

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE EMBUTIDOS

Paulo Eduardo Polon
Engenheiro Químico, UEM, 1991
Msc. Engenharia Química, UEM, 1997
Orientador: Prof. Dr. Paulo R. Paraíso
Orientador: Prof. Dr. Cid M.G. Andrade
Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Mário M. Jorge

Tese de Doutorado submetida à
Universidade Estadual de Maringá,
como parte dos requisitos
necessários à obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Química,
área de Desenvolvimento de
Processos.

Maringá - PR - Brasil

Agosto de 2010

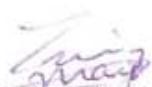
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

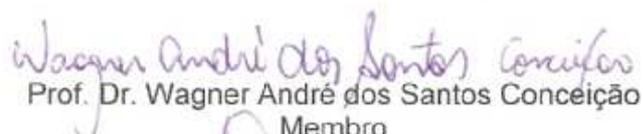
Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Paulo Eduardo Polon perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 30 de agosto de 2010.

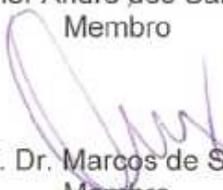
COMISSÃO JULGADORA


Prof. Dr. Paulo Roberto Paraiso
Orientador


Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade
Orientador


Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge
Coorientador


Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição
Membro


Prof. Dr. Marcos de Souza
Membro


Prof. Dr. José Eduardo Olivo
Membro


Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani
Membro

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central – UEM, Maringá – PR., Brasil)

P778o Polon, Paulo Eduardo
Otimização da produção da indústria de embutidos
/ Paulo Eduardo Polon Maringá 2010
139 f. : il., figs., tabs.

Orientadores: Prof Dr. Paulo Roberto Paraíso;
Prof. Dr. Cid M. G. Andrade.

Co-orientador: Prof. Luiz Mário M. Jorge.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, 2014.

1. Embutidos - Programação da produção.
2. Otimização da produção - Alimentos
industrializados. 3. Fabricação de embutidos.
4. GAMS - Software. 5. PLIM - Programação linear
inteiro mista. I. Paraíso, Paulo Roberto. II.
Andrade, Cid. M. G. III. Jorge, Luiz Mário M. IV.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de
Tecnologia. Departamento de Engenharia Química.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. V.
Título.

CDD 21.ed. 664

À minha esposa, Adriana, pelo amor e compreensão;
aos meus filhos, Felipe, Eduardo e Sofia, pelo amor e motivação

Dedico

Aos meus pais pelo apoio e carinho
Aos meus irmãos e amigos pelo incentivo

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a realização deste trabalho, e em especial:

Ao prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso, pela orientação e força para a realização deste trabalho e aos prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade e prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge, pela orientação fornecida no decorrer da realização deste trabalho.

Agradeço a Palmali Industrial de Alimentos Ltda, especialmente à Engenheira de Alimentos Daniela Padilha Migott e ao Engenheiro Químico José M. C. Neto, pela colaboração que prestaram.

Aos demais professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Química da UEM pelo apoio e colaboração.

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE EMBUTIDOS

AUTOR: PAULO EDUARDO POLON

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

PROF. DR. CID MARCOS GONÇALVES ANDRADE

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 - 09; CEP: 87020-900 -Maringá - PR, Brasil, defendida em 30 de agosto de 2010. 139 p.

RESUMO

O aumento do consumo de alimentos industrializados, assim como uma maior variedade de produtos oferecidos pelas indústrias de alimentos tem exigido maior flexibilidade e coordenação mais eficiente na utilização dos recursos existentes. A indústria de produção de embutidos experimentou um aumento do consumo nos últimos anos. Isto tem levado a uma busca por um uso mais eficiente dos recursos disponíveis a fim de conseguir um aumento da produtividade, redução dos custos, confiabilidade no atendimento e redução de prazos de entrega. Estes aspectos produtivos e gerenciais podem ser conseguidos com maior facilidade por meio do uso de ferramentas de programação da produção. O processo de produção de embutidos é em batelada. Ele pode ser dividido em duas etapas principais, a primeira se refere à preparação, à mistura das matérias-primas e ao embutimento; a segunda etapa se refere ao cozimento dos produtos que foram embutidos na primeira etapa. Na indústria de embutidos uma grande variedade de produtos são obtidos. A maior parte destes produtos não possui uma linha exclusiva e, portanto, existe uma disputa entre equipamentos e estados intermediários. Os produtos fabricados são classificados como perecíveis e recomenda-se que a produção não deva exceder a demanda sob o risco de gerar estoques e ultrapassar o prazo de validade do produto. O objetivo deste trabalho foi a utilização de um modelo matemático de programação da produção, para otimizar a produção de uma indústria de embutidos, a partir de valores de demandas para cada produto. A abordagem proposta trata o problema como de programação linear inteira mista (PLIM) para representar as decisões envolvidas e foi resolvido com o software GAMS (Sistema Genérico de Modelagem Algébrica). O modelo desenvolvido foi aplicado ao

problema de programação da produção com dados operacionais reais de uma indústria da região e mostrou-se capaz de gerar resultados melhores do que os resultados de produção apresentados pela indústria. Assim, os resultados do modelo auxiliam na tomada de decisões da programação de produção em indústria de embutidos.

OPTIMIZATION PRODUCTION SCHEDULING FOR THE SAUSAGE INDUSTRY

AUTHOR: PAULO EDUARDO POLON

THESIS ADVISOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

PROF. DR. CID MARCOS GONÇALVES ANDRADE

PhD Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Colombo, Avenue. - 5790, BL E46 - 09; CEP: 87020-900 - Maringá - PR, Brazil, presented on August 30, 2010. 139 p.

ABSTRACT

The increased consumption of processed foods, as well as a greater variety of products offered by the food industry has required for greater flexibility and the most efficient coordination in the allocation of existing resources. The sausage industry in particular in recent years had an increase in consumption, and this has led to a search for a more efficient use of available resources to achieve increased productivity, cost reduction, reliability in attendance and reduction of lead times. These aspects of production and management can be achieved more easily through tools of programming production. The sausage production is a batch process. The process can be divided into two main stages, the first refers to the preparation, the mixture of raw materials and stuffing; the second stage refers to the cooking of products that were stuffed in the first stage. A variety of types of products are obtained in the sausage industry. Most of these products do not have an exclusive line and therefore, there is a dispute between equipment and intermediate states. The products are classified as perishable, and it is recommended that production should not exceed the demand under the risk of keeping products in stock and overcome the shelf life validity of the product. The objective of this paper was to utilize a mathematical model of production scheduling, to optimal production scheduling for the sausage industry using values of demands for each product. The proposed approach treats the problem as mixed integer linear programming (MILP) to represent the decisions involved and was solved using the GAMS (General Algebraic Modelling System) software. The model was applied

to the problem of production scheduling with real-world operational data from an industry and was able to generate better results than the results produced by the production industry. Thus, the model allows to support the decisions of production scheduling in the sausage industry.

Índice texto

Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvi
Símbolos e nomenclatura.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	2
1.2 Metodologia do Trabalho.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho.....	3
1.4 Principais Contribuições do Trabalho.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Planejamento e Programação da Produção em Batelada.....	8
2.1.1 Representação Rede Estado Tarefa (STN).....	10
2.1.2 Representação do Tempo.....	12
2.2 A Natureza dos Problemas de Planejamento e Programação de Produção.....	13
2.3 O Problema de Programação da Produção.....	15
2.4 Uma Visão Geral da Tecnologia de Planejamento e Programação de Produção.....	16
2.4.1 Abordagens Baseada em Otimização.....	17
2.4.2 Abordagens Heurísticas de Programação da Produção.....	19
2.4.2.1 Programação da Produção Baseado em Regras.....	19
2.4.2.2 Programação da Produção Guiada por Restrições.....	20
2.4.2.3 Métodos de Simulação.....	21
2.4.3 Comparação de Metodologias de Solução.....	22
2.5 Incertezas no Planejamento e Programação de Produção.....	23
2.6 Planejamento e Programação da Produção de Campanha.....	24
2.7 Formulação Matemática para o Problema de Programação da Produção de Curto Prazo.....	28
2.8 Formulação Matemática para o Problema de Programação da Produção Periódica.....	32

2.9	Formulação Matemática para o Problema de Planejamento e Programação da produção de Campanha.....	33
3.	EMBUTIDOS CÁRNEOS.....	38
3.1.	Matérias-Primas.....	39
3.1.1	Carnes.....	39
3.1.1.1	CMS (Carne mecanicamente separada).....	39
3.1.1.2	Recorte Bovino e Suíno.....	40
3.1.1.3	Gordura e Toucinho.....	40
3.1.2	Água.....	40
3.1.3	Aditivos e Ingredientes.....	41
3.1.3.1	Conservantes.....	41
3.1.3.2	Estabilizantes e Emulsificantes.....	42
3.1.3.3	Ligadores e Enchedores não Cárneos.....	42
3.1.3.4	Antioxidantes.....	43
3.1.3.5	Flavorizantes e Aromatizantes.....	44
3.1.3.6	Corantes.....	44
3.1.3.7	Sal.....	44
3.1.3.8	Açúcar.....	45
3.1.3.9	Especiarias.....	45
3.1.4	Envoltórios.....	45
3.1.4.1	Tripas Naturais.....	45
3.1.4.2	Tripas Artificiais.....	46
3.2	Equipamentos.....	46
3.2.1	Quebrador de Blocos.....	46
3.2.2	Moedor.....	46
3.2.3	Misturadores.....	47
3.2.4	Tanque rotativo (tumbler).....	47
3.2.5	Cortadores (Cutter).....	48
3.2.6	Emulsificador.....	49
3.2.7	Embutidora.....	49
3.2.8	Estufas de Cozimento.....	51
3.2.9	Cozedores.....	51
3.3	Processo Produtivo.....	52

3.3.1 Salsicha.....	52
3.3.2 Linguiça.....	55
3.3.2.1 Linguiça Frescal.....	56
3.3.2.2 Linguiça Defumada.....	58
3.3.3 Presunto.....	60
3.3.4 Apresuntado.....	62
3.3.5 Mortadela.....	64
3.3.6 Lombo Tipo Canadense.....	66
3.4 Higiene.....	68
4. UMA INDÚSTRIA DE EMBUTIDOS.....	70
4.1 Introdução.....	70
4.2 Processo Produtivo.....	70
4.3 Modelo Matemático.....	75
4.3.1 Modelo de curto prazo.....	77
4.3.2 Modelo de longo prazo modo campanha.....	78
5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	80
5.1 Indústria em Início de Operação.....	80
5.1.1 Primeiro dia de Produção.....	81
5.1.2 Segundo dia de Produção.....	83
5.2 Industria Operando no modo de Campanha Única.....	86
5.2.1 Operação em Campanha Única com Pesos Iguais.....	86
5.2.2 Operação em Campanha Única com Preços de Mercado.....	87
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
6.1 Conclusões.....	88
6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	88
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A. GRÁFICOS DE GANTT.....	95
APÊNDICE B. LINGUAGEM DE MODELAGEM GAMS.....	103
APÊNDICE C. O GRÁFICO DE GANTT.....	120

Índice figuras

Figura 2.1 Rede Estado Tarefa (STN).....	11
Figura 2.2 Representações do tempo discreto e contínuo.....	13
Figura 3.1 Moedor.....	47
Figura 3.2 Facas de alta velocidade em um cortador padrão.....	48
Figura 3.3 Cortador equipado com dispositivo para esvaziamento sem o uso das mãos.....	49
Figura 3.4 Embutidora contínua.....	50
Figura 3.5 Carro de cozimento para estufa.....	51
Figura 3.6 Fluxograma do processo industrial de produção de salsicha.....	53
Figura 3.7 Fluxograma de produção de linguiça frescal.....	57
Figura 3.8 Fluxograma de produção de linguiça defumada.....	59
Figura 3.9 Fluxograma de produção de presunto.....	61
Figura 3.10 Fluxograma de produção de apresuntado.....	63
Figura 3.11 Fluxograma de produção de mortadela.....	65
Figura 3.12 Fluxograma de produção de lombo.....	67
Figura 4.1: Processo produtivo da Indústria de embutidos.....	70
Figura 4.2 STN para a produção de presunto.....	72
Figura 4.3 STN para a produção de apresuntado.....	73
Figura 4.4 STN para a produção de lombo tipo canadense.....	73
Figura 4.5 STN para a produção de mortadela.....	73
Figura 4.6 STN para a produção de Linguiça frescal.....	74
Figura 4.7 STN para a produção de Linguiça defumada I.....	74
Figura 4.8 STN para a produção de Linguiça defumada II.....	74
Figura 4.9 STN para a produção de salsicha.....	74
Figura 5.1 Gráfico de Gantt para o produto 7.....	82
Figura A.1 Gráfico de Gantt para dia 1 (a).....	95
Figura A.2 Gráfico de Gantt para dia 1 (b).....	96
Figura A.3 Gráfico de Gantt para dia 2 (a).....	97
Figura A.4 Gráfico de Gantt para dia 2 (b).....	98
Figura A.5 Gráfico de Gantt para produção em campanha pesos iguais (a).....	99
Figura A.6 Gráfico de Gantt para produção em campanha pesos iguais (b).....	100
Figura A.7 Gráfico de Gantt para produção em campanha preços de mercado (a).....	101
Figura A.8 Gráfico de Gantt para produção em campanha preços de mercado (b).....	102

Figura B.1 Planta Multiproduto.....	103
Figura C.1 Gráfico de Gantt para o exemplo do Apêndice B.....	121

Índice tabela

Tabela 3.1 Características Físico-químicas da salsicha.....	52
Tabela 3.2 Características Físico-químicas de linguiças.....	57
Tabela 3.3 Características Físico-químicas do presunto.....	60
Tabela 3.4 Características Físico-químicas do apresuntado.....	62
Tabela 3.5 Características Físico-químicas da mortadela.....	64
Tabela 3.6 Características Físico-químicas do lombo tipo canadense.....	66
Tabela 4.1 Produção média diária na indústria.....	71
Tabela 4.2 Processadores adequado para as tarefas.....	75
Tabela 4.3 Capacidade dos processadores.....	76
Tabela 5.1 Peso dos Estados.....	81
Tabela 5.2 Cores que representam os produtos.....	82
Tabela 5.3 Produção e consumo para o Dia 1.....	84
Tabela 5.4 Produção e consumo para o Dia 2.....	85
Tabela 5.5 Produção para pesos iguais e preços de mercado.....	86
Tabela 5.6 Preços de Mercado.....	87
Tabela B.1 Tempos de Processamento.....	103

Símbolos e nomenclatura

- B_{ijt} = quantidade de material que começa sofrendo a tarefa i na unidade de processamento j no começo do intervalo de tempo t .
 B_{ijt}^c = quantidade de material que começa sofrendo a tarefa i na unidade de processamento j no começo do intervalo de tempo t num ciclo de campanha c .
 BS_{sc}^I = quantidade de material armazenado no estado s no começo da campanha c .
 BS_{sc}^F = quantidade de material armazenado no estado s no final da campanha c antes de alguma entrega ou recebimento discreto.
 $BS_{sc}^{F'}$ = quantidade de material armazenado no estado s no final da campanha c depois de alguma entrega ou recebimento discreto.
 BS_s^{\max} = máximo inventário permissível de material no estado s .
 BS_s^{\min} = mínimo inventário permissível de material no estado s .
 c = índice padrão para campanhas.
 c_u = custo unitário da utilidade u .
 C_s = capacidade máxima de armazenagem reservada para estado s .
 C_{st} = preço unitário associado ao material no estado s no tempo t
 C_{st}^s = custo de armazenagem associado ao material no estado s no tempo t
 C_{st}^U = custo de utilidade associado ao material no estado s no tempo t
 d_{sc} = taxas de recebimento do estado s na campanha c
 $d_{sc}^{\max}, d_{sc}^{\min}$ = limites superior e inferior de d_{sc}
 D^{\max} = máxima aceitável duração da campanha.
 D^{\min} = mínima aceitável duração da campanha.
 D_{st} = quantidade do estado s entregue no intervalo de tempo t .
 i = índice padrão para tarefas; também índice para código binário de n_c .
 IN_{sc}^A = variável envolvida no cálculo do custo de inventário.
 IN_{isc}^A = variável representado produto $L_{ic} IN_{sc}^A$.
 IR = taxa anual de lucro.
 I_j = conjunto de tarefas que podem ser executadas na unidade j
 I_s, I_s^P = conjunto de tarefas que produzem e consomem estado
 j = índice padrão para unidades de processamento.
 J_i = conjunto de unidades adequadas para tarefa i
 L_{ic} = codificação binária para a variável inteira n_c
 M = número positivo suficiente grande
 n_c = número de ciclos na campanha c .
 n_c^{\min} = número mínimo de ciclos na campanha c .
 p_i = tempo de completamento para tarefa i .
 p_{is} = tempo de processamento para a saída da tarefa i para estado s .
 r_c = número de variáveis binárias L_{ic} .

- r_{sc} = taxa de recebimento contínuo da material s durante a campanha c .
 $r_{sc}^{\max}, r_{sc}^{\min}$ = limite superior e inferior sobre r_{sc}
 R_{st} = quantidade do estado s recebida de fontes externas no intervalo de tempo t
 s = índice padrão para estados.
 \hat{S}_{ics} = variável representando o produto $L_{ic}(\Delta S_{sc} + T_c r_{sc})$
 S_{st} = quantidade de material armazenado no estado s durante o intervalo de tempo t
 S_{st}^c = quantidade de material armazenado no estado s durante o intervalo de tempo t num ciclo da campanha c .
 ΔS_{sc} = acumulação líquida do estado s sobre um ciclo na campanha c .
 $\Delta S_{sc}^{\max}, \Delta S_{sc}^{\min}$ = limite superior e inferior sobre ΔS_{sc} .
 t = índice padrão para intervalo de tempo t .
 T_c = tempo de um ciclo.
 u = índice padrão para utilidades.
 U_{ut} = quantidade de utilidade u usada durante intervalo de tempo t
 V_j = capacidade nominal da unidade j .
 $V_{ij}^{\max}, V_{ij}^{\min}$ = capacidade máxima e mínima da unidade j para a tarefa i
 W_{ijt} = 1 se unidade j começa processando a tarefa i no começo do intervalo de tempo t ; 0 caso contrário.
 W_{ijt}^c = 1 se unidade j começa processando a tarefa i no começo do intervalo de tempo t num ciclo de campanha c ; 0 caso contrário.
 X_c = 1 se campanha c está incluída no plano; 0 caso contrário.

Símbolos Gregos

- α_s = custo do inventário para uma quantidade unitária de material s sobre unidade de tempo.
 α_{ij} = tempo de processamento da tarefa i na unidade j .
 α_{is} = tempo de processamento para o estado s para tarefa i
 v_s = preço unitário para material no estado s .
 ρ_{is} = proporção da entrada de tarefa i do estado s .
 ρ_{is}^p = proporção de saída de tarefa i no estado s .
 $\tau_c(\bullet)$ = operador cíclico.
 ϕ_{ij}^{\max} = fator de tamanho máximo quando unidade j é usada para executar tarefa i .
 ϕ_{ij}^{\min} = fator de tamanho mínimo quando unidade j é usada para executar tarefa i .
 Φ = função objetivo.
 θ = tempo relativo ao início de uma tarefa

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de alimentos industrializados, assim como uma maior variedade de produtos oferecidos pelas indústrias de alimentos tem exigido maior flexibilidade e uma coordenação mais eficiente na utilização dos recursos existentes. A indústria de produção de embutidos teve um aumento do consumo nos últimos anos, e isto tem levado a uma busca por um uso mais eficiente dos recursos disponíveis a fim de se obter maiores índices de produtividade, redução dos custos, confiabilidade no atendimento e redução de prazos de entrega. Estes aspectos produtivos e gerenciais podem ser conseguidos com maior facilidade através do uso de ferramentas de programação da produção. O processo de produção de embutidos é em batelada. Ele pode ser dividido em duas etapas principais, a primeira se refere à preparação, à mistura das matérias-primas e ao embutimento; a segunda etapa se refere ao cozimento dos produtos que foram embutidos na primeira etapa. Na indústria de embutidos uma grande variedade de produtos são obtidos e a maior parte destes produtos não possui uma linha de produção exclusiva. Dessa forma, naturalmente aparecem as concorrências entre equipamentos e estados intermediários. Os produtos fabricados são classificados como perecíveis e recomenda-se que a produção não deva exceder a demanda sob o risco de gerar estoques e ultrapassar o prazo de validade do produto. O objetivo deste trabalho foi, a partir de valores de demandas para cada produto, otimizar a produção da fábrica de embutidos. A abordagem proposta trata o problema como um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) para representar as decisões envolvidas e foi resolvido através da linguagem de modelagem GAMS (Sistema Genérico de Modelagem Algébrica). O modelo foi aplicado ao problema de programação da produção com dados operacionais reais de uma indústria da região e mostrou-se capaz de gerar resultados melhores do que os utilizados pela indústria. Assim, o modelo parece ser apropriado para apoiar as decisões de programação de produção na indústria de embutidos.

O processo de produção industrial consiste em duas etapas. Na primeira etapa do processo produtivo os produtos cárneos são selecionados e em seguida são cortados em pedaços de tamanho suficientes para fluir com facilidade pelo bocal da máquina de moer, para cada tipo de embutido existe uma granulometria da massa apropriada. Recomenda-se operar com as carnes bem geladas (próximas do ponto de congelamento), pois facilita as operações de corte, reduz o desgaste do equipamento e, principalmente, minimiza as contaminações. Uma vez moídas, as carnes são colocadas em recipientes adequados e são

armazenadas em ambiente refrigerado. Paralelamente a isto aditivos e condimentos são pesados cuidadosamente e muito bem misturados. Em seguida acrescenta-se esta mistura à carne previamente moída num misturador onde são misturadas até que se forme uma massa compacta e bem ligada, a fim de evitar a formação de bolhas de ar durante o embutimento (Rocco, 1996). Antes do embutimento alguns produtos passam pelo processo de cura, que consiste no desenvolvimento de características de cor, sabor, aroma e textura própria de cada produto, este processo pode variar de 8 a 24 horas dependendo do produto. Antes de fazer o embutimento, o envoltório, que pode ser natural ou artificial, devem ser lavados em água corrente, desembaraçados e colocados nos bocais da máquina de embutir. No processo de embutimento a massa preparada anteriormente é colocada no topo da máquina de embutir, esta é comprimida por um embolo de acionamento elétrico, que a força a sair do equipamento por um orifício, onde se adaptam bocais de diversos calibres, de acordo com o tipo de produto a ser embutido. Depois de embutidos os produtos são colocados em varais ou formas.

Numa segunda etapa os produtos são cozidos em estufas ou tanques de cozimento. Após o cozimento os produtos são resfriados, embalados e levados para estoque ou expedição.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver modelos de programação da produção para a otimização operacional de indústrias de embutidos, visando à utilização ótima dos equipamentos.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Desenvolvimento de modelos de programação da produção para indústrias de embutidos.
- Utilização destes modelos na obtenção de métodos sistemáticos de otimização aplicadas na indústria de embutidos.

Para cumprir os objetivos acima propostos, pretende-se encaminhar a solução do problema como segue. Inicialmente foram apresentados modelos de programação da produção de curto-prazo e longo-prazo. Em seguida pretende-se adaptar os modelos de programação à indústria de embutidos e implementar sua solução através da linguagem de modelagem GAMS (Sistema Genérico de Modelagem Algébrica). Após isso, otimizou-se

as condições operacionais com base em dados coletados numa indústria de embutidos da região.

1.2 Metodologia do Trabalho

A metodologia utilizada para cumprir os objetivos propostos é constituída dos seguintes tópicos:

- Modelagem matemática de programação da produção num modelo linear inteiro mista (PLIM)
- Otimização operacional nas condições reais de operação da indústria de embutidos.
- Simulação de diversas situações reais encontradas no dia a dia de uma indústria de embutidos.
- Comparação de resultados obtidos na simulação com os reais coletados na indústria para validação do modelo proposto.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente tese foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo visa colocar o problema, definir os objetivos a serem atingidos, delinear a metodologia a ser empregada para atingir os objetivos, bem como apresentar a contribuição científica deste trabalho.

O segundo capítulo refere-se à revisão bibliográfica de conceitos básicos sobre programação da produção, bem como os principais modelos de programação que podem ser utilizados na indústria de produção em batelada.

O terceiro capítulo apresenta um breve histórico sobre a indústria de embutidos, os tipos principais de embutidos e suas matérias primas, os equipamentos necessários para a produção industrial de embutidos e o modo de produção dos vários tipos de embutidos.

O quarto capítulo descreve como acontece a produção de embutidos numa indústria real e apresenta seus dados operacionais de produção.

O quinto capítulo apresenta várias situações reais vividas no dia-a-dia de uma indústria de embutidos e como o modelo de programação da produção apresentado neste trabalho lida com estas situações.

Finalmente, o último capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir da aplicação do modelo de programação da produção desenvolvido, apresentando também recomendações para futuros trabalhos.

