ser cortado para várias demandas e vice-versa. Como não há padrões de corte estabelecidos a geração e seleção de padrões de corte não poderiam contribuir para minimizar os estoques. Sendo assim optou pela resolução como se fosse um problema de transporte. Cada rolo seria um ponto de suprimento e as necessidades de corte os pontos de demanda. A atribuição de uma necessidade de corte ao rolo seria análoga ao transporte de uma carga a um ponto de abastecimento, tendo assim seu custo vinculado, pois será dado pela tabela 4 do fornecimento em excesso. O efeito da aplicação desses métodos matemáticos de otimização sobre o conjunto de dados é descrito na tabela abaixo.

Tabela 7 – Aplicação de programação linear

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	0	28.513	163.94
R3	0	69.073	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5	24.322	0	34.717	0	0	0	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	0	209.62	0	0
R7	0	0	0	89.388	44.974	36.002	0	0	0
R8	0	0	0	0	0	0	39.633	31.107	0
Demanda									
Atendido	24.322	69.073	34.717	89.388	44.974	36.002	249.26	59.62	163.94
Custo (m2)	0.190	0.311	2.051	0.660	0.050	0.580	0.729	0.968	0.001

Utilizando programação linear, conforme descrito na tabela 5, a demanda foi plenamente atendida e as respectivas quantidades de fornecimento excedente estão descritas na linha “Custo (m2)”. O resultado geral para a produção de 771.294 m² de folha cortada o excedente é de 5.35 m², ou seja, apenas 0.694% do total produzido. Nos casos das colunas D7 e D8 em que a demanda foi atendida por mais de um lote, assume-se o custo de excesso de apenas um lote, pois um deles é 100% necessário porque o fornecimento é formado pela soma dos dois lotes.

8.3. Método heurístico

Ainda que não seja freqüente, existe a possibilidade de mesmo considerando a medida em área na alocação da necessidade ao rolo, haja a determinação do corte de um segmento do rolo pelo problema de transporte que não comporte a largura solicitada. São casos em que o comprimento do material compensa a largura insuficiente do material, aí nesse caso o corte do material não atenderia. Para fazer frente a essa possibilidade propõem-se um método heurístico que se baseia na classificação de relevância da alocação e analisa caso a caso a alocação do rolo antes de propor o corte.

Tabela 8 – Perda / excesso de material classificada

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	1.854	4.547	4.547	3.864	1.652	0.808	5.961	2.957	0.475
R2	1.022	2.207	3.299	0.900	0.170	2.014	4.185	0.968	0.001
R3	2.110	0.311	4.931	4.776	2.108	1.168	1.849	3.569	2.083
R4	0.382	0.407	2.339	3.252	1.346	1.054	3.961	2.912	0.493
R5	0.190	4.463	2.051	2.532	0.986	0.766	1.993	2.426	1.513
R6	3.454	3.839	1.739	4.356	1.898	0.454	0.729	2.876	0.109
R7	5.694	4.091	4.679	0.660	0.050	0.580	5.881	3.695	2.083
R8	0.238	0.923	2.123	2.712	1.076	0.838	1.257	1.166	1.837
Menor Perda	0.190	0.311	1.739	0.660	0.050	0.454	0.729	0.968	0.001
Maior Perda	5.694	4.547	4.931	4.776	2.108	2.014	5.961	3.695	2.083
% Total	15.90%	12.70%	13.77%	13.34%	5.89%	5.62%	16.65%	10.32%	5.82%
Ordem	2	5	3	4	7	9	1	6	8

Nesse caso a decisão de atribuição é priorizada iniciando-se pela demanda mais representativa de acordo com a classificação e escolhe-se o melhor rolo para ela, ou seja, prioriza-se a melhor decisão para a relação $D_i \times R_i$ que tiver o maior impacto na hipótese de ocorrer a pior escolha, na tabela 6 seria a alocação dada por D7 R1. Se ainda restar saldo pendente na demanda o sistema procura o próximo melhor caso para D_i na mesma coluna. Se zerar o saldo demandado, mas o rolo ainda comportar alocações o sistema por um melhor caso de alocação para R_i na linha atual, se não encontrar inicia pesquisa pela classificação inversa de relevância para determinar a coluna D_i . O objetivo é buscar a alocação 100% do rolo para corte adicionando demandas que representem menor impacto de entrega em excesso em seu grupo de decisão.