1.4 Principais Contribuições do Trabalho

O presente trabalho visa essencialmente contribuir cientificamente com o desenvolvimento de métodos sistemáticos de otimização aplicados à indústria de embutidos.

Fornecer uma programação da produção que pode ser usada de modo eficiente pelo chão de fábrica de uma indústria de embutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A indústria química mundial, mais especificamente a indústria de alimentos, produz uma infinidade de produtos em benefício da sociedade. A produção desses produtos pode ser realizada por meio de duas formas básicas: a contínua e a em batelada.

Uma característica discriminadora das operações contínuas é a correspondência um-a-um entre os itens das etapas da receita e os equipamentos da planta. No caso contínuo, o fluxograma é a realização física da receita e sua estrutura permanece fixa no tempo. Nas plantas batelada, a estrutura da receita e a estrutura da rede de equipamentos da planta são em geral distintas. Além disso, a configuração do equipamento pode mudar cada vez que um produto diferente é feito. Assim, no caso batelada existe um nível adicional de decisão de engenharia: a escolha de etapas de receita para itens de equipamento sobre intervalos de tempo específicos. Essas decisões de escolha são inerentemente discretas por natureza, introduzindo um aspecto combinatorial normalmente não presente no caso do processo contínuo.

A maneira nas quais muitas plantas batelada são operadas é criticamente influenciada pela natureza da demanda imposta sobre elas. Se previsões de demanda de longo prazo estão disponíveis, então as plantas podem ser operadas no modo de campanha, com todos os recursos da planta sendo reservados para um pequeno subconjunto dos produtos sobre longos períodos de tempo (as campanhas). O gerenciamento e controle da planta é assim simplificado devido a retenção do método de produção do produto. Além disso, um padrão cíclico de operações é estabelecido para cada campanha, com muitas bateladas idênticas do mesmo produto(s) produzido em sequência.

Por outro lado, se as previsões de demanda disponíveis não são seguras, então a produção da planta é dirigida primariamente pela sequência disponível. Isto força sem dúvida para um curto horizonte de planejamento sobre o qual são estabelecidos padrões de operação não regulares. Isto dá origem a problemas de programação da produção de curto prazo.

Baseado na natureza das receitas do produto e a permissível escolha tarefa/unidade, operações batelada podem ser grosseiramente classificadas dentro de três tipos básicos: a planta multiproduto, a planta multipropósito sob a maneira da campanha, e a planta multipropósito geral. A clássica planta multiproduto é empregada para um conjunto de produtos cuja estrutura da receita é a mesma (ou aproximada), a linha de produção empregada é fixa e única, e produz muitos produtos na mesma sequência de operação,

sendo os equipamentos adequados para realizar as mesmas tarefas, a linha é operada ciclicamente, e múltiplos produtos são acomodados através das campanhas em série. Notaria que o caso especial da planta multiproduto, o qual ocorre quando campanhas são reduzidas para batelada simples, é algumas vezes referida como um *flowshop*. A planta multipropósito sob operação de campanha é apropriada para produtos com estruturas de receita não similar, permite a utilização de muitos equipamentos adequados para realizar muitas tarefas, e emprega múltiplas campanhas envolvendo uma ou mais linhas de produção, cada uma operada ciclicamente. Finalmente, a planta multipropósito operada com linhas de produção não definida; em vez de ocorrer à produção em um modo não periódico envolvendo a escolha entre muitas unidades e muitas tarefas tendo como base a batelada individual (Reklaitis, 1995).

Segundo Lucet *et al* (1994), citado por Reklaitis (1995), o modo tipicamente multiproduto é empregada para maior volume de produtos (300 a 700 ton/ano) com receitas similares, assim como poderia ser o caso com uma planta que produz uma família de classes do mesmo produto. O modo multipropósito está prevalecendo em flexibilidade na qual produz um grande número de produtos de pequeno volume (30 a 300 ton/ano). A forma da campanha da planta multipropósito é usada quando a pureza do produto é necessariamente rigorosa (tal como na produção de fármacos) por razões de simplicidade operacional ou por consistente flexibilidade da batelada. A forma geral permite uso mais efetivo do equipamento principal no custo de operação complexa e custos adicionais de métodos de produção.

A literatura de pesquisa operacional fornece um grande número de formulações de programação matemática para problemas de programação da produção, mas na engenharia química o primeiro trabalho foi provavelmente o de Mauderli e Rippin (1979), que propuseram um procedimento para resolver ambos o planejamento e a programação da produção de plantas batelada multipropósito. Neste trabalho, roteiros de produção alternativos foram gerados e, em seguida, foi feita uma triagem para a identificação e rejeição dos roteiros ineficientes. Assim, o plano de produção ótimo foi obtido pela solução de um problema de otimização para maximização do lucro.

Atualmente é praticamente consensual na Engenharia Química a representação das estruturas de processamento através do conceito de Rede Estado – Tarefa (STN) apresentada por Kondili *et al* (1993). Esta ferramenta permite representar estruturas não lineares como ciclos, junções, separações de correntes. Além disso, é uma ferramenta valiosa pra representar balanços de massa, com lotes (ou bateladas) de tamanho fixo ou

variável. Além da representação STN, Kondili *et al.* (1993) propuseram a modelagem para resolver problemas de programação da produção baseada na discretização uniforme do tempo. Através da representação uniforme do tempo, a modelagem de problemas de planejamento e programação da produção com limitações de recursos compartilhados, lotes variáveis (equações de balanço de massa) é bastante simplificada. Neste artigo os autores propõem a solução do problema de planejamento e programação da produção de curto prazo em um só nível (atribuição, planejamento e programação da produção). A principal crítica que esta modelagem tem recebido é o número elevado de variáveis binárias de alocação necessárias para representar o problema.

Seguindo esse trabalho, varias técnicas foram introduzidas com o objetivo de reduzir o esforço computacional requerido. Shah *et al.* (1993a) reformulou as restrições de alocação (das operações de máquinas), reduzindo grandemente o intervalo de integralidade, isto é, a diferença entre as soluções ótimas do programa linear relaxado e do PLIM. Reduções de tempo computacional acima de três ordens de magnitude foram obtidas com a reformulação.

Em seu artigo Reklaitis (1995), apresenta um particular ponto de vista sobre abordagens de modelagem e otimização para problemas de programação da produção e de projeto preliminar para processos em batelada. O autor foca na inerente natureza discreta e combinatorial destes problemas e as necessidades para cuidadosa formulação e rigorosas estratégias de solução. O autor conclui que este campo de pesquisa em seu estado presente continua a oferecer excelentes oportunidades para pesquisa acadêmica e aplicações industriais, especialmente na colaboração da pesquisa universidade indústria.

Pekny e Reklaitis (1998) e Applequist *et al.* (1997) apresentam uma análise de perspectivas futuras explorando vários caminhos possíveis para a solução de problemas de planejamento e programação da produção, e concluem que as abordagens lineares mistas (PLIM) estruturadas, embora ainda estejam na “infância” são as que apresentam as melhores perspectivas futuras. Neste tipo de abordagem, o processo de solução é estruturado de forma a explorar as características matemáticas de cada problema, e acelerar a convergência.

Floudas e Lin (2005) apresentaram uma visão geral do desenvolvimento de abordagens baseadas em PLIM para a programação de sistemas de processamento químico. Avanços significativos tem sido alcançados sobre os seguintes temas:

- (i) desenvolvimento de formulações matemáticas para a modelagem efetiva de uma grande variedade de processos químicos;

- (ii) desenvolvimento de algoritmos para a solução eficiente de modelos de PLIM; e
- (iii) crescente aplicação da estrutura formal de otimização de PLIM para problemas reais de programação da produção em processos e indústrias relacionados.

Méndez *et al.* (2006) apresentaram uma revisão do estado da arte da programação da produção em batelada. Os autores examinam as características principais, solidez e limitações dos modelos existentes e técnicas de otimização, assim como outros métodos disponíveis de solução. Foram também introduzidos em detalhes a modelagem de abordagens de otimização representativas para os diferentes tipos de problemas, focando em ambos os modelos de tempo discreto e contínuo. Com este artigo os autores esperam estimular mais pesquisas em programação da produção batelada de curto prazo.

Winston *et al* (2001) mostra uma variedade de problemas da área da ciência de gerenciamento que podem ser modelados na planilha eletrônica Excel. Os autores apresentam problemas que podem ser modelados como problemas de programação linear, de programação linear inteiro mista, etc., que podem ser resolvidos utilizando os métodos disponíveis no Excel Solver, tais como: método simplex, método *branch and bound* e algoritmo genético.

2.1 Planejamento e Programação da Produção em Batelada

O problema de Planejamento e Programação de Produção tem recebido muita atenção nas últimas duas décadas, isto devido ao ressurgimento no interesse em processamento batelada por causa do aumento na ênfase de produtos de maior valor agregado, principalmente em indústrias alimentícia, farmacêutica, de polímeros, química agrícola e no campo da especialidade química.

A importância das ferramentas efetivas para atividades de Planejamento e Programação da Produção com os processos industriais tem crescido com o aumento na importância de serviços a clientes, redução de inventário, menor custo de fabricação e de operações globais. A complexidade das atividades de Planejamento e Programação da Produção é devido ao compartilhamento de equipamentos e armazenagem, à necessidade de sincronia imediata e disponibilidade de produto para um horário, e à existência de múltiplas opções de produção com custos diferentes. Note que, em princípio, todos os

problemas de Planejamento e Programação da Produção podem ser simplificados pela adição de equipamentos que remove a necessidade de compartilhar capacidade de produção ou eliminar dificuldade para gerenciar restrições num processo. Entretanto, o valor da efetiva ferramenta de Planejamento e Programação da Produção encontra-se na competição com a complexidade de operações, maximizando a eficiência dos recursos existentes, e minimizando o gasto da compra de novo equipamento ou contrato de fabricação. Mesmo no contexto de projeto de processo e *retrofit*, efetiva capacidade de Planejamento e Programação da Produção é algumas vezes crítica para encontrar o resultado mais lucrativo.

Geralmente, plantas batelada operam com flexibilidade considerável, acomodando grande número de produtos com os mesmos recursos. Dependendo das rotas de produção, plantas batelada são distinguidas em multiproduto e multipropósito. No primeiro caso, todos os produtos são fabricados seguindo a mesma rota de produção enquanto no último, o caso mais geral, produtos podem seguir rotas diferentes através da planta.

Dependendo do ambiente de negócio e da disponibilidade de informação a respeito de demandas futuras dos produtos que estão sendo produzidos, as plantas batelada podem ser operadas em dois modos. Na ausência de informação segura de longo prazo, plantas tendem a ser operadas num modo de curto prazo, com o plano de produção sendo determinado por pedidos pendentes. Isto geralmente implica horizontes de planejamento relativamente curtos (tipicamente variando de uma semana a poucas semanas). O padrão de operação em qualquer programa é geralmente irregular com produção sendo diferente de um intervalo de planejamento para o próximo.

Se, por outro lado, previsões seguras de demanda de longo prazo estão disponíveis, é preferível à partição do horizonte de planejamento em vários períodos de tempo relativamente longos (“campanhas”), cada uma reservada à produção de um produto único ou um subconjunto de produtos. Este modo campanha de operação pode resultar em importantes benefícios, tais como minimizar o número e custos de mudanças quando altera a produção de um produto para outro. A complexidade de gerenciamento e controle da planta é reduzida mais adiante pela operação da planta em um modo mais regular tal como num modo cíclico com cada campanha, com o mesmo padrão de operação sendo repetido numa frequência constante. Comprimentos típicos de campanha são de umas poucas semanas a vários meses, com tempo de ciclo variando de poucas horas a poucos dias. O modo campanha de operação é frequentemente usado para a fabricação de materiais genéricos (por exemplo, base de fármacos) que são produzidos em quantidades

relativamente grandes e são então usados como estoques de alimentação para o processo que produzirá vários produtos finais mais especializados.

2.1.1 Representação Rede Estado Tarefa (STN)

Redes de representação de processo definem a relação entre o material e o processamento tal como a sequencia na qual os produtos precisam estar disponíveis e todas as tarefas e intermediários necessários (relações de precedência entre produtos). Por isso, alguns produtos podem depender para sua produção da disponibilidade da relação das matérias primas e intermediários associados.

Segundo Kondili *et al.* (1993), processos podem ser descritos em termos de uma rede de representação, Rede Estado Tarefa (STN), caracterizada por dois tipos de nós.

- Nós Estado, representado por círculos na Figura 2.1, refere-se à alimentação, à intermediários e à produtos finais com a receita de processo.
- Nós Tarefa, representado por retângulos na Figura 2.1, refere-se às operações de processamento que transformam material de um ou mais estados de entrada para um ou mais estados de produto.

A principal regra seguida para a construção de cada STN pode ser resumida como segue:

- Uma tarefa tem tantos estados de entrada e saída quantos diferentes tipos de materiais de entrada e saída.
- Duas ou mais entradas ou saídas do mesmo estado são necessariamente da mesma qualidade. Portanto, se mistura ou divisão de materiais estão presentes na receita do processo, uma tarefa separada deve ser definida para ter em conta esta operação.

Assim o STN identifica quais estados do produto são usados como entrada para produzir os estados do produto de saída e será chamado um produto STN daqui para frente. Compartilhamento de intermediários, de material de reciclós e de múltiplas rotas de processamento para o mesmo intermediário ou produto são descritos inequivocadamente através desta representação. Tarefas de processamento são descritas através de um modelo particularmente simples onde é assumido que uma tarefa consome e produz estados de material associado a ela (respectivamente, entrada e saída) em proporções fixas dadas pelo tamanho da batelada. Também, os tempos de processamento associado com os vários estados de saída de uma tarefa são fixos e definidos a priori para cada saída.

O exemplo seguinte ilustra como o STN de um processo batelada é construído a partir da informação da receita.

A produção de dois produtos S5 e S6 a partir de duas alimentações S1 e S2 ocorre de acordo com a seguinte receita:

Receita de processo – Fazer S5 e S6

- Tarefa 1 (T1): aquecer matéria-prima S1 por 2 horas para produzir estados intermediário S3. S3 é instável e, portanto não pode ser estocado. Proporções são 1 unidade de massa de S1 para 1 unidade de massa para S3.
- Tarefa 2 (T2): processar matéria-prima S2 por 2 horas para formar o intermediário S4 que é estável e pode ser estocado indefinidamente. Proporções são 1 unidade de massa de S2 para 1 unidade de massa para S4.
- Tarefa 3 (T3): misturar material intermediário S3 com material S4 e deixá-los reagir por 4 horas para formar o produto final P1, descrito como estado S5. Proporções são 1 unidade de massa de P1 para 0,6 unidades de massa de S3 e 0,4 unidades de massa de S4.
- Tarefa 4 (T4): misturar S3 com S5 e deixá-los reagir por 2 horas para produzir o segundo produto final P2, representado pelo estado S6. Proporções são 1 unidade de massa de P2 para 0,6 unidades de massa de S3 e 0,4 unidades de massa de S5.

O STN associado é mostrado na Figura 2.1. Quatro tarefas de processamento e seis estados de material diferentes caracterizam a receita do processo.

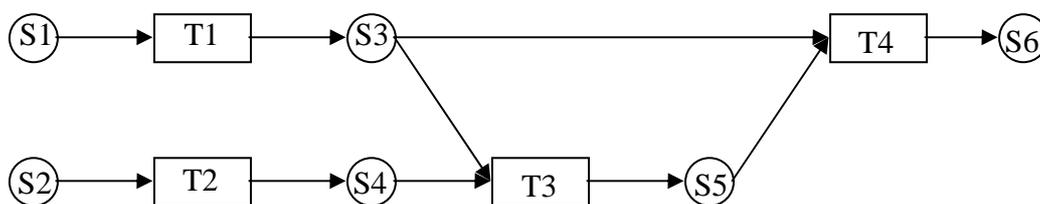


Figura 2.1 – Rede Estado Tarefa (STN) (Póvoa, 1994)

Esta rede de representação define apenas a estrutura da receita de processo. Todas as informações referentes à ordem de adição de materiais, necessidades de recursos para uma tarefa e estabilidade do material devem ser fornecidas adicionalmente. Várias receitas podem ser definidas para execução numa planta.

Os estados podem ser associados a quatro restrições de armazenagem diferentes: sem espera (ZW - *Zero Wait*), sem armazenamento intermediário (NIS - *No Intermediate Storage*), armazenamento intermediário finito (FIS - *Finite Intermediate Storage*) e armazenagem intermediária infinita (UIS - *Unlimited Intermediate Storage*). É importante notar que FIS corresponde ao caso mais geral. No entanto, a principal vantagem dos três casos restantes é que não há necessidade de modelar níveis de inventário.

2.1.2 Representação do Tempo

Para formular um modelo matemático para qualquer problema de programação da produção, uma questão que surge é como representar o tempo. Baseado em dois diferentes modos para representação do tempo, todas as formulações existentes são classificadas em duas categorias principais: modelos de tempo discreto e modelos de tempo contínuo. As formulações de programação na primeira categoria seguem a abordagem de discretização do tempo. O horizonte de tempo de interesse é dividido dentro de um número de intervalos de tempo com duração uniforme e as decisões a serem tomadas estão associadas com estes intervalos de tempo, como ilustrado na parte (a) da Figura 2.2. Por isso atividades que afetam o programa ou mudanças de estado do sistema de fabricação, tais como o início de uma tarefa ou mudança de estoque, só podem ter lugar no começo ou no final de cada intervalo de tempo. Esta é essencialmente uma aproximação do tempo. Em muitos casos, um curto comprimento de tempo tem que ser usado para a duração dos intervalos de tempo a fim de alcançar um razoável grau de precisão. Por exemplo, quando todos os tempos de processamento são fixos, seu maior fator comum (Greatest common factor – GCF) pode ser selecionado como a duração de intervalos de tempo, de outro modo apenas soluções subótimas podem ser obtidas. Quando precisam ser usados intervalos de tempo muito pequenos e/ou o horizonte de tempo sob consideração é longo, o número de intervalos de tempo discretizado pode ser muito grande. Isto leva a problemas combinatoriais muito grande, que são computacionalmente muito caros para resolver ou mesmo intratáveis. Estes dois inconvenientes principais, isto é, a aproximação natural e a dificuldade computacional na solução do grande modelo combinatorial resultante, restringe substancialmente as aplicações de abordagem de tempo discreto, especialmente para problemas do mundo real.

Em contraste à abordagem de tempo discreto, os modelos de tempo contínuo introduzem o conceito chave de evento ou intervalo de tempo variável. A exata definição

de evento varia de uma formulação para outra, mas essencialmente, elas todas correspondem a uma instância de tempo no domínio contínuo do horizonte. Por associação os eventos para variáveis contínuas que podem tomar potencialmente qualquer valor no horizonte de tempo, as atividades ou mudanças de sistemas, por exemplo, o começo e o fim de uma tarefa, são permitidos tomar lugar em qualquer tempo no horizonte, os quais retribuem a capacidade de modelagem do tempo com mais exatidão. A abordagem de tempo contínuo leva a problemas de programação matemática de tamanho muito menor, que, em muitos casos, requer menos esforço computacional para sua solução. Entretanto, por causa da natureza variável do ajustamento de eventos, ele torna mais desafiante modelar a programação do processo. Assim, o modelo matemático resultante pode exibir estruturas mais complicadas, comparada com a abordagem de tempo discreto. A idéia básica da abordagem de tempo contínuo é ilustrada na parte (b) da Figura 2.2.

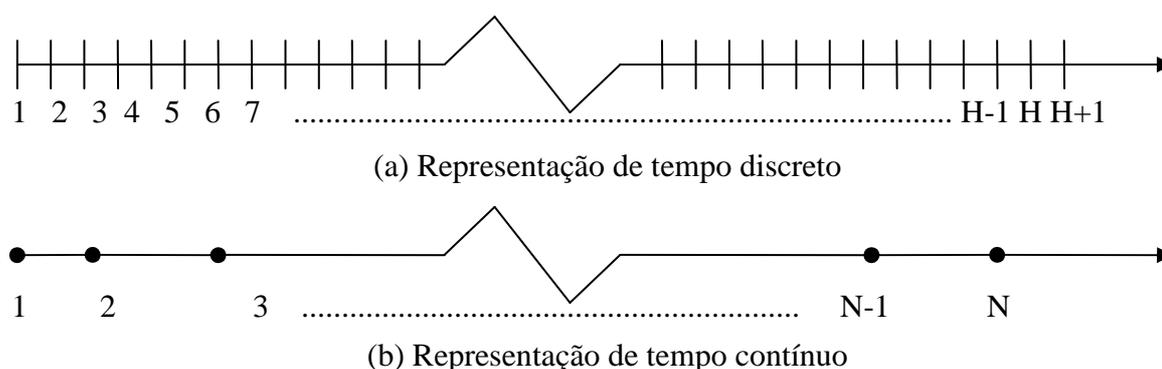


Figura 2.2 Representações do tempo discreto e contínuo (Floudas and Lin, 2004)

2.2 A Natureza dos Problemas de Planejamento e Programação de Produção

Em geral, as vantagens de Planejamento e Programação da Produção estão na tomada de decisão de um processo, que determina *o que*, *quando*, *onde* e *como* produzir um conjunto de produtos conhecidos, definindo necessidades em pontos específicos num horizonte de tempo específico, um conjunto de recursos limitados de produção, e as descrições claras das operações que devem ser executadas ao elaborar um produto.

- *O que*, refere-se a quantidade de cada produto a ser feito, definida em termos de tamanhos de lote, tamanhos de batelada, ou corridas de quantidades de produto.
- *Quando*, denota o ajustamento de operações específicas; tempo de início e final, comprimento das corridas, etc.

- *Onde*, refere-se aos locais específicos, unidade de processo, ou itens de equipamento escolhidos para executar operações específicas.
- *Como*, diz respeito à localização de quantidades específicas ou níveis de recursos, tais como trabalho, utilidades, estoque de produto de alimentação, e intermediários, necessário para executar as operações de produção.

A distinção entre problemas de Planejamento e Programação de Produção encontra-se no nível de interação entre as etapas *o que*, *quando*, *onde* e *como* estão registradas.

As determinações de *quando*, *onde* e *como* são de natureza inerentemente combinatorial. A escolha de equipamento, recursos para as operações, a determinação da ordem e, conseqüentemente, o ajustamento da execução das operações são decisões discretas que pode ser representada num modo binário (sim/não). Por exemplo, sim, escolhe-se o equipamento 1 para operação A, ou não, não se escolhe; executa-se a operação A no equipamento 1 antes da operação B, ou não, não se escolhe.

O problema de programação da produção envolve decisões binárias e são as decisões binárias que fornecem o desafio da solução dos problemas de programação da produção. De fato, o pior caso teórico (complexidade computacional) analisado tem mostrado que mesmo as formas conceitualmente mais simples de problemas de programação da produção (aquelas envolvendo apenas considerações de sequenciamento, como a sequência de tarefas numa única máquina com custos de preparação do processador que são dependentes da sequência das tarefas) podem exibir crescimento exponencial no esforço computacional com o aumento do tamanho do problema (número de empregos).

Uma solução ou exemplo resultante de uma programação da produção de processo de *o que*, *quando*, *onde* e *como* é possível se ele reunir todas as limitações de recursos, restrições de fabricação, necessidades impostas do produto. Possíveis soluções diferentes geralmente não são equivalentes: algumas são melhores do que outras por razões técnicas ou econômicas. Assim, um programa terá associado com ele medida de mérito combinada, tais como custos de fabricação, lucro ou número de ordens atrasadas. Um possível programa que alcança o melhor valor possível de medida de mérito é dito ser ótimo. Normalmente, uma programação da produção de processo procura gerar soluções ótimas, mas algumas vezes esta é impraticável e assim, soluções possíveis boas, mas subótimas devem satisfazer. Em tais casos, é desejável obter estimativas ou limites de quão próximo o programa candidato está do ótimo. Como será notado mais adiante, procedimentos de

programação da produção diferem na sua habilidade para garantir o alcance de solução ótimo, subótima e limitada, ou mesmo soluções possíveis. (Pekny and Reklaitis, 1998)

2.3 O Problema de Programação da Produção

Um problema chave que surge nas operações batelada é a programação da produção da planta para encontrar a necessidade do produto especificado. Especificamente, dado o modo de operação, a ordem de produto, as receitas de produto, o número de vários tipos de equipamento existentes, a lista de tipos de equipamentos permitidos para escolha para cada tarefa, algumas limitações de recursos compartilhados (tais como utilidades ou mão-de-obra), e algumas restrições de operação e segurança, o problema de programação da produção é determinar a sequência na qual, tarefas usam equipamentos e recursos e o tempo detalhado de execução de todas as tarefas, assim como otimizar o desempenho da planta.

O problema de programação da produção envolve três elementos proximamente ligados: escolha de unidades e recursos para executar as tarefas, sequenciamento das tarefas escolhidas para unidades específicas e determinação dos tempos de partida e parada para a execução de todas as tarefas.

No estabelecimento da fabricação, problemas de programação da produção têm uma terminologia associada relativamente geral.

Um recurso é definido com sendo um material num estado específico ou, alternativamente, qualquer coisa que é de valor e bem definida para o envolvimento individual com um problema de programação da produção. Uma tarefa é uma ação na qual recursos de entrada e saída são uma função do tempo. Uma receita se refere a uma rede de tarefas que devem ser executadas para produzir um produto. O recurso entrada/saída padrão é comumente referido como uma relação de materiais. O padrão específico de recursos de entrada e saída é facilitada de acordo com um parâmetro conhecido como a extensão de uma tarefa. Para uma tarefa representando produção em batelada, a extensão é comumente referida como o tamanho da batelada, e para produção contínua a extensão é comumente chamada da taxa. Um atributo chave associado com uma tarefa é o conjunto de equipamentos permitidos nos quais ela pode ser executada e um conjunto de equipamentos auxiliares nos quais devem estar disponíveis num dado padrão de tempo para executar a tarefa. O tempo de processamento das tarefas indica a quantidade de tempo que um equipamento permitido para executar a tarefa esta ocupado se a tarefa é executada nele.

Uma tarefa pode ter muitos outros atributos associados, tais como um custo fixo para a execução da tarefa, custo variável que é medido com a extensão, etc. Um recurso é classificado como renovável se ele está ocupado enquanto a tarefa é executada, mas é restaurado para ser usado uma vez que a tarefa termina. Um recurso é classificado como não-renovável quando a execução da tarefa muda o nível do recurso. Um gráfico de receita é uma coleção de recursos, tarefas, e equipamentos que são necessários para definir um problema de programação da produção de processo. Um Gráfico de Gantt é um diagrama da ocupação do equipamento no qual o tempo é a ordenada e a abscissa tem uma entrada para cada equipamento. Uma campanha é um intervalo de tempo durante o qual uma ou mais linhas de produção são reservadas para produzir um conjunto específico de produtos (Applequist *et al*, 1997). O Apêndice C apresenta com mais detalhes a utilidade e o significado dos Gráficos de Gantt.

Na visão desta terminologia básica para descrever problemas de programação da produção de processos, a seguinte terminologia é usada para descrever soluções para estes problemas. Um programa é a definição de um conjunto tarefas a serem realizadas nos equipamentos permitidos, os tempos de execução das tarefas e a extensão de cada tarefa. Um programa possível é aquele que satisfaz todas as restrições de fabricação incluindo balanço de material, a demanda de produtos, limitações de inventários e recursos, e critério definido pelo usuário tais como, comprimento de campanha, comprimento mínimo de corrida, etc. Um programa é possível se todas as restrições são satisfeitas e impossível se mesmo uma única restrição é violada. Um programa ótimo refere-se a um programa que é possível e tem a melhor avaliação possível com relação a uma função objetivo: maximização do lucro ou minimização dos custos de produção. Em geral, o único modo de garantia de que um programa é ótimo é usando técnicas de programação matemática que fornece uma comprovação da qualidade do programa (Applequist *et al*, 1997).

2.4 Uma Visão Geral da Tecnologia de Planejamento e Programação de Produção

Passado três décadas, uma variedade de abordagens computacionais tem sido desenvolvida para resolver problemas de programação da produção em resposta às necessidades de indústrias diferentes. Os vários métodos podem ser classificados com base em duas estratégias: (i) abordagem exata ou baseada em otimização que encontram uma solução ótima ou próxima da ótima, em conjunto com uma medida de sua qualidade, e (ii) métodos de solução heurística que procura uma solução adequada com razoável esforço

computacional. As abordagens de otimização são baseadas numa programação matemática. Em cada decisão de programação da produção é escolhida uma variável e todas as restrições operacionais estão expressas como equações ou inequações em termos destas variáveis. A função objetivo, que mede o desempenho expresso em termos de variáveis de decisão, freqüentemente, é posta em termos econômicos, como por exemplo, maximizar a soma da renda menos os custos de operação. Um conjunto específico de variáveis, restrições e função objetivo usadas para representar um problema de programação da produção é chamado de formulação. Um algoritmo de solução é um procedimento numérico que resolve uma formulação pela determinação de um conjunto de valores de variáveis de decisão que produz o valor ótimo da função objetivo.

Segundo Applequist *et al* (1997), as abordagens heurísticas podem ser subdivididas em quatro famílias:

1. Métodos baseados em regras os quais deduzem das observações empíricas e experiências para construir uma programação da produção.
2. Heurísticos guiados por restrições que procuram soluções satisfazendo restrições de problemas tais como níveis de produção, datas devidas, necessidades de processos físicos, e preferências operacionais.
3. Buscas aleatórias incluem *simulated annealing* e algoritmo genético. Estes métodos mudam repetidamente a solução ao acaso, retêm mudanças favoráveis, e aceita algumas mudanças desfavoráveis para explorar um conjunto diverso de soluções possíveis.
4. Abordagens baseadas em simulação na qual programas são derivados empiricamente pelo uso de um evento discreto dirigindo a simulação da planta. Com cada tentativa de programação ou regra resolvida, a simulação é executada sobre o tempo e o resultado avaliado é então rejeitado, modificado, ou aceito.

Alguns métodos heurísticos fazem uso de uma explícita representação matemática do problema enquanto outras operam diretamente sobre os dados do problema, sem usar um formalismo matemático explícito.

2.4.1 Abordagens Baseada em Otimização

A abordagem baseada em otimização usa modelos de programação matemática para representar problemas de programação da produção e planejamento da produção, tal como a Programação Linear (PL). A Programação Linear Inteiro Mista (PLIM), ou Programação

Não Linear Inteiro Mista (PNLIM) também podem ser usadas dependendo se as variáveis de decisão são contínuas e se as funções do modelo são lineares (PL). Se for o caso, da variável de decisão inclui variáveis de valor inteiro, mas as funções do modelo são lineares (PLIM). Além disso, se alguma função do modelo é não linear e envolve variáveis inteiras tem-se o problema formulado em Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM). Um conjunto de métodos numéricos computacionais, árvores de decisão e técnicas de decomposição são usadas para resolver este tipo de problemas (Applequist et al, 1997).

O modo clássico de resolver problemas PLIM é usar a estratégia *branch-and-bound*. Dessa forma, o problema PLIM é relaxado para permitir que as variáveis inteiras 0 ou 1 assumam valores contínuos e o problema resultante na forma de programação linear é resolvido para obter limites sobre a solução ótima para o problema original. Então ramificações tomam lugar pela escolha das variáveis binárias que tem um valor não inteiro na solução relaxada e, alternativamente fixando ele para 0 ou 1, resolvendo o problema relaxado resultante modificado, ramificando sobre outras variáveis não inteiras remanescente. Esta ramificação é aplicada repetidamente até que todas as variáveis binárias assumam os valores 0 ou 1. No caso de minimização, cada solução do problema relaxado produz um limite inferior sobre o valor ótimo da função objetivo do PLIM original, enquanto cada solução inteira possível produz um limite superior. Deste modo, o valor ótimo atual é continuamente equiparado durante o processo de solução, e o procedimento pode ser finalizado quando a divergência entre os limites superior e inferior torna-se suficientemente pequenos.

Embora a formulação PLIM forneça soluções ótimas para problemas de programação da produção, o processo de solução pode necessitar de tempo de computação excessivo para resolver problemas de campo de ação prático. Assim, várias estratégias são empregadas para reduzir os tempos de solução. Estas incluem melhoramentos no processo *branch-and-bound*, reformulação do problema PLIM que leva as relaxações PL que inerentemente produz limites inferiores melhores, e técnicas de decomposição sob as quais o problema de programação da produção é dividido dentro de vários subproblemas cada um dos quais mais fáceis de resolver do que o PLIM original.

Uma necessidade da tecnologia de programação da produção é que o sistema deveria produzir soluções de confiança, necessitar de pequeno treinamento e esforço, e oferecer a habilidade para aproveitar-se de capacidades mais sofisticadas. A programação matemática garante soluções ótimas para os problemas de programação da produção assim como fornece limites sobre a solução ótima. Os *softwares* disponíveis hoje tornam isto possível

tanto que os poderes da programação matemática podem ser explorados muito facilmente sem expor uma formulação vigorosa: linguagens tais como RCSPec acelera a definição do problema, e interfaces gráficas tais como os Gráficos de Gantt torna a solução compreensível. Estas ferramentas facilitam a implementação de objetivos e restrições de programação da produção e planejamento da produção. Por causa destas vantagens, sistemas de programação da produção empregando programação matemática estão tornando-se mais populares nas indústrias e meios acadêmicos como constatado pelo aumento exponencial na quantidade de pesquisa nesta área.

Contudo o grande tempo computacional necessário para obter soluções ótimas para as formulações é apenas o principal problema que precisa ser superado no futuro, através do aumento da velocidade do *hardware* do computador e desenvolvimento de novas técnicas para resolver problemas.

2.4.2 Abordagens Heurísticas de Programação da Produção

Nesta seção discutiremos abordagens de solução heurística para problemas de programação da produção. Elas incluem métodos construtivos usando regras e conhecimentos básicos, busca guiada por restrições e métodos aleatórios tais como *simulated annealing* e algoritmo genético.

2.4.2.1 Programação da Produção Baseado em Regras

Sistemas de programação da produção inteligentes frequentemente fazem uso de regras para apresentar uma programação da produção possível que satisfazem metas bem claras. A motivação atrás da programação da produção baseado em regras é simular o comportamento da tomada de decisões humanas por tentativa para expressá-las em termos de um conjunto de regras. Nas programações humanas as tomadas de decisão são baseadas num banco de dados de conhecimento sobre produtos, clientes, equipamentos de processos e recursos, assim como seus anos de experiência. Em muitos casos, eles podem chegar próximo de um programa ótimo (Applequist et al, 1997).

Programação da produção baseado em regras é especialmente adequado quando há uma pessoa ou grupo com um método de programação da produção existente já na empresa e a meta é ajudá-los a serem mais efetivos com suas tarefas pelo aumento da velocidade com a qual eles podem analisar alternativas. Isto porque novas regras podem ser

adicionadas muito facilmente ou quando programas já existentes precisam ser ajustados manualmente ou quando o programa é usado para ajudar o analista (um programador humano) na tomada de decisão. Novas regras podem ser adicionadas como necessidades para serem responsáveis por mudanças nas políticas da empresa e meios de produção. Uma desvantagem importante dos sistemas baseados em regras é que programas ótimos não são garantidos. Regras diferentes resultam em programas diferentes, assim o desempenho de um sistema depende das regras escolhidas. Quando um programa com essa abordagem é desenvolvido não se pode afirmar que o mesmo é bom ou não, uma vez que nenhum limite sobre os objetivos é avaliado.

Desenvolver uma regra básica apresenta algumas dificuldades. Embora dois meios de produção não sejam os mesmos, as regras desenvolvidas são específicas para cada caso e diferentes regras precisam ser definidas para diferentes meios de produção.

Apesar do seu uso fácil, uma vez que as regras estão definidas, sistemas de programação da produção baseado em regras são raramente usados sozinhos na indústria química, mesmo que eles possam ajudar um programador humano nas tomadas de decisão. Eles não garantem soluções ótimas, e a estrutura combinatorial do problema torna difícil de encontrar programas possíveis. Embora o objetivo e as restrições sejam definidos por regras, para apresentar com um programa possível, algoritmos de busca costurados precisam ser usados ao invés de uma busca aleatória. Regras são geralmente usadas em conjunto com uma metodologia diferente: busca guiada por restrições, assunto da próxima seção.

2.4.2.2 Programação da Produção Guiada por Restrições

Programação da produção guiada por restrições representa uma filosofia totalmente diferente da programação matemática e métodos de busca heurística. Uma busca guiada por restrições avalia as restrições relevantes para testar um programa candidato ou a impossibilidade ou a quantidade de liberdade disponível com as restrições. Uma função avaliadora fornece uma medida de desempenho para determinar a aceitabilidade dos programas e sugere direções para melhoramento. Por exemplo, se datas devidas são importantes, o avaliador põem mais peso sobre o período de diminuição da atividade do programa. Restrições são impostas em vários níveis do processo de produção, de gerenciamento de decisões para operações diárias. Assim um conjunto de metas altamente inconsistente poderá confundir um programador humano, e como resultado, várias

tecnologia guiada por restrições tem nascido nas duas últimas décadas (Applequist *et al*, 1997).

As restrições nesta estrutura incluem:

1. Restrições Organizacionais: metas baseadas nas informações usadas mais frequentemente pela gerência. Elas incluem a determinação de datas devidas, reservando trabalho-em-processo (*work-in-process* - WIP) inferior, minimizando custos e encontrando metas de produção geral.
2. Restrições Físicas: se referem ao o tempo de processamento e a compatibilidade de tarefas com diferentes tipos de equipamentos.
3. Restrições Casuais: se refere à sequência precedente ou requerida de tarefas e os recursos necessários.
4. Disponibilidade de Restrições: os limites macroscópicos sobre os recursos de material e a disponibilidade ou pontualidade do equipamento.
5. Restrições Preferenciais: alternativas preferidas pelos equipamentos para usar certas tarefas e para processar sequências.

As restrições são manuseadas numa hierarquia, incluindo níveis separados para seleção de pedido, análises de capacidade, análises de recurso e escolha de recursos detalhados.

2.4.2.3 Métodos de Simulação

Como o nome implica, abordagens baseadas em simulação para programação da produção, usam um modelo de aplicação de simulação discreta como um substituto para o sistema que está sendo programado. Tendo construído a simulação, é deixado ao usuário pelo seu próprio estratagemas propor e testar programas alternativos e assim surgir um bom programa por tentativa e erro. Como uma variação, a seleção de regras liquidadas poderiam ser empregadas para facilitar a geração de candidatos a programas. Deste modo busca baseada em regras é combinado com simulação. Novamente a limitação desta abordagem essencialmente empírica e que não há garantias da qualidade ou possibilidade de solução e não há métodos sistematicamente conhecidos para converter programas impossíveis para possíveis.

2.4.3 Comparação de Metodologias de Solução

As seções anteriores avaliaram vários métodos de solução de problemas alternativos relacionados à programação da produção. A escolha de um método para resolver um problema de uma situação particular depende de vários aspectos. Pode-se destacar como aspectos importantes, os seguintes: a meta do programador, a complexidade do problema e a qualidade da solução.

As metas a serem encontradas por um programa representam uma diferença significativa entre (a) os métodos baseados em regras e restrições e (b) as buscas aleatórias e formulações de programação matemática. Nos métodos classe (a), as regras, restrições, e linhas guia representam as metas: as metas mais importantes são, tipicamente, evitar conflitos para recursos e terminar o trabalho no tempo. O procedimento de construção do programa procura uma solução possível trabalhando em direção a estas metas, frequentemente negocia uma meta para outra. Uma importante entrada para o usuário é a preferência relativa de uma meta sobre outra. Tais preferências são um tanto grosseiras porque o lucro global de um negócio particular não pode ser quantificado no início. Métodos do tipo (b) avaliam programas candidatos baseado numa função objetivo, e restrições são usadas para domínio restrito da busca para o objetivo (Applequist *et al*, 1997).

Uma característica desejável de um sistema de programação da produção é a capacidade de incorporar restrições adicionais com facilidade. O sistema baseado em regras tem uma deficiência a este respeito, uma vez que as decisões são tomadas com base na informação local envolvendo partes diferentes do sistema. A adição de complexidade por restrições leva o programador, baseado em regras, a gerar programas ineficientes. Dificuldades com restrições complexas também limita o alcance da busca aleatória uma vez que muitas soluções impossíveis são avaliadas e descartadas. A programação matemática pode acomodar naturalmente restrições, contanto que elas sejam lineares e que um razoável número delas possa modelar o problema.

Uma característica comum de abordagens de otimização e heurística é que estas necessitam de uma representação determinística de restrições e do objetivo. Mas na prática, muitas informações experimentais são necessárias. Uma crítica nivelada a estes métodos é que a função objetivo não pode considerar completamente as diversas metas conflitantes, e o custo de falhas e pequenas quedas são incertos. Se a mistura do produto desejado é incerta, a capacidade de produção de um produto fácil de produzir não será bem definida.

Julgamento sobre riscos são difíceis de quantificar, por exemplo, a distribuição de matéria-prima pode não ocorrer quando necessária ou na quantidade desejada. O custo das falhas para encontrar metas tais como datas devidas são frequentemente indeterminadas. Tais incertezas afetam inteiramente o problema de programação da produção. Uma dificuldade adicional é que algumas restrições de recursos (incluindo tempo, mão-de-obra e materiais) podem ser complexas para modelar e podem introduzir restrições numerosas, não lineares ou mesmo não convexas, gerando um problema de otimização extremamente complexo.

A qualidade de um programa pode ser medida de diversas maneiras e cada metodologia de programação fornece uma medida diferente. O valor da função objetivo obtida por programação matemática fornece uma boa base para comparar programas sob condições determinísticas. Se a solução dada não é provavelmente a ótima, o método *branch-and-bound* fornece também limites inferior e superior da solução ótima. Dessa forma o desvio máximo da otimalidade será conhecido. Uma desvantagem das buscas aleatórias é que elas não provam que uma solução boa será encontrada. A busca guiada por restrições usa uma função de avaliação que mede a liberdade para variação no programa: entre dois programas possíveis, o mais distante das restrições descritas é desejado porque ela poderia ser mais robusta num meio incerto: por exemplo, se há mais folga com datas devidas, pedidos urgentes podem ser acomodados mais facilmente.

2.5 Incertezas no Planejamento e Programação de Produção

Segundo Shah (1998) fontes de incertezas podem grosseiramente ser divididas em:

1. incertezas de curto prazo tais como: variações no tempo de processamento, ordens de serviço, falhas de bateladas, quebras de equipamentos;
2. incertezas de longo prazo tais como: tendências de mercado, mudanças de tecnologia, etc.

Tradicionalmente, incertezas de curto prazo têm sido tratadas através de programação da produção em linha ou reativo, onde programas são ajustados para levar em conta as novas informações. Incertezas de longo prazo têm sido tentado resolver através da solução de problema de programação estocástica.

Muitos dos trabalhos nesta área estão baseados em modelos no qual demandas de produto são assumidas como sendo incertas e para diferenciar diversos períodos de tempo. Geralmente, uma representação única do plano de capacidade é assumida, e a sofisticação do trabalho diz respeito à implementação dos algoritmos de planejamento estocástico

(“aqui e agora”) e quantidades de produção potencial na realização de demandas possíveis diferentes em períodos diferentes.

Em planejamento relativo em longo prazo, é razoável introduzir graus adicionais de liberdade associado com capacidade potencial em expansão.

2.6 Planejamento e Programação da Produção de Campanha

Vários algoritmos para o problema de planejamento e programação da produção de campanha já foram apresentados na literatura especializada. O problema de planejamento e programação da produção para plantas multipropósito operando em modo de campanha foi primeiro tratado por Mauderli e Rippin (1979). Estes autores assumiram que receitas de produtos consistem de arranjos seriais de etapas de processamento com uma política de transferência sem espera (ZW), sendo o objetivo otimizar a distribuição de equipamentos para tarefas. O procedimento hierárquico apresentado por esses autores começa pela consideração de caminhos seguidos por bateladas de um único produto através da planta, usando equipamento paralelo, primeiro em fase, e então fora de fase, para remover gargalos onde eles ocorrem. Este procedimento gera um conjunto de possibilidades de linhas de produção para o produto individual. Duas ou mais de tais linhas podem ser então combinadas para formar uma campanha contanto que não haja sobreposição no equipamento usado por elas. Muitas campanhas alternativas podem ser formadas desta maneira, e um procedimento de seleção foi empregado para determinar um conjunto de campanhas dominantes. Finalmente, uma etapa de planejamento da produção determina a distribuição do tempo de produção disponível entre as campanhas dominantes. Na etapa de formação de linhas de produção, o procedimento conta com uma enumeração exaustiva de várias alternativas, junto com regras para eliminar as alternativas ineficientes. As desvantagens deste trabalho são a ineficiência do procedimento de geração e o menor nível de utilização de recursos acarretada pelas campanhas de produto único.

Birewar e Grossmann (1990) apresentaram um modelo PL multiperíodo para o simultâneo planejamento e programação da produção de longo-prazo de plantas batelada multiproduto que compreende uma ou várias linhas paralelas. Cada linha consiste de várias etapas de processamento com uma unidade por etapa. O horizonte de tempo foi dividido em intervalos de produção de duração variável para os quais bateladas podem ser atribuídas. Limitações da programação da produção para campanhas de produto único com

política ZW e campanha de produto misto com políticas ZW e UIS podem ser derivados do modelo.

Uma abordagem diferente para planejamento e programação da produção de campanha foi proposta por Shah e Pantelides (1991) que apresentaram uma formulação de nível único para a solução simultânea dos problemas de formação de campanha e planejamento de campanha de longo-prazo. A formulação foi restrita para redes de processamento serial operando num modo ZW, mas leva em conta a disponibilidade limitada de utilidades e capacidade de armazenagem para intermediários estáveis armazenados entre campanhas. O problema foi formulado como um PLIM que considera simultaneamente a distribuição de unidade tarefa e o ajustamento do tempo das etapas de produção e foi resolvido por uma técnica *branch-and-bound* modificada. Várias suposições limitantes e simplificações foram feitas a fim de manter a linearidade nas formulações. Assim, a operação de equipamento paralelo foi limitada para o modo em fase, enquanto restrições sobre armazenagem intermediária e disponibilidade de utilidade foram substituídas para formas lineares que, embora sempre mantenha a real possibilidade de operação, pode super restringir o problema em alguns casos. Todas estas deficiências podem ser remediadas se estiverem dispostos a aceitar o peso adicional de resolver um MINLP não convexo em vez de um problema PLIM mais simples.

Uma formulação geral para os problemas de programação da produção de curto-prazo de operações bateladas multipropósito, foi apresentada por Kondili *et al.* (1993). A extensão da formulação permite produzir programas cíclicos adequados para operação do modo de campanha. O problema foi formulado matematicamente como um modelo PLIM baseado numa representação discreta do tempo. Ainda neste trabalho, foi levada em conta a distribuição flexível de equipamentos, tamanhos de batelada variável e políticas de armazenagem de intermediários mistas envolvendo ambos os tanques de armazenagem reservado e multipropósito, também foi acomodado à disponibilidade limitada de matéria prima, ambos no começo e durante o horizonte de tempo de interesse. A distribuição de produto pode ter lugar em qualquer tempo durante o horizonte, e as quantidades envolvidas podem ser fixas ou variáveis. O uso de utilidades pelas várias tarefas pode alterar completamente o tempo de processamento da tarefa, e pode ser constante ou proporcional ao tamanho da batelada. A disponibilidade e/ou custo de utilidade pode variar no horizonte de tempo de interesse. Uma medida geral de desempenho econômico da planta é usada como função objetivo neste artigo. A principal dificuldade desta formulação é o tamanho

do problema PLIM resultante. Mesmo a solução de um pequeno exemplo pode envolver grande número de variáveis binárias e pode requerer de grande esforço computacional.

Shah *et al.* (1993a) propuseram medidas para modificar tanto as formulações quanto os procedimentos de solução *branch-and-bound*. Estas técnicas incluem a reformulação da restrição de distribuição cujo principal objetivo é estreitar o relaxamento da PL do PLIM de modo que o último possa ser resolvido com tão poucas PLs quanto possível. Além disso, eles mostraram como as variáveis binárias e uma grande proporção das restrições podem ser eliminadas do relaxamento da PL do PLIM. Assim resultando em um problema muito menor para ser resolvido em cada nó do procedimento *branch-and-bound* e uma terceira técnica é o procedimento de análise de solução que tenta maximizar a integralidade da solução relaxada obtida durante a busca *branch-and-bound* sem afetar o valor da função objetivo. Embora isto não seja necessariamente executado num modo ótimo, o resultado líquido destas técnicas é uma substancial economia no número de PLs que tem que ser resolvido. Uma quarta técnica é o uso de uma margem de otimalidade cuja eficiência depende do vazio de integralidade da formulação. Se as soluções inteira e relaxada da função objetivo difere por uma quantidade menor do que a margem, a busca terminará logo que a solução inteira é encontrada. Já que uma grande proporção do esforço computacional da *branch-and-bound* pode ser a verificação da solução ótima, uma margem de otimalidade junto com um pequeno vazio de integralidade intensifica o desempenho do procedimento de solução significativamente. Estas diferentes medidas foram comparadas usando uma variedade de exemplos a fim de avaliar sua eficiência em ambos os termos absoluto e relativo.