Os resultados da aplicação dessa heurística sobre o conjunto de dados são descrito na tabela a seguir, onde para a produção de 771.294 m² de folha cortada o excedente é de 10.67 m², ou seja, 1.383% do total produzido.

Tabela 9 – Aplicação de método heurístico

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	69.073	0	56.509	0	0	0	29.128	37.746
R3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5	24.322	0	0	0	0	36.002	0	0	126.2
R6	0	0	0	0	0	0	209.62	0	0
R7	0	0	0	32.879	0	0	0	0	0
R8	0	0	34.717	0	44.974	0	39.633	30.492	0
	Demanda								
Atendido	24.322	69.073	34.717	89.388	44.974	36.002	249.26	59.62	163.94
Custo (m2)	0.190	2.207	2.123	0.900	1.076	0.766	0.729	1.166	1.513

8.4. Decisão desempenhada pelo operador

A decisão que foi mapeada a partir de informações do ERP da empresa é descrita na tabela abaixo.

Tabela 10 – Decisão do operador

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R1	0	0	0	0	22.434	36.002	0	0	0
R2	24.322	69.073	34.717	0	0	0	0	0	0
R3	0		0	0	0	0	201.54	0	0
R4	0	0	0	0	22.54	0	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0	0	163.94
R6	0	0	0	0	0	0	0	59.62	0
R7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R8	0	0	0	89.388	0	0	47.711	0	0
	Demanda								
Atendido	24.322	69.073	34.717	89.388	44.974	36.002	249.26	59.62	163.94
Custo (m2)	1.022	2.207	3.299	2.712	1.346	0.808	1.849	2.876	1.513

Na tabela 8, da decisão do operador, verifica-se que para a mesma quantidade programada para corte o excedente foi da ordem de 17.632 m², ou seja, 2.286% do total produzido de 771.294 m².

8.5. Resultados comparativos dos métodos aplicados

A tabela 9 demonstra comparativamente os métodos aplicados, onde na coluna “Alocado” temos o que foi alocado da capacidade do rolo, coluna “Capac.”, para demanda de corte. A coluna estoque descreve a quantidade retornada para estoque quando o rolo não é totalmente cortado ou o que seria gerado de corte para estoque caso fosse decidido cortar 100% do rolo, para minimizar tempos de preparação de máquina (setup), mesmo sem ter demanda assegurada.

Tabela 11 – Tabela comparativa de métodos de decisão

Operador			Heurística			Programação Linear		
Alocado	Capac.	Estoque	Alocado	Capac.	Estoque	Alocado	Capac.	Estoque
58.436	197.547	139.111	0	197.547	0	0	197.547	0
128.112	192.456	64.344	192.456	192.456	0	192.456	192.456	0
201.544	201.544	0	0	201.544	0	69.073	201.544	132.471
22.54	186.438	163.898	0	186.438	0	0	186.438	0
163.943	186.521	22.578	186.521	186.521	0	59.039	186.521	127.482
59.62	209.622	150.002	209.622	209.622	0	209.622	209.622	0
0	226.996	0	32.879	226.996	194.117	170.364	226.996	56.632
137.099	149.816	12.717	149.816	149.816	0	70.74	149.816	79.076
771.294	1550.94	552.65	771.294	1550.94	194.117	771.294	1550.94	395.661

Verificamos então que a decisão do operador é a que gera mais estoque, justamente por tentar minimizar setups no processo de corte, também é o método de maior fornecimento de material em excesso, pois essa variável não é considerada em sua decisão de alocação.

O método heurístico apresenta melhoria substancial em relação ao método do operador, tanto no fornecimento de material em excesso quanto na quantidade de material gerado para estoque. Ao passo que o método de programação linear é muito superior aos anteriores quanto ao fornecimento de material em excesso, não é tão eficiente quanto à geração secundária de estoque quanto o método heurístico,

conforme é descrito nos resultados da tabela 10 o percentual de estoque gerado a partir do que foi produzido, nesse caso 771.294 m2.