Ainda m seu artigo, Shah *et al.* (1993b) estenderam a formulação de Kondili et al. (1993) para programação da produção cíclica, onde o mesmo programa é repetido numa frequência para ser determinado como parte da otimização. No contexto da operação em modo campanha, o problema pode ser visto como derivando um programa periódico ótimo para uma campanha única envolvendo um dado produto ou combinação de produtos e não precisa ser feita distinção entre os casos de campanha de produto único e múltiplo. O problema é formulado como um PLIM e leva em conta aspectos tais como equipamento multipropósito usado mais do que uma vez num ciclo, política de armazenagem mista, divisão e mistura de batelada e limitação de utilidades. A solução do PLIM é ampliada por técnicas desenvolvidas por Shah *et al.* (1993a) para a solução de programação da produção de curto-prazo. O artigo lida com duas características do método de solução que são específicas para programas periódicos: primeiro determinar o tempo de ciclo ótimo e

segundo reduzir os efeitos da degenerância cíclica inerente a todas as soluções periódicas. A formulação apresentada é apropriada para a otimização de plantas que permanentemente produzem o mesmo conjunto de produtos. Além disso, pode servir como uma ferramenta para construir campanhas ótimas de produto único no contexto de planejamento e programação da produção de plantas batelada operando no modo de campanha e campanhas de produto múltiplo também podem ser construídas desde que a estrutura da campanha seja especificada.

Papageorgiou e Pantelides (1996a) apresentaram uma formulação matemática para problemas gerais de planejamento e programação da produção de campanha. No artigo são levadas em conta muitas características gerais do processo batelada tais como ciclos de material, intermediários compartilhados, políticas de armazenagem mista, recursos limitados e flexibilidade na operação de unidades paralelas. Além disso, restrições não são impostas *a priori* sobre a possível estrutura de campanha que é determinado automaticamente pela formulação levando em conta todos os fatores relevantes tais como a disponibilidade de capacidade de armazenagem suficiente para armazenar grandes quantidades de intermediários produzidos em uma campanha para o consumo numa mais tarde, o custo de manter configurações de inventário, a demanda de produto e disponibilidade de matérias primas, e a relativa duração e custos de limpeza de equipamento numa campanha e intercampaña nas reconfigurações de plantas. Assim algumas das limitações chave das abordagens anteriores foram superadas. Naturalmente, a formulação apresentada também caracteriza algumas das limitações de outras formulações com modelo de tempo discreto, e em particular a necessidade para fina discretização que pode potencialmente levar a problemas de grande tamanho. Além disso, a suposição de um tempo de ciclo fixo em cada campanha pode levar a soluções subótimas em alguns casos. O problema tem sido formulado como um PLIM, levando em conta ambos os aspectos de planejamento e programação da produção simultaneamente. A idéia de ter programas cíclicos em cada campanha constitui um modo conveniente para formular nosso problema num modo similar ao descrito por Shah et al. (1993b).

Como esperado, a consideração simultânea de todas as decisões possíveis resulta sem dúvida numa maior formulação PLIM que pode ser uma ordem de magnitude maior do que formulações similares para problemas de programação da produção de curto-prazo (Kondili *et al.*, 1993) e periódica (Shah *et al.*, 1993b). Na parte II deste artigo (Papageorgiou e Pantelides, 1996b), apresentaram uma abordagem de decomposição matemática para a solução deste problema. Esta compreende de um problema mestre e um

subproblema. No problema mestre são determinados o número de campanhas ativas, o componente de processamento de tarefas de cada campanha e o alinhamento de possível evento interior com campanhas limites. O problema mestre representa um relaxamento da formulação apresentada na parte I (Papageorgiou e Pantelides, 1996a). No subproblema são determinadas a duração exata e uma operação detalhada do programa da campanha. A formulação do subproblema é essencialmente a mesma daquela apresentada na parte I.

O PLIM descrevendo ambos os problema mestre e o subproblema podem ainda assim serem grandes. Várias técnicas são aplicadas para reduzir seu tamanho e melhorar suas limitações.

2.7 Formulação Matemática para o Problema de Programação da Produção de Curto Prazo

No contexto de sistemas de processo químico batelada, o problema de programação da produção geralmente consiste dos seguintes componentes:

- (i) receitas de produção, que especifica a sequência de tarefas a serem executadas para a fabricação de determinados produtos;
- (ii) disponibilidade de processamento/armazenagem do equipamento;
- (iii) política de armazenagem intermediária;
- (iv) necessidades de produção;
- (v) especificação de recursos, tais como utilidades e mão-de-obra; e
- (vi) um horizonte de tempo de interesse.

O objetivo é determinar um programa que inclua os detalhes de:

- (i) a sequência de tarefas a serem executadas em cada equipamento;
- (ii) o ajustamento de cada tarefa; e
- (iii) a quantidade de material a ser processado, isto é, o tamanho da batelada, para cada tarefa.

O desempenho de um programa é medido com um ou mais critérios, por exemplo, o lucro global, o custo operacional, e o tempo de complementação das tarefas (*makespan*).

A formulação de programação com tempo discreto faz uso do conceito de discretização. O horizonte de tempo de interesse é dividido em um número de intervalos de tempo de duração uniforme. O início ou fim de uma tarefa e outros eventos importantes são associados com os limites destes intervalos de tempo.

Uma formulação de tempo discreto para a programação de processos químicos batelada baseada na representação STN foi proposta por Kondili *et al* (1993). Em sua formulação, as variáveis chave de decisão, W_{ijt} , são introduzidos para dar conta da atribuição de unidades às tarefas. Esse conjunto de variáveis binárias determina se uma tarefa (i) começa ou não na unidade (j) no começo do intervalo de tempo (t) e é formulada a seguinte restrição de distribuição, para expressar a restrição que para qualquer unidade, no máximo uma tarefa pode começar no início de cada intervalo de tempo.

$$\sum_{i \in I_j} W_{ijt} \leq 1, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (2.1)$$

onde I_j é o conjunto de tarefas que podem ser executadas na unidade (j). Além disso, se uma tarefa começa numa unidade num intervalo de tempo, nenhuma outra tarefa pode começar na mesma unidade até que esta tarefa seja terminada. Esta exigência é aplicada como segue:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t'=t}^{t+\alpha_{ij}-1} W_{i'jt'} - 1 \leq M(1 - W_{ijt}) \quad \forall j \in J, i \in I_j, t \in T, \quad (2.2)$$

Sendo α_{ij} o tempo de processamento fixo da tarefa (i) na unidade (j) e M um número positivo suficientemente grande.

Além das variáveis binárias, os dois conjuntos seguintes de variáveis contínuas são também importantes. B_{ijt} representa a quantidade de material que começa sofrer a tarefa (i) na unidade (j) no intervalo de tempo (t), e S_{st} determina a quantidade de material no estado (s) durante o intervalo de tempo (t). O tamanho de batelada de uma tarefa está relacionado à correspondente variável de atribuição através da restrição de capacidade como segue:

$$W_{ijt} V_{ij}^{\min} \leq B_{ijt} \leq W_{ijt} V_{ij}^{\max} \quad \forall i \in I, j \in J_i, t \in T, \quad (2.3)$$

Sendo V_{ij}^{\min} e V_{ij}^{\max} as capacidades mínima e máxima da unidade (j) para a tarefa (i), respectivamente. O balanço de massa pode ser expresso efetivamente pelo estabelecimento de relação entre os níveis de estoque em dois intervalos de tempo consecutivos através da seguinte restrição:

$$S_{st} = S_{s,t-1} + \sum_{i \in I_s^p} \rho_{is}^p \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t-\alpha_{is}} - \sum_{i \in I_s} \rho_{is}^c \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t} + R_{st} - D_{st}, \quad \forall s \in S, t \in T, \quad (2.4)$$

Sendo I_s^p e I_s são os conjuntos de tarefas que produzem e consomem o estado (s), respectivamente; ρ_{is}^p e ρ_{is}^c são as frações do estado (s) produzido e consumido pela tarefa (i), respectivamente; J_i é o conjunto de unidades adequadas para a tarefa (i); α_{is} é o tempo

de processamento para o estado (s) pela tarefa (i). R_{st} é a quantidade do estado (s) recebido de fontes externas no intervalo de tempo (t) e a variável D_{st} representa a quantidade de estado (s) entregue no intervalo de tempo (t). A restrição sobre armazenagem de um material no estado é então representado simplesmente como limites superiores sobre as variáveis S_{st} :

$$0 \leq S_{st} \leq C_s \quad \forall s \in S, t \in T, \quad (2.5)$$

Sendo C_s a capacidade de armazenagem limitada para o estado (s).

Durante o horizonte de tempo de interesse, certos equipamentos podem tornar-se temporariamente indisponíveis devido à manutenção ou quebras. Isto pode ser levado em conta simplesmente pela fixação de um apropriado subconjunto de variáveis W_{ijt} para zero. Se o equipamento j está indisponível entre os tempos t_1 e t_2 ($t_2 > t_1$) então pode certamente não começar processando qualquer tarefa no começo do intervalo t_1 a $t_2 - 1$. Além disso, o item já deve estar ocioso no tempo t_1 , que implica que não deve ter começado qualquer tarefa i em qualquer tempo depois de $t_1 - \alpha_{ij} + 1$. Estas necessidades são transformadas nas simples restrições:

$$W_{ijt} = 0 \quad \forall i \in I_j, t = t_1 - \alpha_{ij} + 1, \dots, t_2 - 1 \quad (2.6)$$

Diferentes medidas da qualidade da solução podem ser usadas para problemas de programação da produção. No entanto, o critério selecionado para a otimização geralmente tem um efeito direto sobre o desempenho do modelo computacional. Além disso, algumas funções objetivos podem ser muito difícil de implementar para algumas representações de eventos, necessitando de variáveis adicionais e restrições complexas.

O principal critério usado no presente estudo é a maximização do lucro. O lucro pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} \text{lucro} = & \text{valor do produto} - \text{custo da alimentação} - \text{custo de estocagem} \\ & - \text{custo de utilidades} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Cada um destes termos do lucro é quantificado abaixo:

$$\text{valor dos produtos} \equiv \sum_s \left(C_{s,H+1} S_{s,H+1} + \sum_{t=1}^H C_{st} D_{st} \right) \quad (2.7a)$$

sendo C_{st} é o preço unitário associado com o material no estado (s) no tempo (t). Notamos que a expressão (2.7a) inclui ambos o valor do material deixado armazenado na planta no final do horizonte, e o valor do material distribuído para clientes durante o horizonte.

Se é indesejável para material em certos estados (intermediário) serem deixados em estoque no final do horizonte de tempo, isto pode ser evitado ou pela fixação do correspondente $C_{s,H+1}$ para grandes valores negativos, ou por explícita adição da restrição $S_{s,H+1} = 0$ para a formulação matemática.

$$\text{Custo do estoque de alimentação} \equiv \sum_s \left(C_{s0} S_{s0} + \sum_{t=1}^H C_{st} R_{st} \right) \quad (2.7b)$$

Novamente, ambos os valores do inventário inicial, e o custo do material recebido durante o processamento são levados em conta. Vale notar aqui que a quantidade R_{st} e D_{st} pode ser ou fixo a priori ou permitido variar, sujeito aos limites superiores dados. No último caso, o algoritmo determinará o programa ótimo obtido de estoques de alimentação e/ou distribuição de produtos, levando vantagem de algum preço, disponibilidade e variações de demanda com o tempo e explorando o local disponível para estoque para o melhor grau possível. O algoritmo de custo permitindo esta flexibilidade adicional é mínima, embora ambos R_{st} e D_{st} são variáveis contínuas ocorrendo linearmente nas restrições na função objetivo.

$$\text{Custo de armazenagem} \equiv \sum_s \sum_{t=1}^H C_{st}^s S_{st} \quad (2.7c)$$

Sendo C_{st}^s os custos de armazenagem de uma quantidade unitária de material no estado (s) sobre o intervalo partindo no tempo (t). Tal custo pode, por exemplo, ser incorrido se instalação de armazenagem refrigerada ou aquecida são necessárias para certos estados.

$$\text{Custo de utilidades} \equiv \sum_u \sum_{t=1}^H C_{ut}^U U_{ut} \quad (2.7d)$$

Aqui C_{ut}^U é o custo unitário da utilidade (u) no intervalo de tempo (t).

A principal vantagem da representação de tempo discreto é que ele fornece uma grade de tempo de referência para todas as operações competindo por recursos compartilhados. Isto possibilita a formulação de várias restrições no problema de programação da produção de uma maneira relativamente simples e leva normalmente a problemas de programação matemática bem estruturado. Entretanto, a abordagem de tempo discreto tem duas limitações principais: a aproximação discreta do tempo e o grande tamanho dos problemas PLIM resultante. Devido à natureza contínua do tempo e o conceito de discretização, as formulações de tempo discreto são por definição apenas uma aproximação do problema real. Além do mais, uma das questões chaves desta abordagem é a seleção da duração do intervalo de tempo, que sempre apresenta uma troca entre a

qualidade da solução e a exigência computacional. Se um esquema de discretização grosseiro é usado, o tamanho do problema pode ser tratável, mas há uma perda inevitável da precisão do modelo e resulta por definição em soluções subótimas. Por outro lado, se um intervalo de tempo pequeno é usado para alcançar um desejável grau de precisão, a abordagem de tempo discreto inevitavelmente leva a problemas combinatoriais muito grande, que são difíceis ou mesmo impossível de resolver, especialmente aplicações práticas média ou grande.

2.8 Formulação Matemática para o Problema de Programação da Produção Periódica

Nesta seção apresentar-se-á a formulação para o problema de programação da produção periódica (Shah *et al* (1993b)).

O modo de operação cíclico é vantajoso devido a repetição das operações num ciclo, facilitando assim a operação da indústria e o entendimento dos operadores. Na operação cíclica, existe um período de tempo necessário no início da operação da planta para que se produza os estados necessários para que a planta opere em ciclo e, também, necessita de um período de tempo no final da operação para que a planta saia do ciclo. Estes períodos de tempo são chamados respectivamente de cabeceira (*head*) e parte traseira (*tail*) do ciclo.

Na formulação periódica assumida neste trabalho, a planta industrial opera num modo na qual a mesma sequência de operação é repetida num ciclo. Considera-se o tempo de ciclo fixo a fim de estabelecer padrões de trabalho, como trabalho em turnos. O ciclo de tempo é considerado como uma sequência de operações que envolve a produção de todos os produtos desejados, bem como a utilização de todos os recursos disponíveis.

A natureza periódica do problema de programação da produção implica que, a fim de determinar o modo ótimo de operação da planta num horizonte de tempo, é suficiente determinar a operação ótima num ciclo. Uma complicação que surge aqui é que a execução de uma ou mais tarefas pode começar no ciclo de interesse e atravessar sua fronteira e terminar no próximo ciclo. Portanto, por causa da periodicidade do programa, uma complicação similar ocorre entre o ciclo de interesse e o anterior. Esta complicação é resolvida ao notar-se que o efeito total é equivalente à extensão da tarefa passar o final do ciclo de interesse notadamente dando a volta (*wrapping around*) para o início do mesmo ciclo. A exploração deste efeito “dando a volta” é a chave desta formulação.

A base da formulação periódica é o trabalho de Kondili *et al* (1993). Para esta formulação utiliza-se o operador cíclico $\tau(\bullet)$, definido por:

$$\tau(t) = \begin{cases} t & \text{se } t \geq 1, \\ \tau(t+T_c) & \text{se } t \leq 0, \end{cases}$$

Onde T_c é o tempo de ciclo.

A restrição de distribuição é baseada na equação (2.2) e usando o operador cíclico na equação para a correta utilização da restrição torna-se:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta=0}^{\alpha_{ij}-1} W_{ij, \tau_c(t-\theta)} \leq 1 \quad \forall j, t = 1, \dots, T_c \quad (2.8)$$

Para formular a restrição de balanço de material, novamente usamos a idéia da tarefa cíclica, deste modo a equação (2.4), torna-se:

$$S_{st} = S_{s,t-1} - \sum_{i \in I_s} \sum_{j \in J_i} \rho_{is} B_{ijt} + \sum_{i \in I_s^p} \sum_{j \in J_i} \rho_{is}^p B_{ij, \tau(t-\alpha_{is})} \quad \forall s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (2.9)$$

As demais restrições e a função objetivo são as mesmas da formulação de curto prazo.

2.9 Formulação Matemática para o Problema de Programação da Produção de Campanha

Nesta seção apresentar-se-á a formulação de Papageorgiou e Pantelides (1996a) para o problema de programação da produção de campanha.

A duração da campanha (c) é igual ao número de ciclos em cada campanha n_c multiplicado pelo tempo do ciclo T_c . Assim, a restrição de tempo de campanha garante que esta duração deve estar dentro de limites específicos conforme equação (2.10).

$$D^{\min} X_c \leq n_c T_c \leq D^{\max} X_c \quad \forall c \quad (2.10)$$

A variável inteira n_c deve ser convertida a um conjunto de variáveis binárias. Se n_c^{\max} é um limite superior, então n_c pode ser substituído pela expressão

$$n_c = n_c^{\min} X_c + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ic} \quad \forall c \quad (2.11)$$

Onde o L_{ic} são variáveis binárias e $r_c = \lceil \log_2 n_c^{\max} \rceil + 1$, isto é, $2^{r_c-1} \leq n_c^{\max} \leq 2^{r_c}$. Assim a variável L_{ic} fornece uma codificação binária da variável inteira n_c .

Ignorando o momento de entrega dos produtos e recebimento de matéria-prima, a quantidade de material BS_{sc}^F no estado s no final da campanha é igual à quantidade de material no começo da campanha BS_{sc}^I mais o acúmulo líquido, $n_c \Delta S_{sc}$, durante a campanha. Portanto, as restrições de balanço de material sobre uma campanha são conforme equação (2.12).

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + n_c \Delta S_{sc} \quad \forall c, s \quad (2.12)$$

A quantidade inicial do material BS_{s1}^I , para cada estado no início do horizonte de tempo é assumido já conhecido.

Note que as restrições (2.12) envolvem um termo não linear no lado direito da equação. A fim de manter a linearidade nesta formulação, devemos substituir este termo por um linear. Das restrições (2.12) e (2.11) obtemos:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ics} n_c^{\min} \Delta S_{sc} \quad \forall c, s \quad (2.13)$$

As restrições resultantes (2.13) ainda envolvem termos bilineares, mas estes podem ser representados na forma bilinear devido à natureza binária de L_{ic} . Em particular introduzimos as variáveis contínuas \hat{S}_{ics} definida como:

$$\hat{S}_{ics} \equiv L_{ic} \Delta S_{sc} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1$$

Esta definição pode ser feita implicitamente através das restrições lineares:

$$L_{ic} \Delta S_{sc}^{\min} \leq \hat{S}_{ics} \leq L_{ic} \Delta S_{sc}^{\max} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (2.14a)$$

e

$$(1 - L_{ic}) \Delta S_{sc}^{\min} \leq \Delta S_{sc} - \hat{S}_{ics} \leq (1 - L_{ic}) \Delta S_{sc}^{\max} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (2.14b)$$

Onde ΔS_{sc}^{\min} e ΔS_{sc}^{\max} são limites, inferior e superior sobre ΔS_{sc} . Para o caso de $L_{ic} = 0$, restrições (2.14a) força as variáveis \hat{S}_{ics} para o valor zero enquanto as restrições (2.14b) tornam-se limites sobre ΔS_{sc} . Por outro lado, se $L_{ic} = 1$, então restrições (2.14a) fornecem limites sobre ΔS_{sc} enquanto restrições (2.14b) são ativas forçando as variáveis \hat{S}_{ics} serem iguais a ΔS_{sc} .

Se recebimento e entrega continua de materiais s tem lugar durante a campanha c , então (2.11) deve ser modificada para:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + n_c \Delta S_{sc} + n_c T_c (r_{sc} - d_{sc}) \quad \forall c, s \quad (2.12')$$

Onde r_{sc} e d_{sc} são as respectivas taxas de recebimento e entrega.

Novamente, substitui-se n_c por sua codificação binária (2.11), introduzindo as novas variáveis:

$$\hat{S}_{ics} \equiv L_{ic} (\Delta S_{sc} + T_c (r_{sc} - d_{sc})) \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1$$

Definida através de uma modificação de (4.14a) e (4.14b):

$$L_{ic} (\Delta S_{sc}^{\min} + T_c (r_{sc}^{\min} - d_{sc}^{\max})) \leq \hat{S}_{ics} \leq L_{ic} (\Delta S_{sc}^{\max} + T_c (r_{sc}^{\max} - d_{sc}^{\min})) \quad (2.14a')$$

$$\forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1$$

e

$$(1 - L_{ic}) (\Delta S_{sc}^{\min} + T_c (r_{sc}^{\min} - d_{sc}^{\max})) \leq \Delta S_{sc} + T_c (r_{sc} - d_{sc}) - \hat{S}_{ics} \leq (1 - L_{ic}) (\Delta S_{sc}^{\max} + T_c (r_{sc}^{\max} - d_{sc}^{\min})) \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (2.14b')$$

Em qualquer caso, usando as novas variáveis \hat{S}_{ics} , podemos reescrever (2.13) na forma linear:

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i \hat{S}_{ics} \quad \forall c, s \quad (2.15)$$

Agora considere-se várias restrições impostas pela disponibilidade limitada de capacidade de armazenagem.

Para estados s estocados em instalações dedicadas, têm-se

$$0 \leq BS_{sc}^I \leq C_s; \quad \forall c, s \quad (2.16a)$$

e

$$0 \leq BS_{sc}^F \leq C_s; \quad \forall c, s \quad (2.16b)$$

As restrições de alocação de equipamentos afirmam que se a campanha existe, então todo equipamento pode desempenhar no mínimo uma tarefa num tempo num modo não pré-emptivo. Isto é escrito como:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta=0}^{\alpha_{ij}-1} W_{ij, \tau_c(t-\theta)}^c \leq X_c \quad \forall c, j, t = 1, \dots, T_c \quad (2.17)$$

Se X_c é igual a um, então as restrições acima leva às restrições descritas por Shah *et al.* (1993a). Por outro lado, se a campanha não existe, então X_c é igual a zero e as restrições (2.16) força todas as variáveis no somatório duplo tenderem para zero.

O tamanho de batelada de uma tarefa está relacionada a quantidade de material, que começa sofrendo a tarefa i no equipamento j no período de tempo t durante a campanha c , é limitada pela capacidade mínima e máxima do equipamento.

$$\phi_{ij}^{min} V_j W_{ijt}^c \leq B_{ijt}^c \leq \phi_{ij}^{max} V_j W_{ijt}^c \quad \forall c, j, i \in I_j, t = 1, \dots, T_c \quad (2.18)$$

As restrições de balanço de material num ciclo afirmam que a quantidade de um estado s mantida em estoque no intervalo de tempo t na campanha c é igual à quantidade correspondente no intervalo $t-1$, mais a quantidade de material adicional no estado s no começo do período de tempo t , menos a quantidade de material removida do estado s no início do período de tempo t . Material adicionado é uma consequência das tarefas i começando no tempo $t-p_{is}$ enquanto a remoção de material do estado s é devido as tarefas começando no início do período de tempo t .

$$S_{st}^c = S_{s,t-1}^c + \sum_{i \in I_s^p} \sum_{j \in J_i} \rho_{is}^p B_{ij, \tau_c(t-\alpha_{is})}^c - \sum_{i \in I_s} \sum_{j \in J_i} \rho_{is} B_{ijt}^c \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (2.19)$$

Note que na segunda somatória do lado direito de (2.18), o operador cíclico $\tau(\bullet)$ deve ser usado como material adicionado a um estado que pode ser produzido a partir tarefas ou no ciclo atual ou no ciclo anterior, abrangendo os dois ciclos consecutivos.

Também restrições de capacidade de armazenamento devem ser impostas em todos os estados dependendo da armazenagem dedicada C_s e disponível para aquele estado:

$$0 \leq S_{st}^c \leq C_s \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (2.20)$$

Uma típica função objetivo, Φ , é a maximização do valor de produtos combinado sobre o horizonte de tempo de interesse, tendo em conta o valor dos produtos, o custo de matérias primas e o valor do material que é recebido e/ou entregue em instantes de tempo distintos e o custo de estoque para todos os diferentes tipos de material.

$$\Phi \equiv \max_s \sum_s \left(v_s (BS_{sN}^{F'} - BS_{s1}^I) \right) - \sum_s \alpha_s \sum_c \left(T_c \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i IN_{ics}^A \right) \quad (2.21)$$

Consideraremos cada um destes itens separadamente:

1) Valor dos produtos e custo de matéria prima

Matematicamente, escreve-se

$$\sum_s \left(v_s (BS_{sN}^{F'} - BS_{s1}^I) \right) \quad (2.22)$$

A somatória acima é, em princípio, sobre todo material s no processo. O termo na somatória multiplica a mudança líquida $(BS_{sN}^{F'} - BS_{s1}^I)$ no estoque de materiais s no horizonte de tempo pelo valor unitário, v_s . Para matéria-prima e produtos finais, este pode ser o preço real de mercado, mas pode ser complexo estabelecer para produtos intermediários. Neste caso, v_s reflete simplesmente se o material s é desejado ou não e

pode depender do grau de processamento (isto é, quão longo é o caminho percorrido da matéria-prima para se transformar em produto final). Para subprodutos indesejáveis, v_s pode ter um valor negativo refletindo o custo de destinação.

2) Custos de inventário

Para determinar o custo de manter inventário precisamos considerar a variação da quantidade de cada material mantido em estoque durante o horizonte de tempo de interesse. O custo de inventário pode ser expressa como:

$$\sum_s \alpha_s \sum_c \left(T_c \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i IN_{ics}^A \right) \quad (2.23)$$

onde α_s reflete o custo de manter o material em estoque em vez de vendê-lo e investir o dinheiro realizado. Esta constante leva em consideração a taxa de juro anual do IR (*interest rate*), e o valor real do estado v_s , isto é.

$$\alpha_s = \frac{IR \times v_s}{365 \times 24}$$

com unidade típica de R\$/Kg.h.

E introduzindo uma nova variável IN_{ics}^A definida como:

$$IN_{ics}^A \equiv L_{ic} \frac{BS_{sc}^I + BS_{sc}^F}{2} \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (2.24)$$

juntamente com as restrições adicionais:

$$\frac{BS_{sc}^I + BS_{sc}^F}{2} - (1 - L_{ic})M \leq IN_{ics}^A \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (2.25)$$

Onde M é um limite superior sobre $\frac{BS_{sc}^I + BS_{sc}^F}{2}$. Isso pode levar ao valor da armazenagem dedicada disponível para o estado s , C_s , ou ser baseado sobre alguma estimativa de capacidade de produção.

3. EMBUTIDOS CÁRNEOS

Com a imigração de famílias européias, alemãs e italianas, para o Brasil, vários costumes foram trazidos e incorporados aos hábitos nacionais. No novo país, devido às condições climáticas e ao paladar nacional, os alimentos trazidos com as colônias de imigrantes sofreram algumas adaptações. Na época, os artesãos foram, aos poucos, transformando sua arte em pequenas fábricas, enquanto os donos de açougues começaram a ousar no processamento industrial de carnes a partir da elaboração do embutido mais simples, a linguiça, que dispensa a preparação de emulsões e equipamentos mais sofisticados. Desde aquela época, muitas foram às modificações sofridas, da produção artesanal às pequenas fábricas e, então, à escala industrial – acompanhando o crescimento da indústria, as mudanças na economia, a integração de mercados. Mais tarde vieram para o Brasil os grandes frigoríficos multinacionais aumentando o volume de carne fresca processada. Conseqüentemente, a produção de embutidos também cresceu, e representa 10% da carne consumida no país. Para que os produtos embutidos mantenham suas propriedades funcionais e permaneçam seguros ao consumidor, o acondicionamento dos mesmos deve ser feito pelo emprego de envoltórios (Coretti, 1997; Pardi *et al.*, 1996).

Os embutidos são classificados em produtos crus curados e produtos crus cozidos em função do processo produtivo na qual são submetidos. Os produtos curados são obtidos através da secagem pelo sal e maturação dos tecidos em ambientes com temperatura e umidade controlados. Os produtos cozidos são obtidos através do tratamento térmico, a seco ou a vapor, dos cortes de carne fresca (Coretti, 1997). Pardi *et al.* (1994), classificam os produtos de salsicharias embutidos em:

- (1) embutidos de massa cozida a seco - de cozimento lento, a seco, em estufas; exemplos: mortadelas e salsichas;
- (2) embutidos de massa escaldada - cozimento rápido, por imersão em água quente; exemplo: morcelas, pastas ou patês;
- (3) embutidos de massa crua ou semi-crua dessecados – com dessecação parcial maturados; exemplo: salames tipo italiano e milano;
- (4) embutidos de massa crua ou semi-crua brandos – menor grau de dessecação, exemplo: salaminho, paio, e;
- (5) embutidos de massa crua ou semi-crua frescos – de consumo imediato e de guarda sob refrigeração, exemplo: linguiças diversas.

Na Legislação brasileira, os produtos cárneos comercializados no país estão regulamentados pela Portaria número 1002 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

(BRASIL, 1998). Essa portaria subdivide os produtos cárneos em:

1. Industrializados

- a. Produtos frescos embutidos ou não (linguiça)
- b. Produtos secos, curados e/ou maturados embutidos ou não (salames, presunto cru, presunto tipo Parma).
- c. Produtos embutidos cozidos ou não (mortadela).

2. Produtos salgados

- a. Produtos salgados e crus (cudeguino)
- b. Produtos salgados cozidos (mortadela, salsichas).

3.1. Matérias-Primas

A produção de embutidos exige uma ampla variedade de ingredientes cárneos e não cárneos, cada um exercendo uma função específica de acordo com a sua propriedade. Dentre os ingredientes cárneos existe uma grande variação da sua composição, devido às variadas fontes das quais essas matérias-primas são obtidas (Guerreiro, 2006). Os ingredientes não cárneos visam modificar as características químicas, físicas e biológicas, de acordo com a formulação do embutido produzido, destacando-se os aditivos, envoltórios, especiarias e condimentos.

3.1.1 Carnes

A carne é constituída principalmente de músculos, gordura e outros tecidos dos animais. As carnes mais usadas pela indústria de embutidos são as de bovino (boi, vaca, vitela), suínos (porco e leitão) e aves (galinha e frango).

3.1.1.1 CMS (Carne mecanicamente separada)

A Carne mecanicamente separada é obtida do processo mecânico de moagem e separação de ossos, carcaças ou partes de carcaças de animais de açougue (aves, bovinos e suínos), destinada à elaboração de produtos cárneos específicos e que tenham sido aprovados para o consumo humano pelo Serviço de Inspeção Federal (SIF), do Ministério

da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), não sendo permitida a utilização de cabeças, pés e patas. Trata-se de um produto resfriado ou congelado. A CMS tem-se expandido muito, principalmente pela facilidade de obtenção dessa matéria-prima: carne de baixo custo, cuja textura pastosa, fina e uniforme, diferente da textura fibrosa da carne desossada manualmente, tem sido predominantemente utilizada na transformação de produtos industrializados (Gouvêa e Gouvêa, 2007), como é o caso da produção da salsicha, que utiliza grandes proporções de CMS de frango.

3.1.1.2 Recorte Bovino e Suíno

Representam as carnes de 2ª categoria utilizadas no processo de fabricação de embutidos. Os recortes magros de suíno e de bovino, o lombo suíno desossado e o bovino apresentam alta capacidade de emulsão e, portanto representam à matéria-prima de maior importância na formulação do produto processado.

3.1.1.3. Gordura e Toucinho

A gordura e o toucinho são usados para dar paladar adequado ao produto, são usados nos teores de 15 a 30%. Os toucinhos de melhor qualidade são os suínos, de cor branca, firmes e sem cheiro. O toucinho deve ser cortado e moído antes de ser colocado no *cutter* durante o processamento da massa fina (Guerreiro, 2006).

3.1.2 Água

O teor de água constitui quantitativamente o componente não cárneo mais importante dos embutidos cozidos. Grande parte da umidade procede da carne magra, porém o fabricante adiciona água a muitos produtos, como parte da receita (Guerreiro, 2006). A água adicionada pode ser substituída por gelo, para manter os componentes do processo em uma temperatura inferior aos 4°C diminuindo o crescimento microbiano. A água, independente da forma como entra no processo, deve ser potável.

3.1.3 Aditivos e Ingredientes

A finalidade dos aditivos e ingredientes como matéria-prima no processo produtivo é garantir que o produto chegue em perfeitas condições ao consumidor, principalmente nos aspectos nutricionais, no sabor, cor, aroma, textura e conservação.

Segundo a Portaria SVS/MS nº 540, de 27 de outubro de 1997, ingrediente é qualquer substância, incluídos os aditivos alimentares, empregada na fabricação ou preparação de um alimento e que permanece no produto final, ainda que na forma modificada. Os ingredientes são utilizados em maiores quantidades e não são, no entanto, sujeitos à legislação alguma. Já o aditivo alimentar é qualquer ingrediente adicionado intencionalmente aos alimentos, sem o propósito de nutrir, com o objetivo de modificar as características físicas, químicas, biológicas ou sensoriais, durante a fabricação, processamento, preparação, tratamento, embalagem, acondicionamento, armazenagem, transporte ou manipulação de um alimento.

Os aditivos estão organizados de acordo com a Portaria SVS/MS nº 540, por funções que desempenham nos alimentos. A regulação do uso de aditivos no Brasil é feita pela ANVISA. Esse órgão governamental se baseia nas indicações fornecidas pelas organizações internacionais de pesquisa em alimentos como FDA, CODEX e a FAO, para elaborar as normatizações desse assunto em nosso país. O Codex Alimentarius é um programa conjunto da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO e da Organização Mundial da Saúde - OMS.

3.1.3.1 Conservantes

A importância dos conservantes evidencia-se nos problemas de armazenamento e de utilização racional dos excedentes, sobretudo nos países menos avançados em tecnologia alimentar, muitos dos quais situados nas zonas tropicais, onde o armazenamento é deficiente. Entre os conservantes merecem destaque os nitratos e nitritos (Ferreira e Camargo, 1993). Os nitratos são largamente usados na conservação de produção de origem animal. A sua ação inibidora se dá pela formação da hidroxilamina durante a redução do nitrato com acúmulo do H_2 e O_2 , às quais certos microorganismos, como o clostridium são muito sensíveis. O nitrito tem efeito inibidor mais acentuado ao crescimento das bactérias anaeróbias, ele também é um componente fundamental para a estabilização do pigmento responsável pela coloração típica vermelha, contribuindo inclusive para a melhoria das

características sensoriais (Ferreira e Camargo, 1993). O nível de nitrato não deve exceder a 500 ppm e o de nitrito, a 200 ppm (Simão, 1986).

O nitrito quando consumido em quantidades excessivas, é tóxico, e uma dose que supere 15-20 mg/kg de peso pode ser letal. No entanto, o nível máximo atualmente permitido em produtos cárneos curados está 20-40 vezes abaixo da dose letal. Também há uma preocupação crescente com os compostos químicos carcinogênicos como as nitrosamidas e nitrosaminas, que se originam mediante a reação do nitrito com as aminas e amidas secundárias (Toledo, 1990).

3.1.3.2. Estabilizantes e Emulsificantes

O estabilizante é definido como uma substância que favorece e mantém as características físicas de emulsões e suspensões (Simão, 1986). Podemos citar os fosfolipídeos, polifosfatos, os monos e diglicerídeos, polissorbatos, entre outros. Os fosfatos são os principais estabilizantes usados na indústria da carne, elevando o pH do meio, acentuando a capacidade de retenção de água e a consequente embebição da massa. Acarreta ainda a diminuição da retração do produto por ocasião do cozimento, tendo em vista a menor perda de umidade, propiciando aspecto mais homogêneo e brilhante ao corte e aumenta a suculência do produto (Pardi *et al*, 1994). Os polifosfatos extraem da carne a proteína solúvel para a fase aquosa, devido ao efeito osmótico de homogeneização da solução concentrada de fosfatos. Esta proteína solúvel vai envolver as gotículas de gordura dentro da massa dos produtos emulsificados, e após o aquecimento vai se solidificar, formando uma estrutura estável (Zimber, 1985). O teor de fosfato adicionado em produtos cárneos varia de 0,2 a 0,5%, sendo que a legislação permite níveis de no máximo de 0,5% do peso do produto final. Alguns fosfatos, quando adicionados em concentrações maiores que 0,3% produzem sabor adstringente metálico. Portanto, os fosfatos e polifosfatos têm ação coagulante e gelatinizante sobre as proteínas, ação dispersante e emulsionante sobre as gorduras e ação sequestrante de metais pesados, que poderiam catalisar a oxidação de gorduras causando a rancidez e servir de nutriente para microorganismos.

3.1.3.3 Ligadores e Enchedores não Cárneos

Os ligadores e enchedores são produtos não cárneos adicionados nas formulações por diversas razões: melhorar a estabilidade da emulsão, aumentar a capacidade de ligar

água, melhorar o sabor e aroma, as características de corte, o rendimento a cocção e reduzir os custos da formulação. Os ligadores são substâncias que contribuem tanto para ligar a água como a gordura, mas contribuem pouco para a emulsificação (Guerreiro, 2006).

Os principais ligadores das formulações dos embutidos se caracterizam pelo alto conteúdo protéico. São eles: leite em pó ou produtos derivados da soja como a proteína texturizada de soja (50% de proteína), proteína concentrada de soja (70% de proteína) e proteína isolada de soja (90% de proteína) (Guerreiro, 2006). A proteína texturizada de soja pode ser adicionada em produtos emulsionados na forma hidratada em até 10,5%, e de 3,5% na forma não hidratada, ambas sem a necessidade de declaração no rótulo. Teores acima de 3,5%-7,5% (não hidratada) ou 10,6-22,5% (hidratada) devem ser declarados no rótulo. O percentual de carne deve ser no mínimo de 55%.

Os enchedores mais comuns são: farinha de trigo, milho, arroz ou amido, apresentando alto teor de amido, mas baixo teor de proteínas. Entretanto, esses produtos são capazes de ligar grandes quantidades de água, mas com baixa capacidade de emulsificação. De acordo com a legislação, os embutidos não poderão conter mais do que 5% de amido ou fécula, em especial nas salsichas essa proporção não pode ultrapassar os 2%.

Com funções semelhantes à dos ligadores, a Carragena (k-carragena) é um agente espessante e geleificante, extraído de algas marinhas vermelhas. Possui excelente capacidade de retenção de água e de emulsificação, aumentando a viscosidade dos alimentos. Outros espessantes são o Ágar-ágar, os alginatos, a goma arábica, entre outros.

3.1.3.4 Antioxidantes

A função específica dos antioxidantes é retardar ou impedir a deterioração dos alimentos, principalmente os óleos e gorduras, evitando a formação do “ranço”, por processo de oxidação (Gava, 1998). A rancificação é provocada por uma série de transformações químicas, dentre as quais se destaca a oxidativa causada pela ação do oxigênio e luz nas duplas ligações dos ácidos graxos insaturados. A rancificação pode ser oxidativa e hidrolítica. A rancificação oxidativa acarreta a formação de peróxidos que rompendo-se dão origem a compostos carbonilados de peso molecular mais baixo, responsáveis pelo odor e gosto desagradáveis que caracterizam as gorduras rançosas (Pardi *et al*, 1994). A rancificação hidrolítica é causada pela ação das enzimas, especialmente as lipases, que ao hidrolisarem um triglicerídeo, liberam ácidos graxos, sendo que aqueles de

baixo peso molecular possuem odor e sabor desagradável (Gava, 1998). Os antioxidantes não impedem a decomposição produzida por microorganismos. O principal antioxidante usado nas conservas de carne é o ácido ascórbico (limite de 0,2%), oriundo dos seus sais eritorbato e ascorbato de sódio.

3.1.3.5 Flavorizantes e Aromatizantes

Os flavorizantes e os aromatizantes são as essências naturais e artificiais. Tem a função de caracterizar, melhorar e padronizar ou reconstituir aromas e sabores desejáveis. Os mais conhecidos pela indústria cárnea são o glutamato de sódio (Ajinomoto), que é um realçador de sabor, e os aromatizantes de fumaça, responsáveis em conferir o sabor e aroma de defumado aos alimentos.

3.1.3.6 Corantes

As principais razões para o uso de corantes na indústria são a restauração da cor dos produtos cuja coloração natural foi afetada pelo processo, uniformizar a cor dos alimentos produzidos por grande variedade de matérias-primas e padronizar a cor dos produtos para aceitação do consumidor. Os corantes podem ser naturais ou sintéticos, os mais conhecidos pela indústria de embutidos são o carmin, a hemoglobina e o urucum, entre outros.

3.1.3.7 Sal

Considerado por muitos um aditivo, na qualidade de conservador representa o condimento mais importante que se dispõe e é indispensável no processamento de carnes. Originalmente o sal tinha função conservante devido ao aumento da pressão osmótica do meio, que se reflete no abaixamento da atividade de água (Aa), dificultando sua utilização pelas bactérias. Além das características de agente bacteriostático, o sal tem como principal função ser o agente de sabor, valorizando os sabores das especiarias adicionadas. Outra importante função do sal é a solubilização das proteínas miofibrilares e a retenção de água (Takahashi, 1980). Não há restrição à concentração utilizada, sendo que o fator limitante é o seu sabor, pois concentrações abaixo de 1% não aumentam o sabor, mas acima de 2%, podem tornar o produto salgado.

3.1.3.8. Açúcar

Na fabricação dos produtos cárneos os carboidratos servem para diferentes propósitos, tais como contribuir para o sabor, mascarar o sabor adstringente do sal e combaterem o gosto acre de algumas substâncias (Takahashi, 1980), além de ação redutora potente, indispensável para a adequação do meio até a formação de nitroso-mioglobina; funcionamento como substrato que produz fermentação láctica fundamental na maturação de embutidos (Pardi, *et al*, 1994). Na fabricação de embutidos curados são utilizados diferentes tipos de açúcares, tais como glicose, lactose, sacarose, maltose e xarope seco de amido.

3.1.3.9 Especiarias

São produtos de origem vegetal que compreendem certas plantas ou parte delas, que encerram substâncias aromáticas, sápidas, com ou sem valor alimentício. Seu emprego em conservas e outros produtos industriais, além de imprimir odores e sabores característicos, têm o mérito de agir como auxiliar de antioxidantes em relação às gorduras, antimicrobianos, emulsificante, entre outros (Pardi *et al*, 1994). São exemplos clássicos de especiarias usadas nos produtos cárneos: pimenta-do-reino, noz-moscada, alecrim, pimentão, cebola, pimenta-vermelha, canela, gengibre, alho, entre outros.

3.1.4. Envoltórios

3.1.4.1. Tripas Naturais

As tripas naturais são geralmente de suínos e carneiro, dando aparência e características típicas do produto. Tem como vantagens serem comestíveis, altamente permeáveis à defumação, proteger o agradável sabor do embutido, serem macias e suculentas, dando uma apresentação atrativa. Seus problemas são a falta de homogeneidade, irregularidades de tamanho, alto custo de trabalho para o seu enchimento, causando maior quebra de peso do produto e contendo alta carga microbiana (Pardi *et al*, 1994).

3.1.4.2. Tripas Artificiais

As tripas artificiais são classificadas em três grupos: colágeno reconstituído, celulose e sintéticas. Suas vantagens são a uniformidade de diâmetro, pouca carga microbiana, emprego fácil, variedade de tamanho, fácil mecanização e permitem eleger a permeabilidade ao vapor e à fumaça desejadas. Suas desvantagens são a de não serem comestíveis, nem biodegradáveis, com custo elevado e alguns tipos não permitem boas trocas com o meio ambiente (Guerreiro, 2006). As tripas mais usadas na produção de salsicha são de celulose.

3.2 Equipamentos

Seleção do tipo adequado de equipamento de produção da indústria de embutidos envolve a consideração de uma série de fatores, como tipo e volume de produção, trabalho, velocidade de produção desejada, a capacidade de variar rapidamente o tipo de embutidos, o preço das matérias-primas, o custo de manutenção, etc. Uma sequência de operações adequada e uma boa escolha de equipamento devem ser consideradas para evitar gargalos que entram o processo. Grande cuidado deve ser dada para a escolha e colocação de máquinas e outros equipamentos em que tais posições não só por ser capaz de realizar o trabalho mais eficaz, mas também de se movimentar matérias-primas e produtos de uma operação para outra, com mínima contaminação.

3.2.1 Quebrador de Blocos

O quebrador de blocos é constituído de um conjunto rotativo de facas cortantes que fazem o corte dos blocos de carne congelada.

3.2.2 Moedor

São constituídos basicamente de uma rosca sem fim, placa fixa perfurada e facas. A moagem das matérias-primas cárneas é realizada mecanicamente sob efeito da pressão. A placa perfurada tem furos redondos variando de 1 a 13 mm. O grau de cominuição é acima de tudo determinada pela escolha do diâmetro do orifício em placas perfuradas. Moedores de mesa geralmente possuem 70 a 98 mm de cilindros com o melhor prato a ser de 1 mm.

O diâmetro do cilindro de um grande moinho industrial pode chegar a até 300 mm. Moedores são usualmente utilizados como o primeiro passo na moagem de carne. O moedor nunca deve operar vazio. Carnes congeladas ou ricas em tecido conjuntivo são triturados primeiro através de uma placa grossa e depois através de uma placa fina. Todas as peças do moedor que entrar em contato com as carnes são feitas de aço inoxidável.

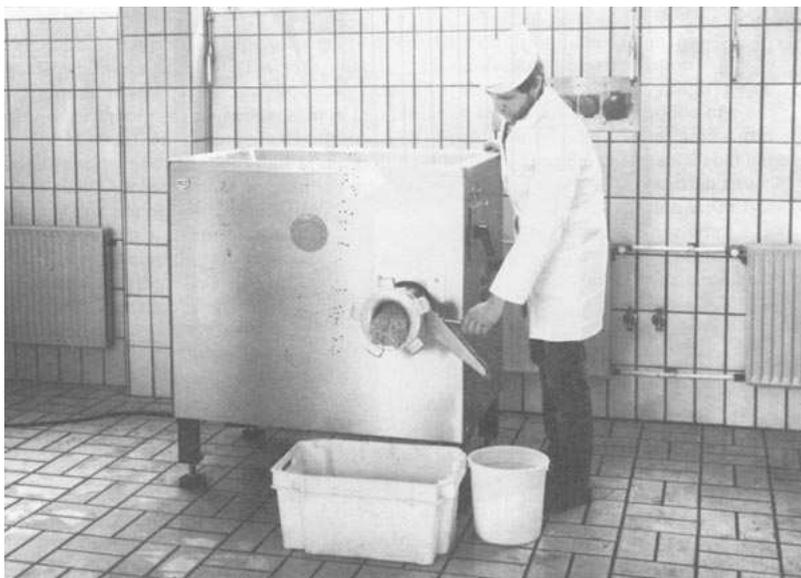


Figura 3.1 moedor (Savic, 1985).

3.2.3 Misturadores

Misturadores são usados principalmente na obtenção de uma mistura bem misturada de carne moída, a gordura e especiarias. O equipamento consiste geralmente em tanque de fundo redondo que gira através de dois eixos em paralelo equipados com pás em forma de asa movimentam a massa de carne e para trás e para frente para dar uma distribuição uniforme de partículas de matéria gorda e magra, especiarias e outros ingredientes. A descarga ocorre geralmente inclinando o misturador em 90 graus. Sobrecarregar o misturador não é recomendado para uma boa mistura.

3.2.4 Tanque Rotativo (Tumbler).

Várias máquinas de tambeamento ou massagear estão disponíveis. Diferentes tipos dessas máquinas diferem muito em sua eficiência. Um tanque rotativo não muito caro fora desenvolvidos a partir do caminhão-betoneira.

3.2.5 Cortadores (Cutter).

Os cortadores são projetados para pulverizar finamente materiais carneos revolvendo-os em uma bacia com facas de rotação rápida. Existem vários tipos e tamanhos de cortadores e nem sempre é fácil escolher um cortador que tenha a maior capacidade e melhor eficiência para produção de um determinado produto. Os cortadores, comumente encontradas nas indústrias de processamento de carne, são essencialmente compostos de uma cuba redonda e horizontal com capacidade entre 10 e 1000 litros. Estes giram lentamente levando o produto até um conjunto de facas curvas muito afiadas e presas em um eixo horizontal que gira em alta rotação. As facas são protegidas com uma tampa. O arranjo, número, forma e velocidade de facas são os principais fatores no desempenho de um cortador.

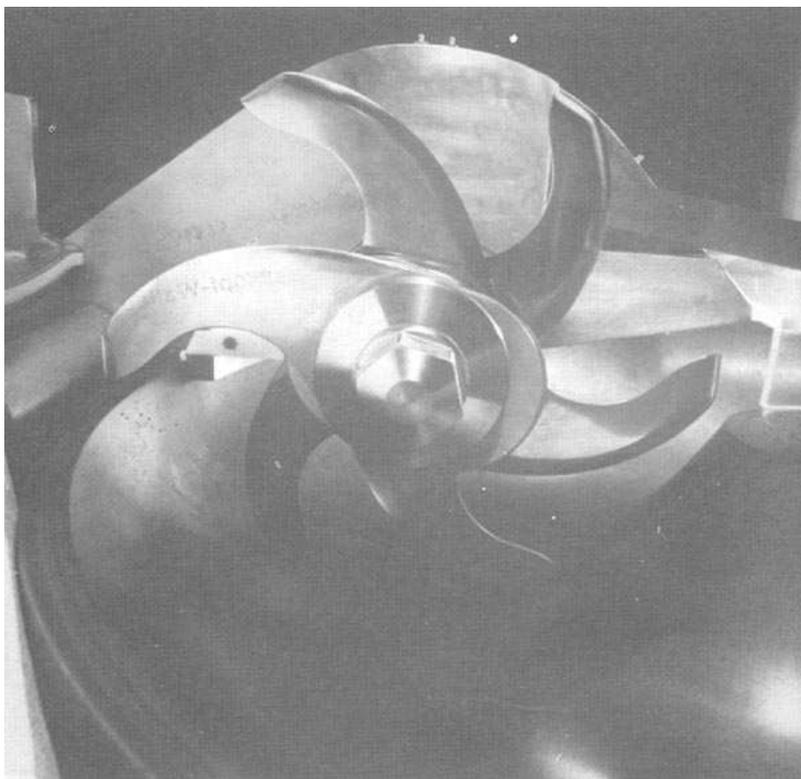


Figura 3.2 Facas de alta velocidade em um cortador padrão (Savic, 1985).