Tabela 12 – Comparativo de geração de estoques

	Operador	Heurística	Programação Linear
Forn. Excesso (m2)	17.632	10.670	5.350
Forn. Excesso (%)	2.286%	1.383%	0.694%
Estoque	552.650	194.117	395.661
Estoque (%)	71.65%	25.17%	51.30%

Cabe salientar que o estoque gerado sem vinculação a nenhuma demanda é posteriormente aproveitado em demandas futuras, inclusive o processo de MRP contempla esse aproveitamento, mas como o estoque é prematuramente gerado deve ser mencionado como efeito indesejado do processo.

9. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

9.1. implementação computacional

O conjunto de dados foi validado utilizando um conjunto de instruções para o software LINGO, o qual pode ser montado dinamicamente via uma linguagem de programação e ser submetido em forma de um *script* ao programa de otimização via bibliotecas de aplicação do sistema LINDO conforme código fonte em Visual Basic 6.0 descrito no anexo A.

```
MODEL:
SETS:
ROLOS/R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8/:CAP;
ORDENS/D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8,D9,DX/:DEM;
LINKS(ROLOS,ORDENS):CUSTO,ALOC;
ENDSETS
MIN=@SUM(LINKS:CUSTO*ALOC);
@FOR(ORDENS(J):
@SUM(ROLOS(I):ALOC(I,J))>DEM(J));
@FOR(ROLOS(I):
@SUM(ORDENS(J):ALOC(I,J))<CAP(I));
DATA:
CAP=197.547,192.456,201.544,186.438,186.521,209.622,226.996,149.816;
DEM=24.322,69.073,34.717,89.388,44.974,36.002,249.255,59.62,163.943,
779.646;
CUSTO=1.854,4.547,4.547,3.864,1.652,0.808,5.961,2.957,0.475,0,
1.022,2.207,3.299,0.900,0.170,2.014,4.185,0.968,0.001,0,
2.110,0.311,4.931,4.776,2.108,1.168,1.849,3.569,2.083,0,
0.382,0.407,2.339,3.252,1.346,1.054,3.961,2.912,0.493,0,
0.190,4.463,2.051,2.532,0.986,0.766,1.993,2.426,1.513,0,
3.454,3.839,1.739,4.356,1.898,0.454,0.729,2.876,0.109,0,
5.694,4.091,4.679,0.660,0.050,0.580,5.881,3.695,2.083,0,
0.238,0.923,2.123,2.712,1.076,0.838,1.257,1.166,1.837,0;
ENDDATA
END
```

Figura 11 – Exemplo de script para software LINGO

Note-se que em função do problema ter sido modelado baseado em um algoritmo de problema de transporte é necessário que a demanda e a capacidade estejam balanceadas e isso em casos reais dificilmente acontecerá. No exemplo em questão foi criada uma demanda denominada Dx que recebe a quantidade de 779.646 m2 porque a área de material disponível é maior (capacidade dos rolos) é maior que a demanda.

10. CONCLUSÃO

Baseado nas análises feitas sobre as decisões tomadas na programação de corte de folhas de alumínio, verifica-se que a aplicação de modelos de otimização razoavelmente simples são plenamente viáveis. Ainda, constata-se a oportunidade de redução de quase 2% no fornecimento de material em excesso no lote cortado com a aplicação de programação linear e cerca de 1% na aplicação de heurísticas. Em termos de proporção, embora represente um número pequeno, cada ponto percentual reduzido no consumo de folhas de alumínio pode representar a economia de R\$ 80.000,00 mensais em estoques, some-se a isso o agravante de que a produção excedente em produto pronto geraria um estoque ainda maior em termos financeiros

Embora o método heurístico tenha demonstrado ser menos eficiente quanto a minimização dos custos do corte de folhas, foi o modelo que melhor aproveitamento da alocação do rolo jumbo demonstrou, ou seja, seria uma excelente alternativa para o caso da capacidade de corte, pois atualmente é um gargalo no processo de manufatura de capacitores.

Ainda comparando as duas abordagens, programação linear e heurística, recomenda-se a aplicação conjunta desses métodos, assim a heurística seria aplicada quando a solução apresentada pela programação linear supera-se a capacidade da largura do rolo, o teste seria simples e garantiria uma solução muito superior ao que um operador possa desempenhar. Assim com essas recomendações estaria suprida uma importante lacuna de análise na decisão de programação da produção de folhas de alumínio.