Cortadores modernos geralmente têm uma velocidade dupla facas e uma bacia de velocidade variável, pois eles são frequentemente equipados com um dispositivo especial para o esvaziamento da bacia, bem como um termômetro sobre a cuba para ajudar a controlar a temperatura da carne durante o corte. Eles podem operar sob vácuo, que contribui para uma melhor cor e melhora a capacidade de ligação de água da carne. A

maioria dos cortadores maiores e mais rápidos estão equipados com dispositivos que permitam fácil carregamento e esvaziamento da cuba.



Figura 3.3 Cortador equipado com dispositivo para esvaziamento sem o uso das mãos.
(Savic, 1985).

3.2.6 Emulsificador

O emulsificador geralmente inclui uma placa perfurada sobre a qual gira uma lâmina de dois gumes, ou seja, faca de corte ou faca rotor. Logo abaixo da placa de uma bomba centrífuga é que força o material através da placa perfurada. Comparado com o cortador, o emulsificador opera a uma velocidade muito maior, produzindo uma emulsão mais fina. Normalmente, a emulsão está pronta para enchimento de uma passagem pela máquina.

3.2.7 Embutidora

As embutidoras podem ser a pistão ou ar comprimido cuja função é fazer o enchimento da massa fina no envoltório por extrusão. A embutidora opera de forma

contínua de modo que seu funil de enchimento pode ser recarregado sem que a máquina pare. A embutidora possui um dispositivo de elevação para o rápido carregamento do funil que tem capacidade de 100 a 200 litros. A carcaça da máquina, o cilindro e de saída são fabricados em aço inoxidável. A pressão de enchimento é fornecida a partir de uma bomba hidráulica com a capacidade de embutir peças de até 30 litros.

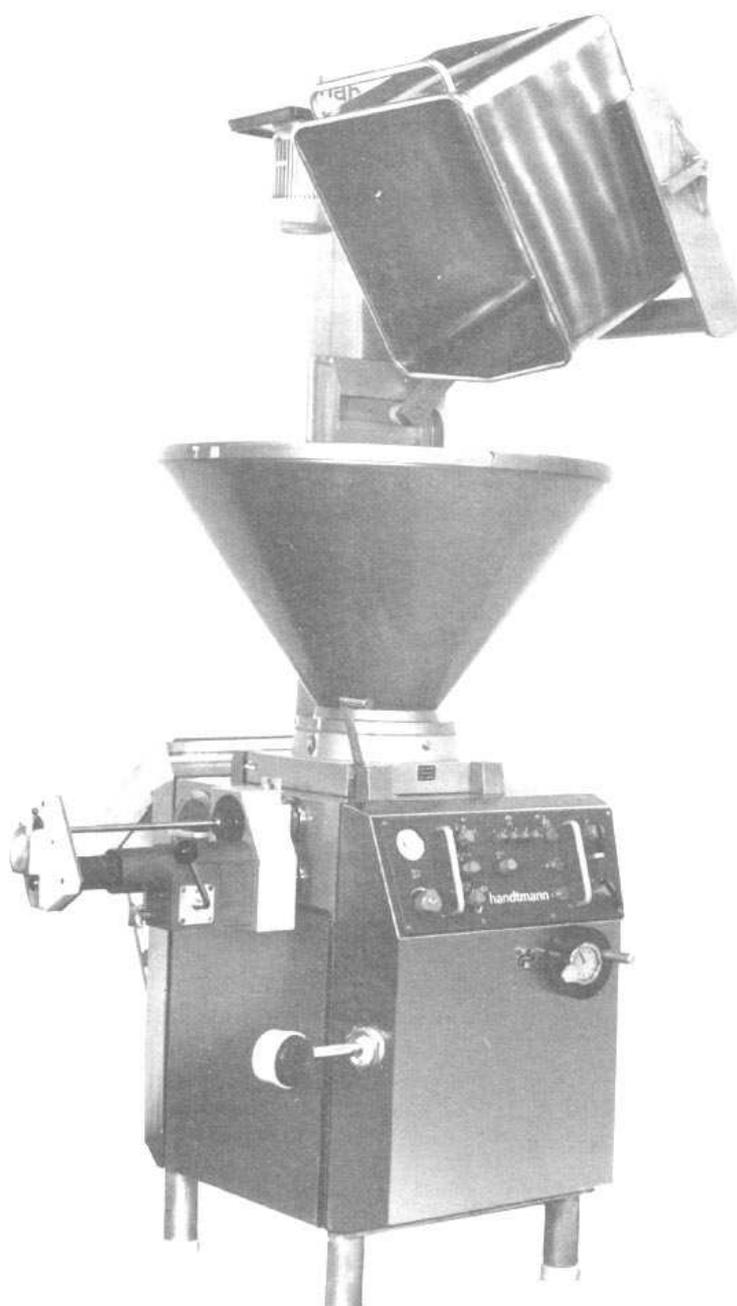


Figura 3.4 Embutidora contínua (Savic, 1985).

3.2.8 Estufas de Cozimento

As estufas de cozimento são equipadas para cozinhar e resfriar os embutidos. O projeto de uma estufa de cozimento tem grande influência nos resultados obtidos. Suas paredes normalmente possuem isolamento térmico. O cozimento é realizado por meio de aquecedores através de vapor indireto e ventiladores pra circulação do ar aquecido na câmara do equipamento. Especial atenção deve ser dada ao controle de temperatura e umidade na estufa.

Os embutidos são colocados nas estufas em carrinho como o da figura 3.5



Figura 3.5 Carro de cozimento para estufa (Savic, 1985).

3.2.9 Cozedores

Cozinhar embutidos, especialmente o tipo grande, pode ser feito por submersão em água quente em tanques de aço. Após o cozimento, os embutidos são colocados em tanques de água fria e, em seguida, em tanques de água a uma temperatura interna ligeiramente acima da temperatura ambiente. O calor residual é normalmente suficiente para secar os embutidos antes de sua colocação no refrigerador a 2-8 ° C. Tanques para cozinhar os embutidos na água são geralmente quadrados e com um tamanho conveniente e profundidade para carga e descarga. A escolha do tipo de tanque de cozimento deve ser de acordo com a capacidade e o tipo de produto final.

3.3 Processo Produtivo

Descrever-se-á, a seguir, o processo de produção dos principais embutidos fabricados nas indústrias de embutidos.

3.3.1 Salsicha

Entende-se por salsicha o produto cárneo industrializado, obtido da emulsão de carne de uma ou mais espécies de animais de açougue, adicionados de ingredientes. Esta emulsão é embutida em envoltório natural ou artificial ou ainda por processo de extrusão para em seguida ser submetida a um processo térmico adequado. Na composição da salsicha podem-se utilizar carnes mecanicamente separadas até o limite de 60%, o emprego de miúdos e vísceras comestíveis fica limitado ao percentual de 10%. Outros ingredientes são: sal, gordura animal ou vegetal, água, proteína vegetal e/ou animal, agentes ligantes, aditivos, açúcares, aromas, especiarias e condimentos. Permite-se a adição de proteínas não cárnica de no máximo 4,0%, como proteína agregada (BRASIL, 2000a). A Tabela 3.1 apresenta as características físico-químicas da salsicha.

Tabela 3.1 Características Físico-químicas da salsicha

Nutrientes	Composição (%)
Amido (máximo)	2,0
Carboidratos Totais (máximo)	7,0
Umidade (máximo)	65,0
Gordura (máximo)	30,0
Proteína (mínimo)	12,0

O processamento industrial da salsicha envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.6.

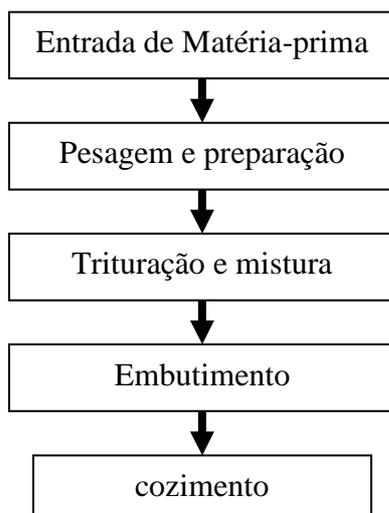


Figura 3.6 Fluxograma do processo industrial de produção de salsicha

A formulação é feita de acordo com o produto que será produzido, sendo então pesados os aditivos, ingredientes e condimentos em balanças específicas. O controle das quantidades deve ser rigoroso para evitar a toxicidade do produto devido aos aditivos, que devem sempre estar dentro das concentrações permitidas pela legislação. Os tipos de carne que serão processados também são pesados. A carne chega da câmara fria em blocos congelados ou recém descongelados e passa pelo quebrador de blocos, passando em seguida no moedor (em discos com furos de 4mm a 12mm), com exceção da CMS (passa somente no quebrador de blocos). A temperatura da carne nesta etapa do processo deve estar entre -5°C e 2°C de forma a facilitar um controle de posterior da temperatura (Canhos e Dias, 1985).

A trituração e a mistura são operações distintas, porém executadas no mesmo equipamento. Nesta etapa do processo todas as matérias-primas preparadas são adicionadas separadamente no *Cutter*. A trituração é o processo onde pedaços de carne e gordura são subdivididos em partículas menores de tamanho bem definido e com aumento da área superficial, visando propiciar maior uniformidade do produto, sempre em temperaturas abaixo dos 4°C (Canhos e Dias, 1985). Esta trituração, ou cominuição, é feita sob efeito de forças de esmagamento, corte e ruptura, causando a desorganização e espalhamento das células dos tecidos. Segundo Guerreiro (2006), a mistura é realizada ao longo do processo, onde os ingredientes são colocados em etapas:

1.carnes magras, metade do sal de cura e metade do gelo; 2.proteína de soja; 3.gordura ou toucinho, o restante do sal de cura, os aditivos e os outros ingredientes; 4.Nitrito de sódio e restante do gelo.

Esta é a ordem mais comum da adição de matérias-primas no *Cutter*, para favorecer a extração de proteínas solúveis pelos sais e facilitar a emulsão.

A emulsão é definida como a mistura de dois líquidos imiscíveis, sendo um disperso no outro. As duas fases de emulsão são denominadas: fase contínua e fase descontínua ou dispersa. As emulsões geralmente são instáveis se não possuem outro composto como agente emulsionante ou estabilizante. Quando a gordura entra em contato com a água, existe uma grande tensão interfacial entre ambas as fases. Os agentes emulsionantes têm afinidade tanto pela água como pela gordura e atuam reduzindo esta tensão e permitindo a formação de uma emulsão com menor energia interna, aumentando, portanto sua estabilidade. As porções hidrofílicas de tais moléculas têm afinidade pela água e as porções hidrofóbicas têm mais afinidade pela gordura. Se existe quantidade suficiente de agente emulsionante, este formará uma capa contínua entre as duas fases, estabilizando, portanto, a emulsão. Apesar da definição clássica, a estrutura e propriedades físicas da massa de salsicha se assemelham a uma emulsão verdadeira. Por este motivo a salsicha finamente triturada e não cozida pode ser considerada uma emulsão (Canhos e Dias, 1985).

O embutimento pode ser definido como sendo a extrusão da massa de carne em embalagens flexíveis. Por ser um produto emulsionado, é necessário dar-lhe alguma forma para propiciar o processamento subsequente, além de protegê-lo. Um sistema automático para dividir em porções o produto e torcer ou amarrar a tripa pode ser acoplado à embutidora. Esse sistema não funciona bem com tripas naturais, em virtude de terem variação das dimensões (Rodrigues, 1978). Um dos principais objetivos no processo de embutimento é a remoção de ar. A presença de ar no produto favorece a formação de bolsas de gordura durante o cozimento, além de favorecer a oxidação do produto. Atualmente se usa o embutimento a vácuo para a remoção máxima do ar (Canhos e Dias, 1980). As peças de salsicha são colocadas em varas e estas em gaiolas para serem transportados para as estufas.

O objetivo da etapa do cozimento é cozinhar a massa da salsicha na estufa, dando características de paladar adequado (cor, sabor e consistência), além de estabilizar a mistura e melhorar a conservação. A textura firme do produto cozido é devido à coagulação das proteínas e a desidratação parcial do embutido. A fixação da cor ocorre

pela desnaturação da mioglobina e formação de nitrosohemocromo. Em salsichas onde a tripa é removida, a temperatura inicial de cozimento deverá ser baixa para não haver coagulação antes que uma quantidade grande de proteínas tenha migrado do interior para a superfície do produto. Estas proteínas quando coagulam formam uma película abaixo da tripa, favorecendo a pelagem e também mantém as partículas de gordura em suspensão, estabilizando a emulsão por um período prolongado. Outro fator importante no cozimento é a umidade relativa. Quando a umidade é relativamente alta aumenta a probabilidade de ocorrer quebra da emulsão e diminui a intensidade da cor superficial, mas em compensação, facilita a pelagem, diminui o “encolhimento” do produto e reduz o tempo de cozimento (Canhos e Dias, 1980).

Segundo Guerreiro (2006), o cozimento também exerce uma função importante na destruição dos microorganismos eventualmente presentes na matéria prima. A redução da população contaminante depende da magnitude do tempo e da temperatura utilizada no processo de cocção. Geralmente, quando o objetivo principal é desenvolver as características organolépticas, a temperatura utilizada é inferior a 100°C, e o cozimento equivale a um tratamento térmico brando, como na pasteurização. Deste modo o produto não é esterilizado e o efeito do calor permite apenas o prolongamento da sua vida-de-prateleira. Geralmente é utilizada a seguinte condição de processo:

20 minutos a 55°C, calor seco e chaminé aberta, para ocorrer à formação de cor;

30 minutos a 70°C, calor seco e chaminé fechada;

30 minutos a 80°C, calor úmido e chaminé fechada, até atingir 71°C no centro do produto.

3.3.2 Linguiça

Entende-se por linguiça o produto cárneo industrializado, obtido de carnes de animais de açougue, adicionados ou não de tecidos adiposos, ingredientes, embutidos em envoltório natural, ou artificial, e submetido ao processo tecnológico adequado (BRASIL, 2000a).

A linguiça, por ser um produto frescal, curado que não sofre tratamento térmico que reduza a sua flora microbiana, e com grande quantidade de água livre (alta atividade de água), possui uma vida útil pequena, apesar da utilização do frio (Terra, 2000). Linguiça defumada é o produto obtido de carnes suínas (linguiça calabresa) ou mistura de carnes, adicionado de ingredientes, como ligadores, água e condimentos, entre outros, submetido ao processo de cozimento, sendo o processo de defumação opcional (BRASIL, 1998).

Preparados de fumaça líquida tem sido desenvolvidos como uma tentativa de eliminar o processo de defumação a partir da queima de madeira natural e a poluição do ar para a qual esse processo contribui. A fumaça líquida é preparada por condensação e destilação fracionada da fumaça deriva da queima de madeira. Ela é geralmente aplicada à superfície das carnes na forma de um *spray* aquoso, uma névoa atomizada ou um banho; ou ela pode ser adicionada diretamente na formulação das carnes processadas. Os preparados de fumaça líquida são livres de componentes carcinogênicos, como o 3,4-benzopireno, que tem sido descoberto em baixas concentrações em fumaça natural. A presença e quantidade de carcinogênicos na fumaça natural dependem um tanto da temperatura a qual a fumaça é gerada. Temperaturas de combustão baixas produzem muito pouco desses componentes. A detecção de substâncias carcinogênicas como 3,4-benzopireno e 1,2,5,6-fenantraceno tem conduzido estudos sobre o efeito das condições de geração de fumaça na sua produção. Elas são produzidas da lignina acima de 350°C e devem estar presentes, geralmente, desde a temperatura da zona de combustão, que é aproximadamente 1000°C (Milner, 1963). Entretanto, alguns pesquisadores têm a impressão de que os perigos dos carcinogênicos da carne defumada são extremamente pequenos, tem havido muitas tentativas de se produzir fumaça livre de carcinogênicos, por exemplo, por condensação, seguida de destilação fracionada. A fração selecionada é diluída com água onde os benzopirenos são insolúveis (Lapshin, 1962). As principais contribuições da defumação à carne são a aparência brilhante, a cor, o aroma e o sabor característicos, os quais estão relacionados com a deposição dos componentes da fumaça na superfície do produto. O brilho típico da carne defumada se deve à camada resinosa resultante da condensação de componentes da fumaça (Milner, 1963).

3.3.2.1 Linguíça Frescal

A linguíça frescal é o produto cru e curado obtido exclusivamente de carnes suína, adicionada de gordura suína e ingredientes. Outros ingredientes são: sal, água, proteína vegetal e/ou animal, açúcares, plasma aditivos, aromas, especiarias e condimentos (BRASIL, 2000a). A Tabela 3.2 apresenta as características físico-químicas da linguíça frescal.

Tabela 3.2 Características Físico-químicas de linguças

Nutrientes	Composição (%)	
	Frescais	Defumadas
Umidade (máximo)	70,0	60,0
Gordura (máximo)	30,0	35,0
Proteína (mínimo)	12,0	14,0
Cálcio (base seca) (máximo)	0,1	0,1

O processamento industrial da linguça frescal envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.7.

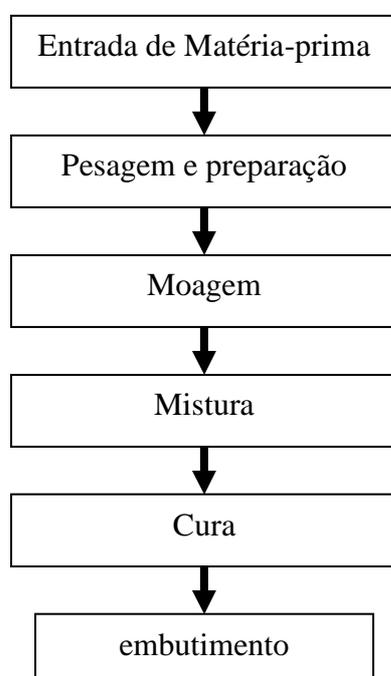


Figura 3.7 Fluxograma de produção de linguça frescal.

A carne é picada e/ou moída, com auxílio de equipamentos do tipo moedores. A carne picada e/ou moída, bem como os ingredientes do produto, vai sendo adicionada em um equipamento misturador, onde permanecem por tempo suficiente para a completa mistura e incorporação de todos os ingredientes da formulação. A mistura pronta é transferida para tanques de cura onde permanecem a uma temperatura em torno de 6°C pelo tempo suficiente para o desenvolvimento das características desejadas (de 4 a 12 horas).

A cura de carnes é um procedimento que tem por finalidade conservar, além de conferir-lhe determinadas qualidades sensoriais, como sabor, textura e principalmente a coloração vermelha ou rósea atraente. Segundo Terra (2000), os produtos cárneos curados são os produtos em cuja elaboração são utilizados os sais de cura. Esses sais são constituídos de uma mistura de cloreto de sódio, nitrato e nitrito (de sódio ou potássio) ou de apenas cloreto de sódio e nitrito (de sódio ou potássio). As finalidades da utilização de nitrato de sódio ou potássio e nitrito de sódio ou potássio são de desenvolver cor característica da carne curada e funcionar como bacteriostático em meio ácido. Em produtos de salsicharia, os ingredientes de cura são incorporados durante os processos de mistura e moagem. São adicionados em forma seca ou como solução concentrada e são distribuídos uniformemente por todo produto durante a trituração e preparo da massa. Essa técnica é conhecida como cura direta.

Após a cura o produto é transferido para embutidora e embutida em tripas próprias aos tipos de linguiças formuladas (tripa ou de celulose), com calibres específicos, após embutidas serão amarradas em gomos de 10 cm de comprimento. No caso de tripas suínas, ocorre uma preparação prévia, na qual as tripas são enxaguadas, para remoção de sal e hidratação; em seguida, elas são colocadas em tubos, operação chamada de corrugação, de acordo com o calibre necessário para o embutimento do produto. Depois, seguem para a embalagem.

3.3.2.2 Linguiça Defumada

È o produto obtido de carnes suína, carne mecanicamente separada até o limite máximo de 20%, adicionado de ingrediente, submetido ou não ao processo de cozimento ou similar para desidratação, sendo o processo de defumação opcional, os demais ingredientes usados são similares ao da linguiça frescal (BRASIL, 2000a). A Tabela 3.2 apresenta as características físico-químicas da linguiça defumada.

Na Figura 3.8 é apresentado o fluxograma de produção de linguiça defumada.

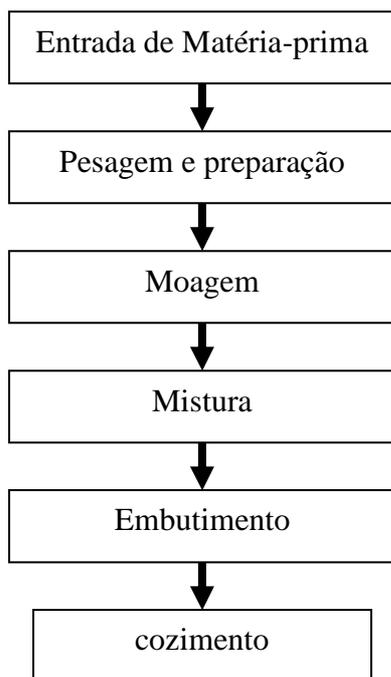


Figura 3.8 Fluxograma de produção de linguiça defumada.

O processo de fabricação de linguiça calabresa consiste na etapa de moagem da carne e do toucinho a temperatura inferior a 5°C , o que garante uma consistência ideal para a fabricação de embutidos. Seguido da etapa de condimentação onde, na misturadeira, são adicionados os demais ingredientes. A próxima etapa é o embutimento, ou seja, a introdução da massa nas tripas. Nos grandes frigoríficos, esta etapa geralmente é realizada através de uma máquina embutidora vertical contínua automática a vácuo, dotada de sistema de enchimento através de rotor de palhetas radiais de alta resistência. Como durante o processo de aquecimento a massa se dilata, encolhendo um pouco a tripa, algumas prescrições devem ser observadas durante o enchimento, como apresentado a seguir. As tripas naturais não devem ficar demasiadamente apertadas após o embutimento da massa, devendo as linguiças estar sempre macias; quando as matérias-primas já estiverem escaldadas ou meio fervidas, a dilatação da massa é maior, por isso, deve-se embutir mais frouxa (a massa composta de matérias fervidas pode ser sobrecozida, permitindo assim o maior enchimento das tripas); as linguiças frescas e sem salgar podem ser menos enchidas. Devem ser arrematadas atando-as imediatamente após o enchimento para que seja evitada a saída da massa (Varnam e Sutherland, 1998).

Após o embutido, o produto é destinado para a câmara de cozimento/defumação, onde irão ocorrer as reações de maturação na linguiça. O tempo de permanência nesta

etapa depende de cada processo de produção, no caso da linguiça calabresa, o produto permanece na câmara até alcançar a temperatura interna de 68°-72°C (em torno de 4 horas). O processo de cozimento tem por finalidade dar consistência firme ao produto por coagulação das proteínas e desidratação parcial, fixar a cor por desnaturação da mioglobina e pasteurizar para prolongar a vida útil. Durante o cozimento os embutidos perdem cerca de 5-10% do seu peso.

3.3.3 Presunto

Entende-se por Presunto Cozido, seguido das especificações que couber, o produto cárneo industrializado obtido exclusivamente com o pernil de suínos, desossado, adicionado de ingredientes, e submetido a um processo de cozimento adequado. Os demais ingredientes são: sal, nitrito e/ou nitrato de sódio ou potássio em forma de salmoura, proteínas de origem animal e/ou vegetal, açúcares, malto dextrina, condimentos, aromas e especiarias. Permite-se a adição de proteínas não cárneas na forma agregada de 2,0% (máximo) (BRASIL, 2000b). A tabela 3.3 apresenta as características físico-químicas do presunto.

Tabela 3.3 Características Físico-Químicas do presunto

Nutrientes	Composição (%)
Umidade (máximo)	72,8
Carboidratos (máximo)	2,0
Proteína (mínimo)	14,0

O processamento industrial do presunto envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.9.

Carne suína (pernil), com ossos e/ou desossada, chega ao frigorífico (quando adquirida de terceiros) e é armazenada em câmaras frias. Caso a carne chegue congelada, é necessário seu descongelamento antes de seu processamento, que normalmente é feito nas próprias câmaras frias. Para carne resfriada com ossos, retiram-se manualmente os ossos, com o auxílio de facas. Aparas de carne e gordura resultantes da desossa são selecionadas para aproveitamento em produtos ou encaminhadas para graxaria, juntamente com os ossos. Excesso de gordura e tecidos conectivos são removidos dos pedaços de pernil

desossado. Estes materiais podem ser aproveitados em produtos do próprio frigorífico ou podem ser destinados para graxaria. A carne limpa é pesada para controlar o processo de injeção de salmoura para cura.