11. ANEXOS

11.1. Anexo A – Otimizador em MS VB 6.0 e LINDO

```
VERSION 1.0
Public Function SolveLPCut(ByVal varCapRolos As Variant, _
                          ByVal varDemanda As Variant, _
                          ByVal varMatrizCusto As Variant) As Variant

    ' varCapRolos = vetor com capacidades em area (m2) dos rolos de folhas
    ' varDemanda   = vetor com a demanda de folhas de aluminio, quantidades em m2
    ' varMatrizCusto = matriz com o custo de cada atribuição rolo x demanda

    On Error GoTo ErrorHandler

    Dim ErrMsg As String
    Dim strLingoScript As String
    Dim strCmdModelo As String
    Dim pLINGO As Long
    Dim nPointersNow As Long
    Dim strDEM As String
    Dim strDemanda As String
    Dim strCAP As String
    Dim strCapRolos As String
    Dim strMatrizCusto As String
    Dim dblSolucao() As Double
    Dim dblStatusLng As Double
    Dim intLoop As Integer
    Dim intLoop2 As Integer

    ' Verificar parâmetros
    ErrMsg = ""
    If Not IsArray(varCapRolos) Then
        ErrMsg = "varCapRolos: Deve ser um vetor com a area disponivel dos rolos" &
vbCrLf
    End If
    If Not IsArray(varDemanda) Then
        ErrMsg = ErrMsg & "varDemanda: Deve ser um vetor com a necessidade de
producao de corte em m2" & vbCrLf
    End If
    If Not IsArray(varMatrizCusto) Then
        ErrMsg = ErrMsg & "varMatrizCusto: Deve ser uma matriz com as qtdes de
rolos por largura em cada padrão" & vbCrLf
    End If
    If ErrMsg <> "" Then
        GoTo ErrorHandler
    End If

    'Monta parte fixa do script do modelo
    strCmdModelo = "LINKS(ROLOS,ORDENS):CUSTO,ALOC;" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "ENDSETS" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "MIN=@SUM(LINKS:CUSTO*ALOC);" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "@FOR(ORDENS(J):" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "@SUM(ROLOS(I):ALOC(I,J))>DEM(J));" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "@FOR(ROLOS(I):" & Chr(10)
    strCmdModelo = strCmdModelo & "@SUM(ORDENS(J):ALOC(I,J))<CAP(I));" & Chr(10)

    ' Carrega vetor de rolos de area dos rolos de material disponiveis
    ' montando o trecho de script LINGO correspondente
    strCAP = "ROLOS/"
    strCapRolos = "CAP="
    For intLoop = 0 To UBound(varCapRolos)
        strCAP = strCAP & "R" & intLoop
```

```

        strCapRolos = strCapRolos & Trim(CStr(varCapRolos(intLoop)))
        If intLoop < UBound(varCapRolos) Then 'controla separacao por virgula
            strCAP = strCAP & ","
            strCapRolos = strCapRolos & ","
        End If

    Next
    strCAP = strCAP & "[:CAP;" & Chr(10)
    strCapRolos = strCapRolos & ";" & Chr(10)

    strDEM = "ORDENS/"
    strDemanda = "DEM="
    For intLoop = 0 To UBound(varDemanda)
        strDEM = strDEM & "R" & intLoop
        strDemanda = strDemanda & Trim(CStr(varDemanda(intLoop)))
        If intLoop < UBound(varDemanda) Then 'controla separacao por virgula
            strDEM = strDEM & ","
            strDemanda = strDemanda & ","
        End If
    Next
    strDEM = strDEM & "[:DEM;" & Chr(10)
    strDemanda = strDemanda & ";" & Chr(10)

    For intLoop = 0 To (UBound(varMatrizCusto, 1) - 1)
        ' Carrega matriz de custo
        For intLoop2 = 0 To UBound(varMatrizCusto, 2)
            strMatrizCusto = strMatrizCusto & varMatrizCusto(intLoop, intLoop2)
            If intLoop2 < UBound(varMatrizCusto, 2) _
                Or intLoop < (UBound(varMatrizCusto, 1) - 1) Then
                strMatrizCusto = strMatrizCusto & ","
            End If
        Next
        strMatrizCusto = strMatrizCusto & Chr(10)
    Next
    strMatrizCusto = strMatrizCusto & "; ! Fim matriz de corte NRP ;" & Chr(10)

    ' Cria o objeto de ambiente do LINGO
    pLINGO = LScreateEnvLng()
    If pLINGO = 0 Then
        ErrMsg = "Não foi possível criar o objeto de ambiente LINGO"
        GoTo ErrorHandler
    End If

    ' Montagem final do script para execução no LINGO
    strLingoScript = "MODEL:" & Chr(10) & "SETS:" & Chr(10) & _
        strCAP & _
        strDEM & _
        strCmdModelo & "DATA: " & Chr(10) & _
        strCapRolos & _
        strDemanda & _
        "CUSTO=" & strMatrizCusto & _
        "ENDDATA " & Chr(10) & "END" & Chr(10)

    ' Resolve o modelo
    strLingoScript = strLingoScript & "GO" & Chr(10)

    ' Fecha a DLL LINGO
    strLingoScript = strLingoScript & "QUIT" & Chr(10)

    ' Mark end of script with a null byte
    strLingoScript = strLingoScript & Chr(0)

    ' @POINTER(1)
    LngError = LSsetPointerLng(pLINGO, dblSolucao(1), nPointersNow)
    If LngError <> 0 Then GoTo ErrorHandler

    ' @POINTER(2)

```

```

LngError = LSsetPointerLng(pLINGO, dblStatusLng, nPointersNow)
If LngError <> 0 Then GoTo ErrorHandler

' Run the script
dblStatusLng = -1#
LngError = LSexecuteScriptLng(pLINGO, strLingoScript)

' Problemas?
If LngError <> 0 Or _
    dblStatusLng <> LS_STATUS_GLOBAL_LNG Then
    ErrMsg = "Não foi possível resolver o modelo!"
    ' Fecha ambiente LINGO
    LSdeleteEnvLng (pLINGO)
    GoTo ErrorHandler
Else
    SolveLPCut = dblSolucao
End If

' Fecha ambiente LINGO
LSdeleteEnvLng (pLINGO)

Exit Function

ErrorHandler:
    SolveLPCut = "Erro em SolucaoLPCorte: " & vbCrLf & _
        Err.Description & vbCrLf & ErrMsg
End Function

```

11.2. Anexo B – Exemplo de chamada a função de otimização

```
Private Sub ProblemaExemplo()

    Dim objOtimizador As Object
    Dim varRetorno As Variant

    Dim lngRoloLargura(7) As Long
    Dim lngRoloCompr(7) As Long
    Dim dblRoloArea(7) As Double

    Dim dblDemArea(9) As Double
    Dim lngDemLargura(8) As Long
    Dim lngDemCompr(8) As Long

    Dim dblMatrizCusto(8, 9) As Double

    Dim intLoopDem As Integer
    Dim intLoopRolo As Integer
    Dim strResult As String
    Dim dblTemp As Double

    ' Atribuição de valores capacidade dos rolos em area (m2)
    dblRoloArea(0) = 197.547
    dblRoloArea(1) = 192.456
    dblRoloArea(2) = 201.544
    dblRoloArea(3) = 186.438
    dblRoloArea(4) = 186.521
    dblRoloArea(5) = 209.622
    dblRoloArea(6) = 226.996
    dblRoloArea(7) = 149.816

    'Atribuição de valores de comprimento dos rolos (metros)
    lngRoloCompr(0) = 409
    lngRoloCompr(1) = 396
    lngRoloCompr(2) = 413
    lngRoloCompr(3) = 386
    lngRoloCompr(4) = 383
    lngRoloCompr(5) = 434
    lngRoloCompr(6) = 469
    lngRoloCompr(7) = 307

    'Atribuição de valores de demanda em area (m2)
    dblDemArea(0) = 24.322
    dblDemArea(1) = 69.073
    dblDemArea(2) = 34.717
    dblDemArea(3) = 89.388
    dblDemArea(4) = 44.974
    dblDemArea(5) = 36.002
    dblDemArea(6) = 249.255
    dblDemArea(7) = 59.62
    dblDemArea(8) = 163.943
    dblDemArea(9) = 779.646 'Demanda dummy para balancear problem transporte

    'Atribuição de valores de largura em milímetros
    lngDemLargura(0) = 16
    lngDemLargura(1) = 12
    lngDemLargura(2) = 12
    lngDemLargura(3) = 12
    lngDemLargura(4) = 6
    lngDemLargura(5) = 6
    lngDemLargura(6) = 16
    lngDemLargura(7) = 9
    lngDemLargura(8) = 6
```

```

    For intLoopRolo = 0 To 7
        For intLoopDem = 0 To 8
            dblTemp = dblDemArea(intLoopDem) / (lngDemLargura(intLoopDem) / 1000) /
lngRoloCompr(intLoopRolo)
            dblTemp = Round(Round(dblTemp + 0.499, 0) - dblTemp, 3)
            dblTemp = dblTemp * lngDemLargura(intLoopDem) *
lngRoloCompr(intLoopRolo)
            dblTemp = Round(dblTemp / 1000, 3)
            dblMatrizCusto(intLoopRolo, intLoopDem) = dblTemp
            'strResult = strResult & dblTemp & vbCrLf
        Next
    Next
    'MsgBox strResult, vbOKOnly
    Set objOtimizador = CreateObject("Otimizador.clsOtimizador")
    varRetorno = objOtimizador.SolveLPCut(varCapRolos:=dblRoloArea, _
                                         varDemanda:=dblDemArea, _
                                         varMatrizCusto:=dblMatrizCusto)
End Sub