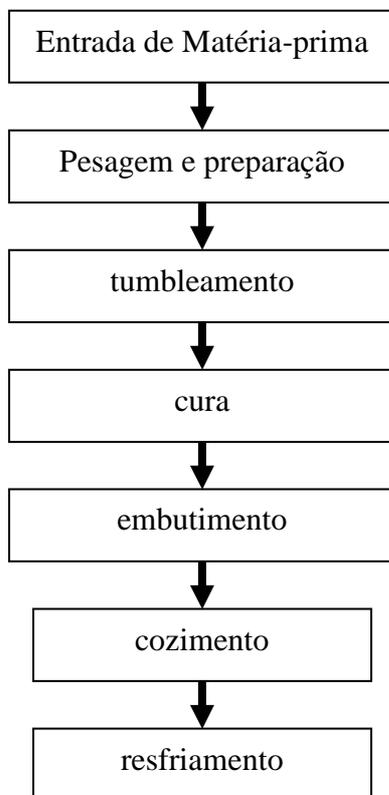


Figura 3.9 Fluxograma de produção de presunto.

Os pedaços de pernil limpos são injetados com uma solução contendo ingredientes como sal, açúcar, condimentos e aditivos, tais como conservantes conhecidos como sais de cura (nitratos e nitritos), antioxidantes, estabilizantes e umectantes. Para esta operação, são utilizadas injetoras manuais ou automáticas, do tipo multi-agulhas. Os pernis injetados são massageados ou tombados em tanques ou tambores rotativos (“tumblers”) por tempo suficiente (4 a 6 horas) para que ocorra a distribuição da solução injetada e também a extração superficial de proteínas miofibrilares. Este tratamento faz com que ocorra a adesão dos pedaços de carne durante o cozimento. Após esta etapa, a carne é deixada maturando ou curando em baixa temperatura (em torno de 5°C ,por 8 horas ou mais), para propiciar uma melhor extração e solubilização de proteínas. Ao final do processo de cura a carne segue para a embutidora e, neste caso, geralmente são utilizados envoltórios de maior calibre, que geralmente são plásticos. As peças de carne embaladas são colocadas manualmente em formas metálicas, que são prensadas e fechadas para o cozimento.

As formas metálicas, carregadas e fechadas, são colocadas em tanques de cozimento com água quente, onde permanecem por um tempo de aproximadamente 4 horas, suficiente para que a temperatura no centro térmico do produto atinja 72°C, fazendo com que ocorra a coagulação das proteínas, destruição de microorganismos, desenvolvimento de aroma e sabor e a fixação de cor do produto. Após o cozimento, as formas são resfriadas imediatamente com jatos de água gelada ou por imersão em um tanque de salmoura ou água gelada, com recirculação. Quando estão frias o suficiente, as formas metálicas são abertas, as peças de presunto são retiradas, permanecendo na sua embalagem de cozimento e seguem para tanques com água fria permanecendo até que a temperatura no centro térmico do produto atinja 5°C.

3.3.4 Apresuntado

Entende-se por apresuntado o produto cárneo industrializado, obtido a partir de recortes e/ou cortes de massas musculares dos membros anteriores e/ou posteriores de suínos, adicionados de ingredientes e submetido ao processo de cozimento adequado. Os demais ingredientes são: sal, nitrito e/ou nitrato de sódio ou potássio em forma de salmoura, proteínas de origem animal e/ou vegetal, açúcares, malto dextrina, condimentos, aromas e especiarias. Permite-se a adição de proteínas não cárneas na forma agregada de 2,5% no máximo (BRASIL, 2000b). A Tabela 3.4 apresenta as características físico-químicas do apresuntado.

Tabela 3.4 Características Físico-químicas do apresuntado

Nutrientes	Composição (%)
Amido (máximo)	2,0
Carboidratos Totais (máximo)	5,0
Umidade (máximo)	75,0
Gordura (máximo)	12,0
Proteína (mínimo)	13,0

O processamento industrial do apresuntado envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.10.

De acordo com as características de cada produto, realiza-se à sua formulação em uma batelada de tamanho definido conforme as instalações do processo. São feitas pesagens dos recortes de carne suína, previamente cominuída (processo pelo qual se fragmenta a carne em pequenos pedaços), e de todos os ingredientes e aditivos necessários a este lote. Dependendo da formulação, incluem-se temperos ou condimentos, e os chamados extensores e ligantes (fécula, proteína texturizada de soja – PTS).

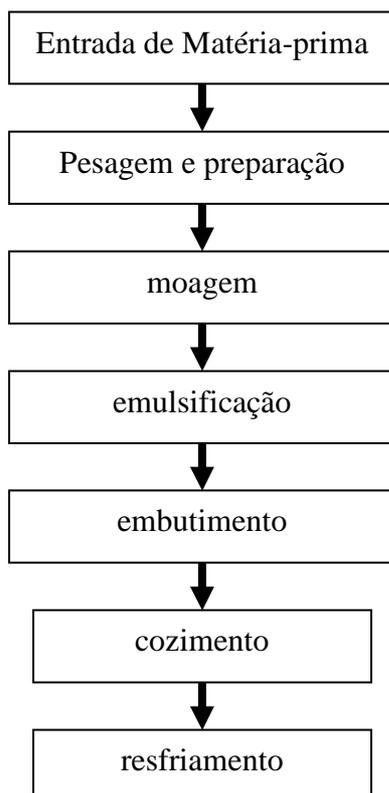


Figura 3.10 Fluxograma de produção de apresuntado.

A matéria-prima, carnes suínas chegam resfriadas ou congeladas ao frigorífico e são armazenadas em câmaras frias.

A carne é picada e moída com auxílio de equipamentos tais como moedores e/ou quebradores de blocos. A carne moída, bem como os ingredientes do produto, são colocados em um equipamento chamado “cutter” que promove uma cominuição fina das carnes e a mistura de todos os ingredientes. É comum a adição de gelo picado, que além de compor o teor de água do produto, promove o resfriamento da massa em processo, para não se exceder à temperatura crítica (16°C), que se aquece pelo atrito com os componentes da máquina. Isto é importante para a qualidade do produto (textura da massa, aspectos organolépticos, controle de eventual crescimento microbiano, etc.). A mistura prossegue

até que se obtenha uma emulsão com características específicas. A emulsão segue para a embutidora e, neste caso, geralmente são utilizados envoltórios de maior calibre, que geralmente são plásticos.

Na sequência o processo segue o mesmo caminho apresentado para o presunto.

3.3.5 Mortadela

Entende-se por mortadela o produto cárneo industrializado obtido de uma emulsão das carnes de animais de açougue, acrescido ou não de toucinho, adicionado de ingredientes, embutido em envoltório natural ou artificial, em diferentes formas e submetido ao tratamento térmico adequado. Na composição da mortadela podem-se utilizar carnes mecanicamente separadas até o limite de 60%; o emprego de miúdos e vísceras comestíveis fica limitado no percentual de 10%. Outros ingredientes são: sal, gordura animal ou vegetal, água, proteína vegetal e/ou animal, agentes ligantes, aditivos, açúcares, aromas, especiarias e condimentos. Permite-se a adição de proteínas não cárnicas de no máximo 4,0%, como proteína agregada (BRASIL, 2000a). A Tabela 3.5 apresenta as características físico-químicas da mortadela.

Tabela 3.5 Características Físico-químicas da mortadela

Nutrientes	Composição (%)
Amido (máximo)	5,0
Carboidratos Totais (máximo)	10,0
Umidade (máximo)	65,0
Gordura (máximo)	30,0
Proteína (mínimo)	12,0

O processamento industrial de mortadela envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.11.

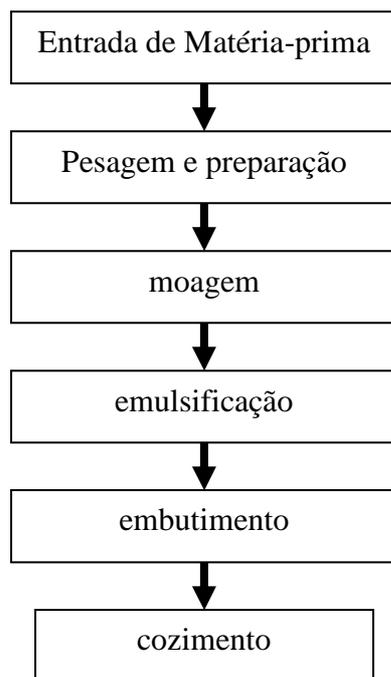


Figura 3.11 Fluxograma de produção de mortadela.

De acordo com as características de cada produto, procede-se à sua formulação em uma batelada de tamanho definido, de acordo com as instalações de processo. São feitas pesagens da carne (bovina e/ou suína e/ou CMS), previamente cominuída (processo pelo qual se fragmenta a carne em pequenos pedaços), e de todos os ingredientes e aditivos necessários a este lote. Dependendo da formulação, incluem-se temperos ou condimentos, toucinho e os chamados extensores e ligantes (fécula, proteína texturizada de soja – PTS, vísceras bovinas e/ou suínas, etc.).

A matéria-prima, carnes bovina, suína e/ou CMS, chegam resfriadas ou congeladas ao frigorífico e são armazenadas em câmaras frias.

A carne é picada e moída com auxílio de equipamentos tais como moedores e/ou quebradores de blocos. A carne moída, bem como os ingredientes do produto, vai sendo colocada em um equipamento chamado “cutter”, que promove uma cominuição fina das carnes e a mistura de todos os ingredientes. É comum a adição de gelo picado, que além de compor o teor de água do produto, promove o resfriamento da massa em processo, para não se exceder à temperatura crítica (16°C), que se aquece pelo atrito com os componentes da máquina. Isto é importante para a qualidade do produto (textura da massa, aspectos organolépticos, controle de eventual crescimento microbiano, etc.). A mistura prossegue até que se obtenha uma emulsão com características específicas.

A emulsão obtida no “cutter” é levada a uma misturadeira, na qual se adiciona certa quantidade de pequenos cubos de toucinho sendo os responsáveis pelas chamadas “olhaduras” típicas deste tipo de produto. Após a mistura do toucinho, a emulsão também segue para a embutidora e, neste caso, geralmente são utilizados envoltórios de maior calibre, que podem ser naturais, celulósicos ou plásticos.

Os produtos embutidos são levados para cozimento em estufas com aquecimento a vapor, onde, dependendo de cada produto, permanecem por um determinado tempo, variando de 4 a 8 horas, passando por vários estágios com aumento gradual de temperatura, até que esta atinja 72°C no ponto mais frio da massa dos produtos.

3.3.6 Lombo Tipo Canadense

O Lombo Tipo Canadense é o produto obtido a partir do corte de carcaças de suínos denominado de lombo, em peça íntegra ou parcial. A este é adicionado ingredientes e embutido em envoltórios naturais e/ou artificiais para ser e submetido ao processo adequado de defumação ou não. Outros ingredientes são: sal, proteína vegetal e/ou animal, açúcares, maltodextrina, aromas, especiarias e condimentos. Permite-se a adição máxima de 2,0% de proteínas não cárneas na forma de proteína agregada (BRASIL, 2000c). A Tabela 3.6 apresenta as características físico-químicas do lombo tipo canadense.

Tabela 3.6 Características Físico-químicas do lombo tipo canadense.

Nutrientes	Composição (%)
Carboidratos Totais (máximo)	1,0
Umidade (máximo)	72,0
Gordura (máximo)	8,0
Proteína (mínimo)	16,0

O processamento industrial de mortadela envolve várias etapas, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 3.12.

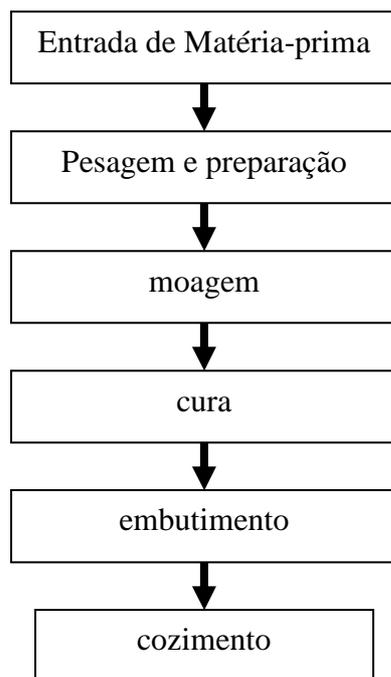


Figura 3.12 Fluxograma de produção de lombo.

De acordo com as características de cada produto, procede-se à sua formulação em uma batelada de tamanho definido, de acordo com as instalações de processo. São feitas pesagens da carne previamente cominuída (processo pelo qual se fragmenta a carne em pequenos pedaços), e de todos os ingredientes e aditivos necessários a este lote. Dependendo da formulação, incluem-se ingredientes de cura, temperos ou condimentos.

A matéria-prima, carnes suínas, chegam resfriadas ou congeladas ao frigorífico e são armazenadas em câmaras frias.

A carne é picada e moída com auxílio de equipamentos tais como moedores e/ou quebradores de blocos. A carne moída, bem como os ingredientes do produto, vai sendo colocada em um misturador, que promove a mistura da carne com todos os ingredientes. A mistura prossegue até que se obtenha uma massa uniforme com características específicas.

A mistura obtida no misturador segue para a embutidora e, neste caso, geralmente são utilizados envoltórios de maior calibre, que podem ser naturais, celulósicos ou plásticos.

Os produtos embutidos são levados para cozimento em estufas com aquecimento a vapor, onde, permanecem por um determinado tempo aproximadamente 8 horas, passando por vários estágios com aumento gradual de temperatura, até que esta atinja 72°C no ponto mais frio da massa dos produtos.

3.4 Higiene

Qualidade é uma exigência aceita e obrigatória internacionalmente para todas as modalidades de serviços, sendo uma questão de sobrevivência para todas as empresas. A segurança alimentar é um componente vital do perfil de um produto e o Código de Defesa do Consumidor considera como direito básico do consumidor, a proteção da vida, saúde e segurança contra riscos provocados por produtos e serviços considerados nocivos ou perigosos (Guerreiro, 2006).

Os maiores problemas relacionados aos alimentos são as intoxicações e infecções alimentares e a deterioração, que são causados por microorganismos. Desta forma, a obtenção de alimentos de qualidade depende do conhecimento das práticas do controle de qualidade, higiene pessoal e limpeza e sanitização.

Um Controle de Qualidade rigoroso é feito em toda a fabricação desse tipo de produto, desde o estágio preliminar (chegada das matérias-primas) em todas as etapas até o final do processo. São verificados na chegada a fábrica as carnes, condimentos, aditivos, ingredientes, e a água, controlando para todos estarem dentro dos padrões para a produção.

Os hábitos de higiene pessoal na indústria são extremamente importantes. Em vários pontos do processamento pode ser necessário o manuseio do produto pelo operário da fábrica de modo que é fundamental dar condições ao mesmo para auxiliá-lo na higiene pessoal. É necessário ter locais para lavagem de mãos espalhados pela fábrica com fluxo de água controlado por pedal. A lavagem de mãos deve ser feita com sabonete líquido bactericida e depois gel sanitizante. As unhas devem estar sempre bem curtas e sem esmalte, os homens devem estar barbeados, e não se devem usar adornos. A vestimenta do funcionário deve ser fornecida pela indústria. O uniforme deve ter protetor de cabelos (quepe ou toucas), botas (devem ser higienizadas antes de entrar na produção) e máscara respiratória. Os empregados devem ser orientados a respeito da higiene pessoal e o perigo de contaminações (Canhos e Dias, 1985).

O processo de limpeza visa à eliminação de materiais nos equipamentos, no chão, utensílios, etc. São tarefas rotineiras da salsicharia as seguintes etapas: pré-lavagem, limpeza com detergente, enxágue, sanitização, lavagem e enxágue final. Na pré-lavagem são removidos com água morna os resíduos que sobraram nos equipamentos, pisos e paredes. Estes resíduos orgânicos diminuem a ação dos detergentes, que serão usados na próxima etapa.

A água não deve ser quente, de forma a evitar a coagulação de proteínas, nem fria, o que provoca a solidificação das gorduras nas superfícies. Em seguida é aplicado o detergente de acordo com o tipo de resíduo encontrado e seguindo as instruções fornecidas na própria ficha técnica do produto. Após a limpeza com detergente, faz-se o enxágue, que pode ser com água fria ou morna, removendo desta forma todos os resíduos ainda remanescentes. A etapa seguinte, a sanitização, tem a finalidade de eliminar os microrganismos da superfície dos equipamentos e materiais. Finalmente faz-se o enxágue final, com água quente para retirar os resíduos dos sanitizantes e deixa-se secar os equipamentos, pisos e paredes (Guerreiro,2006).

4. UMA INDÚSTRIA DE EMBUTIDOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o processo produtivo de uma indústria de produtos embutidos derivados de carne, situada na cidade de Maringá – PR. Os produtos fabricados são presunto, apresuntado, mortadela, salsicha e vários tipos de linguiça.

Na seção 4.2 o processo produtivo é descrito em detalhes e na seção 4.3 é apresentado um modelo matemático de programação inteira mista para o problema de planejamento e programação da produção de curto prazo, bem como um modelo para a programação da produção de longo prazo.

4.2 Processo Produtivo

A partir de observações feitas durante visitas a uma unidade produtora de produtos embutidos derivados de carne e de informações fornecidas pelos funcionários da indústria de embutidos, um fluxograma do processo produtivo foi criado e é apresentado na Figura 4.1.

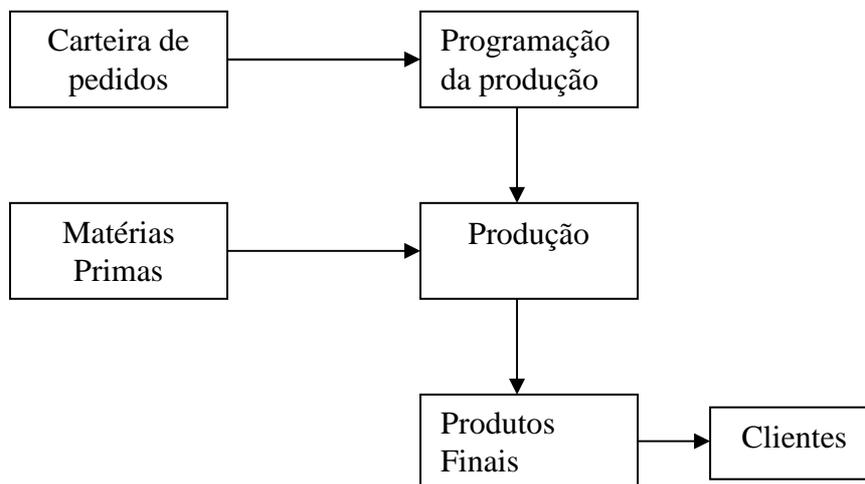


Figura 4.1: Processo produtivo da Indústria de embutidos.

A programação da produção é feita a partir da capacidade da empresa e tomando como referência a produção do mês anterior. Esta produção é dividida em metas semanais e novamente divididas em metas diárias. O gerente de produção toma as decisões baseadas

em sua experiência e bom senso, dando preferência a produtos que estejam com prazos de entrega mais atrasados e para pedidos de clientes especiais. Outros produtos são fabricados para aproveitar a capacidade total da fábrica, evitando assim que equipamentos fiquem ociosos.

Os vários produtos foram agrupados em 8 grupos da seguinte forma: presunto, apresuntado, lombo tipo canadense, mortadela, linguiça frescal, linguiça defumada I, linguiça defumada II e salsicha. Estes grupos consistem de produtos que possuem a mesma matéria prima e processo produtivo, variando apenas quanto ao calibre e conseqüentemente peso do produto final.

Com a programação da produção feita desta maneira a indústria obtém a produção média diária apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Produção média diária na indústria

Produto	Produção Diária (kg)
Presunto	7850
Apresuntado	8500
Lombo tipo canadense	2400
Mortadela	14000
Linguiça frescal	13000
Linguiça defumada I	10300
Linguiça defumada II	2200
Salsicha	47500

Os valores apresentados na tabela 4.1 foram usados na entrada de dados para a resolução dos modelos apresentados.

Os oito produtos produzidos seguem o processo de produção e utilizam os equipamentos apresentado no capítulo 3.

O processo industrial em estudo possui 2 quebradores de blocos, 3 moedores, 5 misturadores, 2 emulsificadores, 3 tanques rotativos (tambler), 7 embutidoras, 14 tanques de cura, 6 fornos de cozimento a vapor, 3 tanque de cozimento em banho maria (cozimento com água), 2 tanques de choque térmico e 5 tanques de resfriamento, cada um destes tanques são divididos em 3 compartimentos.

Os quebradores de blocos, os moedores, os misturadores e os emulsificadores, foram agrupados em uma única operação, chamada de mistura. Devido às diferenças de capacidade e tempo de processamento os quebradores de blocos, os moedores, os misturadores e os emulsificadores puderam ser agrupados em 4 conjuntos e para a produção de presunto a mistura da carne suína em pedaços é misturada com salmoura e outros aditivos em equipamento chamado tumbler.

O processo de produção para cada produto segue a receita dada pela STN mostrada na Figura 4.2 a Figura 4.9. Nestas Figuras as frações mostradas antes ou após os estados, representados pelos círculos, são as porcentagens em massa dos estados produzidos ou consumidos pela tarefa, representadas pelos retângulos, se não houver nenhum número, isto significa que a totalidade do estado foi produzido ou consumido pela tarefa.

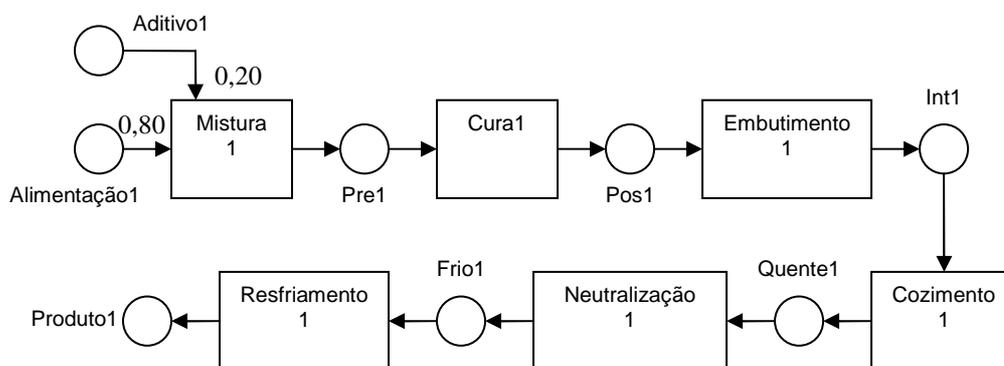


Figura 4.2 STN para a produção de presunto

Para um melhor entendimento da receita de produção representada pela STN, considere a Figura 4.2. A Figura 4.2 mostra a receita de produção do presunto, e com os dados fornecidos pela Tabela 4.2 e Tabela 4.3 tem-se a seguinte receita:

- 1 – Mistura1: misturar 80% da Alimentação1 com 20% do Aditivo1 durante 5 horas para produzir o intermediário Pre1.
- 2 – Cura1: deixar o intermediário Pre1 na cura por 8 horas para produzir o intermediário Pos1.
- 3 – Embutimento1: embutir o intermediário Pos1 por 1uma hora para produzir o intermediário Int1.
- 4 – Cozimento1: cozinhar o intermediário Int1 por 4 horas para produzir o intermediário Quente1.

5 – Neutralização1: Dar um choque térmico por 1 hora para resfriar o intermediário

Quente1 e produzir o intermediário Frio1

6 – Resfriamento1: Deixar o intermediário resfriar por 6 horas para produzir o produto1 (presunto).

As STNs seguintes foram obtidas do mesmo modo.