```

Referências

Burke, E. K.; Kendall, G.; Whitwell, G. A New Placement Heuristic for the Orthogonal Stock-Cutting Problem. **Operation Research**, v. 52, n. 4, p. 655-671, Jul.-Ago. 2004.

Carvalho, J. M. Valério de Exact solution of cutting stock problems using column generation and branch-and-bound. **International Transactions in Operational Research**, v. 5, n. 1, p. 35-44, Jan. 1998.

Dyckhoff, H. A typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 44, n. 2, p.145-159, Jan. 1990.

Gilmore, P. C.; Gomory, R. A linear programming approach to the cutting-stock problem. **Operations Research**, v. 9, n. 6, p. 848-859, 1961.

Gilmore, P. C.; Gomory, R. A linear programming approach to the cutting-stock problem - part II. **Operations Research**, v. 11, n. 6, p. 863-888, Nov.-Dez. 1963.

Gilmore, P. C.; Gomory, R. Multi-stage cutting stock problems of two and more dimensions. **Operations Research**, v. 13, n. 1, p. 94-120, 1965.

Hifi, M.; Zissimopoulos, V. A recursive exact algorithm for weighted two-dimensional cutting. **European Journal of Operational Research**, v. 91, p. 553-564, 1996.

Levine, J.; Ducatelle, F. Ant colony optimization and local search packing and cutting stock problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 55, p. 705-716, 2004

Morabito, R.; Arenales, M. N. Staged and constrained two-dimensional guillotine cutting problems: an AND/OR-graph approach. **European Journal of Operational Research**, v. 94, n. 3, p. 548-560, Nov. 1996.

Poshyanonda, P.; Dagli, C.H. Genetic neuro-nester. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.15, p. 201-218, Abr. 2004.

Martello, S.; Vigo, D Exact Solution of the Two-Dimensional Finite Bin Packing Problem. **Management Science**, v. 44, n. 3, p.388-399, Mar. 1998.

Sweeney, P.; Paternoster, E. Cutting and packing problems: a categorized, application oriented research bibliography. **Journal of the Operational Research Society**, v. 43, n. 7, p. 691-706, 1992.

Wagner, Harvey M.[Principles of operations research. Português] **Pesquisa operacional**. 2.ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1986 851 p. Cap 1, p. 7-8: A Arte e a Ciência das Decisões Executivas.

TRABALHO APRESENTADO EM BANCA E APROVADO POR:

Prof. Eduardo Ribas Santos

Conceito Final:

Porto Alegre, de de

Professor Orientador: Denis Borenstein

Disciplina: Estágio Final (ADM01196)

Área de Concentração: PRODUÇÃO E SISTEMAS

Disciplina: Pesquisa Operacional