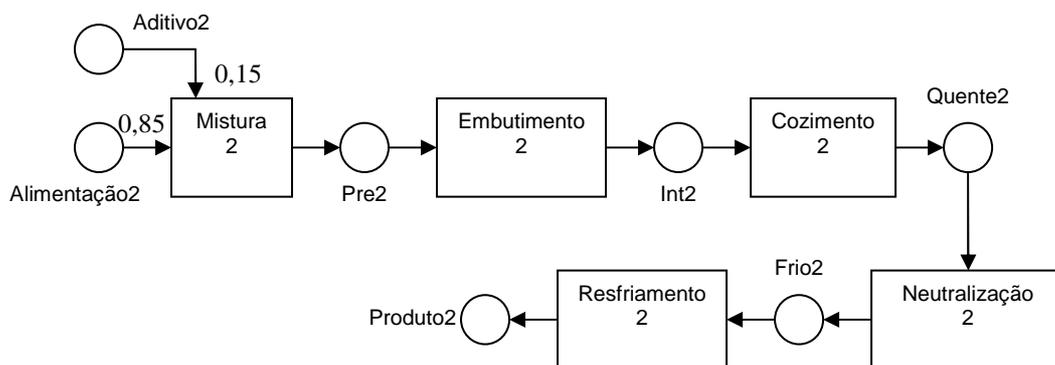


Figura 4.3 STN para a produção de presunto

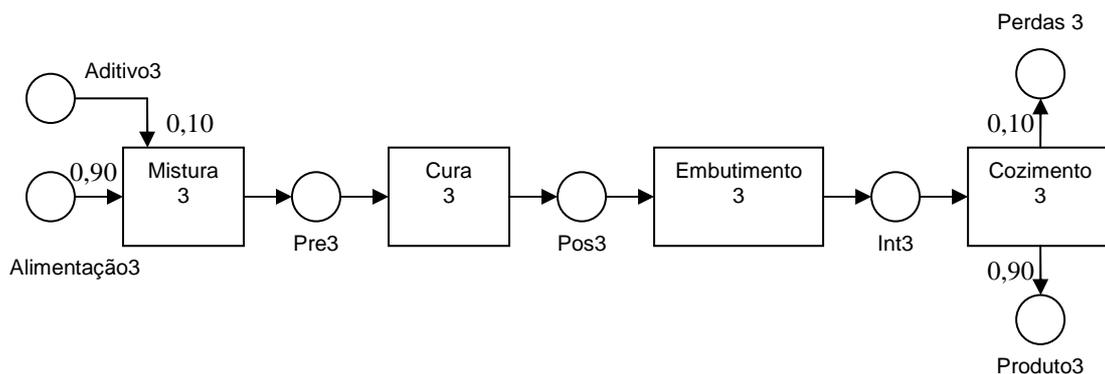


Figura 4.4 STN para a produção de lombo tipo canadense

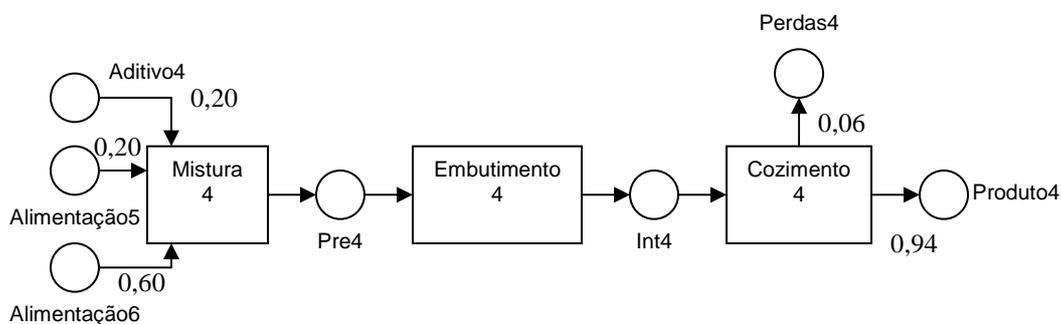


Figura 4.5 STN para a produção de mortadela

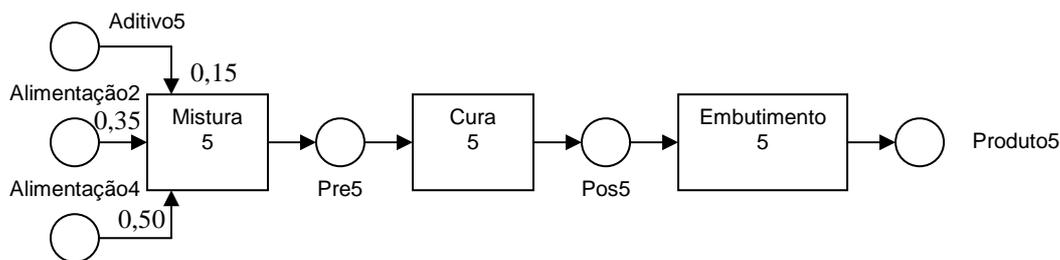


Figura 4.6 STN para a produção de Linguiça fresca

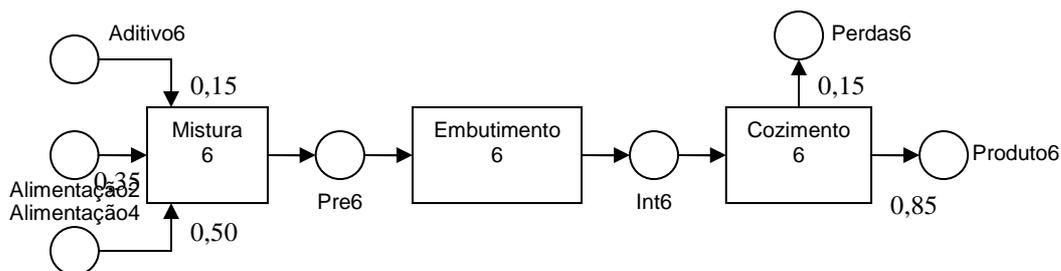


Figura 4.7 STN para a produção de Linguiça defumada I

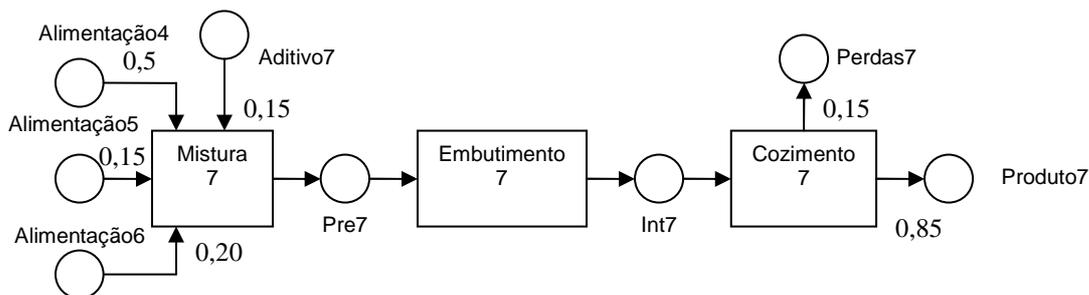


Figura 4.8 STN para a produção de Linguiça defumada II

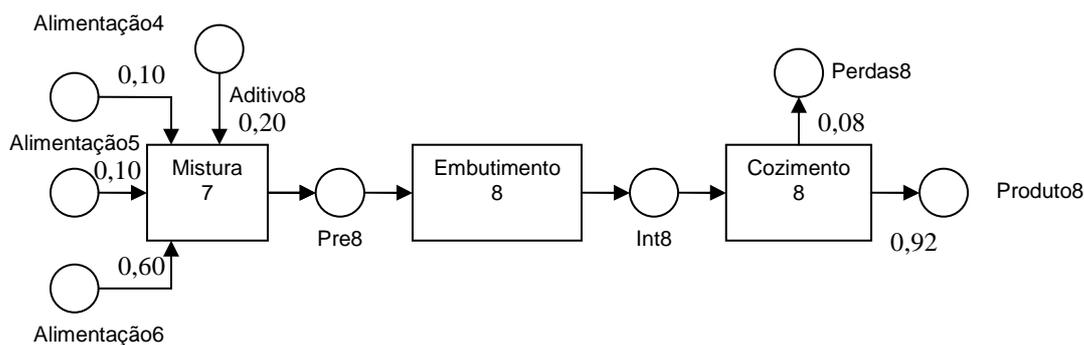


Figura 4.9 STN para a produção de salsicha

A Tabela 4.2 mostra qual processador é adequado para realizar uma determinada tarefa e a Tabela 4.3 mostra a capacidade e o tempo de processamento dos processadores ao realizarem uma determinada tarefa.

Tabela 4.2 Processadores adequado para as tarefas

TAREFAS	PROCESSADORES
mistura 1	tambler 1, tambler 2, tambler 3
mistura 2, mistura 3, mistura 7	misturador 2
mistura 3, mistura 5, mistura 6	misturador 3, misturador 4
mistura 8	misturador 1
cura 1	tcura 1, tcura2
cura 2	tcura 3 ao tcura 10
cura 3	tcura 11 ao tcura 14
embutimento 1, embutimento 2, embutimento 3, embutimento 4	embutidora 1, embutidora 2
embutimento 5, embutimento 6, embutimento 7	embutidora 3, embutidora 4, embutidora 5,
embutimento 8	embutidora 6, embutidora 7
cozimento 1, cozimento 2	cozedora 1 a cozedora 9
cozimento 3, cozimento 4, cozimento 6, cozimento 7, cozimento 8	estufa 4 a estufa 9
choque térmico 1, choque térmico 2	tchoque térmico 1 ao tchoque térmico 6
resfriamento 1, resfriamento 2	resfriador 1 ao resfriador 15

A indústria trabalha com até três turnos de produção de acordo com a demanda de produção. O setor de preparo das massas, local onde as matérias primas são misturadas e embutidas tem um período de trabalho de 18 horas, com duas paradas de uma hora cada para limpeza dos equipamentos, os demais setores trabalham 24 horas seguidas em 3 turnos de operação.

Em muitos casos ocorre a subutilização dos equipamentos devido ao mau planejamento da produção, visto que na indústria, a programação é feita de um modo não computadorizado.

4.3 Modelo Matemático

Na utilização dos dados no modelo matemático utilizado, como ocorre na maioria dos problemas práticos, algumas simplificações e suposições foram consideradas para viabilizar a resolução do modelo, as quais, não comprometem a representação prática do problema.

Os tempos de entrada e saída dos produtos nos equipamentos foram considerados juntamente com o tempo de produção e todos arredondados para períodos de tempo inteiros. Por exemplo, se o tempo de cozimento da salsicha é de 1 hora e 30 minutos, com

tempo de colocação e retirada dos carrinhos com a salsicha do forno de 10 minutos e 12 minutos respectivamente, totalizando um tempo total de 1 hora e 52 minutos, o tempo total de cozimento da salsicha foi considerado sendo de 2 horas. Este acréscimo não afeta a programação uma vez que estes tempos de processamento são variáveis.

Tabela 4.3 Capacidade dos processadores

Processadores	Tarefas	Capacidade (kg)	Tempo de processamento (h)
tambler1	Mistura1.	2800	5
tambler2, tambler3	Mistura1	1100	5
misturador2	Mistura 2	1100	1
misturador2	Mistura 4	2400	1
misturador2	Mistura 7	1400	1
misturador3	Mistura 3	1000	1
misturador3, misturador4	Mistura 5	2600	1
misturador3, misturador4	Mistura 6	1400	1
misturador4	Mistura 3	2400	1
misturador1	Mistura 8	3800	1
Tcura1, Tcura2	Cura1	2800	8
Tcura3, Tcura4, Tcura5, Tcura6, Tcura7, Tcura8, Tcura9, Tcura10	Cura3	500	20
Tcura11, Tcura12, Tcura 13, Tcura14	Cura5	4000	20
embutidora1, embutidora2	Embutimento1	1000	1
embutidora1, embutidora2	Embutimento 2	2200	1
embutidora1, embutidora2	Embutimento 3	2500	1
embutidora1, embutidora2	Embutimento 4	3000	1
embutidora3	Embutimento 5, Embutimento 7	1800	1
embutidora4, embutidora5	Embutimento 5, Embutimento 7	700	1
Embutidora3, embutidora4, embutidora5	Embutimento 6	1000	1
embutidora6	Embutimento 8	2500	1
embutidora7	Embutimento 8	1200	1
cozedora1 à cozedora9	Cozimento1, Cozimento2	500	4
estufa4 à estufa9	Cozimento3,	3200	8
estufa4 à estufa9	Cozimento4	3200	4
estufa4 à estufa9	Cozimento6	1600	4
estufa4 à estufa9	Cozimento7,	2560	4
estufa4 à estufa9	Cozimento8	2560	2
Tchoque_ térmico1 ao, Tchoque_ térmico6	Choque Térmico1, Choque Térmico2	500	1
resfriador1 ao resfriador15	Resfriamento1, Resfriamento2	500	6

Uma indústria de alimentos, como a de embutidos, pode operar de duas maneiras distintas, num modo de curto prazo no qual as demandas de produção variam dia a dia e

existe sempre a necessidade de reavaliar a programação da produção ou num modo de longo prazo no qual as demandas dos produtos são bem definidas, assim pode-se operar a planta industrial de um modo cíclico repetindo a produção por várias semanas.

Os modelos de programação inteira mista propostos a seguir tem como objetivo a maximizar a operacional da produção para a planta industrial operando em curto prazo e longo prazo.

4.3.1 Modelo de curto prazo

Nesta seção utilizou-se o modelo de curto prazo apresentado na seção 2.8 com as seguintes suposições.

O horizonte de tempo para a realização das tarefas foi atribuído como um dia de trabalho e igual a 24 horas. A capacidade mínima para que o equipamento realize a tarefa foi tomado como a metade de sua capacidade máxima. Não foi considerada entrada nem entrega de matérias e produtos durante o horizonte de tempo, somente no final deste. Na função objetivo considerou-se apenas os preços dos produtos finais e intermediários desejados.

Como dados do problema utilizou-se a STN apresentada nas Figuras 4.2 a 4.9 e os dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

O modelo matemático fia como segue:

Maximizar a Função Objetivo

$$\Phi \equiv \sum_s (C_{s,H+1} S_{s,H+1}) \quad (4.1)$$

Sujeito a:

i) Restrições de distribuição.

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t'=t}^{t+\alpha_{ij}-1} W_{i'jt'} - 1 \leq M(1 - W_{ijt}) \quad \forall j \in J, i \in I_j, t \in T, \quad (4.2)$$

ii) Limitações de capacidade.

$$W_{ijt} V_{ij}^{min} \leq B_{ijt} \leq W_{ijt} V_{ij}^{max} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T, \quad (4.3)$$

$$0 \leq S_{st} \leq C_s \quad \forall s \in S, t \in T, \quad (4.5)$$

iii) Balanços de material.

$$S_{st} = S_{s,t-1} + \sum_{i \in I_s^p} \rho_{is}^p \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t-\alpha_{is}} - \sum_{i \in I_s} \rho_{is}^c \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t}, \quad \forall s \in S, t \in T, \quad (4.4)$$

iv) Indisponibilidade temporária de equipamento.

$$W_{ijt} = 0 \quad \forall i \in I_j, t = t_1 - \alpha_{ij} + 1, \dots, t_2 - 1 \quad (4.6)$$

4.3.2 Modelo de Longo Prazo Modo Campanha

Neste modelo considerou-se a indústria operando num modo cíclico de campanha única. No qual os produtos são produzidos dentro de um tempo de ciclo fixo, que será repetido o número de ciclos que contiver a campanha. A função objetivo do modelo leva em conta apenas os produtos produzidos num ciclo de campanha. Assim o modelo apresentado na seção 2.9 torna-se:

Maximizar a Função Objetivo

$$\Phi \equiv \max \sum_s \left(v_s (BS_{sN}^{F'} - BS_{s1}^I) \right) - \sum_s \alpha_s \sum_c \left(T_c \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i IN_{ics}^A \right) \quad (4.7)$$

Sujeito a:

i) Restrições de Ajustamento de Campanha

$$D^{min} X_c \leq n_c T_c \leq D^{max} X_c \quad \forall c \quad (4.8)$$

$$n_c = n_c^{min} X_c + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i L_{ic} \quad \forall c \quad (4.9)$$

ii) Restrições de Balanço de Material sobre uma Campanha

$$BS_{sc}^F = BS_{sc}^I + \sum_{i=0}^{r_c-1} 2^i \hat{S}_{ics} \quad \forall c, s \quad (4.10)$$

$$L_{ic} (\Delta S_{sc}^{min} + T_c r_{sc}^{min}) \leq \hat{S}_{ics} \leq L_{ic} (\Delta S_{sc}^{max} + T_c r_{sc}^{max}) \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (4.11a')$$

$$(1 - L_{ic}) (\Delta S_{sc}^{min} + T_c r_{sc}^{min}) \leq \Delta S_{sc} + T_c r_{sc} - \hat{S}_{ics} \leq (1 - L_{ic}) (\Delta S_{sc}^{max} + T_c r_{sc}^{max}) \quad \forall c, s, i = 0, \dots, r_c - 1 \quad (4.12b')$$

iii) Restrições de Capacidade de Armazenagem e Inventário

$$0 \leq BS_{sc}^I \leq C_s; \quad 0 \leq BS_{sc}^F \leq C_s \quad \forall c, s \quad (4.13a \text{ e } b)$$

iv) Restrições de Distribuição

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta=0}^{p_i-1} W_{ij, \tau_c(t-\theta)}^c \leq X_c \quad \forall c, j, t = 1, \dots, T_c \quad (4.14)$$

v) Restrições de Tamanho de Batelada

$$V_j W_{ijt}^c \leq B_{ijt}^c \leq V_j W_{ijt}^c \quad \forall c, j, i \in I_j, t = 1, \dots, T_c \quad (4.15)$$

vi) Restrições de Balanço de Material num Ciclo

$$S_{st}^c = S_{s,t-1}^c + \sum_{i \in T} \sum_{j \in K_i} \bar{\rho}_{is} B_{ij, \tau_c(t-p_{is})}^c - \sum_{i \in T_s} \sum_{j \in K_i} \rho_{is} B_{ijt}^c \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (4.16)$$

$$0 \leq S_{st}^c \leq C_s \quad \forall c, s, t = 1, \dots, T_c + 1 \quad (4.17)$$

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os modelos apresentados no Capítulo 4 possuem uma grande quantidade de variáveis e restrições. Por isso escolheu-se o pacote computacional GAMS/Cplex que contém uma linguagem de modelagem algébrica em programação matemática e o otimizador Cplex. O GAMS foi especificamente criado para modelagem de problemas lineares, não lineares e inteiros mistos. O sistema é especialmente útil para problemas grandes e complexos. O GAMS está disponível para uso em computadores pessoais até supercomputadores. O GAMS leva o usuário a se concentrar no modelo, abstraindo-se dos algoritmos de resolução. Ao usar o GAMS, os dados são inseridos s uma única vez na forma de listas e tabelas. Modelos são descritos em concisas declarações algébricas que são fáceis de ler tanto para os seres humanos quanto para máquinas. Um exemplo da implementação de um modelo na linguagem de modelagem GAMS é apresentado no Apêndice B. O Cplex é um algoritmo para problemas de programação linear, e linear inteiro misto. Para problema de Programação Linear Inteiro Mista (PLIM), como os modelos apresentados no Capítulo 4, o Cplex utiliza um algoritmo do tipo *branch & bound* com cortes. Este algoritmo soluciona uma série de subproblemas do tipo PL, levando o Cplex a uma grande quantidade de memória e um significativo esforço computacional. Todos os resultados apresentados nas próximas seções foram obtidos em um computador com processador Intel Celeron D336 com processador de 2,8 GHz, o qual resolve uma série de subproblemas LP. Porque um único PLIM gera muitos subproblemas, mesmo problemas simples (Brooke, *et al.* 1992).

Nas seções seguintes avaliaram-se algumas situações comumente encontradas na indústria de embutidos.

5.1 Indústria em Início de Operação

O objetivo deste caso foi simular o modo de operação de uma indústria de embutidos, que começa sua operação sem nenhum estoque de produtos e intermediários, apenas com toda a matéria prima necessária disponível. Como existem produtos com tempos de duração muito longos comparados ao horizonte de tempo ou tempo de ciclo (ambos igual a 24 horas). Foi feita a seguinte consideração, no primeiro dia de operação da indústria, o objetivo foi maximizar a produção dos produtos e dos intermediários desejados para que a indústria produza no segundo dia de uma maneira cíclica.

5.1.1 Primeiro Dia de Produção

Nesta condição considerou-se que a indústria não possui nenhum estado (produto intermediário ou final) no estoque. Que devido ao longo período de tempo necessários para a cura na fabricação dos seguintes produtos presunto, lombo tipo canadense e linguiça frescal (produtos p1, p3 e p5 respectivamente), neste primeiro dia não é possível produzir todos os 8 produtos, portanto o objetivo da programação da produção é produzir o máximo de produtos curados (pos1, pos3 e pos5), intermediários embutidos (int1, int2, int3, int4, int6, int7 e int8) e intermediários de mistura (pre1, pre2, pre3, pre4, pre5, pre6, pre7 e pre8) e o máximo de produtos finais obedecendo a uma demanda mínima. Esta demanda mínima de produção de cada um dos produtos é a produção média diária da indústria apresentada na Tabela 4.1. Para que fosse possível a elaboração da programação da produção nesta condição, foram atribuídos pesos (preços) diferentes para cada um destes produtos, como apresentado na Tabela 5.1, sendo os pesos maiores atribuídos aos estados que deseja-se maior produção ao final do horizonte de tempo.

Tabela 5.1 Peso dos Estados

Estados	Peso
Produtos	10
Pós	3
Int	2
pre	1

A programação da produção ótima para esta aplicação do modelo está apresentada no Gráfico de Gantt das Figuras A.1 e A.2 (todas os Gráficos de Gantt estão apresentadas no Apêndice A). O número acima de cada barra representa a tarefa que está sendo executada, e o número abaixo representa a quantidade de material que está sendo processado (isto é válido para todos os outros Gráficos de Gantt apresentados neste texto). Cada uma das cores no Gráfico de Gantt representa o caminho percorrido para a fabricação de cada um dos produtos, desde a entrada de matéria-prima até sua produção final. A Tabela 5.2, apresenta cada um dos oito produtos com a sua respectiva cor utilizado no Gráfico de Gantt.

Deve-se notar que esta solução não é única, sabe-se que muitas outras programações da produção podem produzir o mesmo valor da função objetivo.

Tabela 5.2 Cores que representam os produtos

Produto	Cor
Presunto	
Apresentado	
Lombo tipo canadense	
Mortadela	
Linguiça frescal	
Linguiça defumada I	
Linguiça defuma da II	
Salsicha	

Para melhor entender o Gráfico de Gantt , a seguir, destacou-se uma parte do Gráfico de Gantt da figura A.1, que mostra a programação da produção da linguiça defumada II (produto 7) isoladamente.

PROCESSADOR											TAREFA
TMISTURA2	7		7								7 mistura7
	1400		1400								
EMBUTIDORA3			27		27						27 embutimento7
			1400		1400						
ESTUFA8							37				37 cozimento7
							2560				
Tempo	12	13	14	15	16	17	18	19	20		

Figura 5.1 Gráfico de Gantt para o produto 7

A Figura 5.1 mostra a sequência de produção para a linguiça defumada II. Da Figura 5.1 juntamente com a Figura 4.8 e as Tabelas 4.2 e 4.3, obtêm-se as seguintes informações:

i) 1400 kg de matéria prima (50% Alimentação₄, 15% Alimentação₅, 20% Alimentação₆ e 15% Aditivo₇) são adicionados no tmistura2 (misturador 2), para iniciar a tarefa de mistura₇, no intervalo de tempo 12, por uma hora, para produzir o produto misturado (pre₇) que é mantido em estoque em outro tanque, após a parada para limpeza da sala de massas, no intervalo de tempo 13, com duração de 1 hora, mais 1400 kg de matéria prima segue o mesmo procedimento, agora no intervalo de tempo 14.

ii) Na sequência 1400 kg de produto misturado (pre7) resultante da mistura7 inicia no intervalo de tempo 14, a tarefa de embutimento7 na embutidora3 durante uma hora, para produzir o produto embutido (int7) que é colocada em varais nos carros de cozimento para estufa, para em seguida no intervalo 15, mais 1400 kg do produto misturado pre7 passa pelo mesmo processo por uma hora.

iii) Por último 2560 kg de produto embutido, no intervalo de tempo 17, inicia a tarefa de cozimento7 (cozimento a vapor), pelo período de 4 horas, na estufa8, após este intervalo de tempo, são produzidos 2176 kg de linguiça defumada II, sendo que a diferença de 384 kg entre o que entra na estufa e o produzido são perdas de água (umidade) do processo de cozimento.

Analisando as Figuras A.1 e A.2 verificou-se que ocorreu a produção dos 5 produtos (apresentado, mortadela, linguiça defumada I, linguiça defumada II e salsicha) que não precisam sofrer o processo de cura e a produção dos estados após a cura além de manter em estoque produtos intermediários. Além de fornecer as quantidades consumidas e produzidas de cada estado, o Gráfico de Gantt também fornece para cada tarefa, a quantidade do estado que será produzido, em qual intervalo de tempo e em qual equipamento, mostrando-se útil para a operação da fábrica..

A Tabela 5.3 mostra a produção obtida pela programação da produção de todos os produtos e intermediários e seus respectivos estoques ao final da produção.

5.1.2 Segundo dia de Produção

Nesta situação considerou-se a existência de intermediários em estoque, estes estoques são aqueles mantidos ao final do primeiro dia de produção. Devido a existência de estoques de intermediários no início desta operação, pode-se simular a produção num modo de operação cíclico. No final de cada ciclo de produção tem-se a necessidade de manter estoques de intermediários pra o ciclo seguinte, portanto para obter este resultado na programação, além de atribuir pesos (preços) para todos os produtos também foram atribuídos pesos (preços) para os intermediários desejados de acordo com a Tabela 5.1.

A programação da produção ótima para esta aplicação do modelo está apresentado no Gráfico de Gantt das Figuras A.3 e A.4. Como foi mencionado anteriormente esta solução ótima não é única.

Analisando as Figuras A.3 e A.4, observa-se que no modo cíclico, com pesos atribuídos para os produtos intermediários, praticamente não há ociosidade de

equipamentos e se ocorrer a necessidade de manutenção de algum equipamento, a produção ficará comprometida, por outro lado a aquisição de equipamento novo pode melhorar o desempenho da produção.

Tabela 5.3 Produção e consumo para o Dia 1

Estado	Produção (kg)	Consumido (kg)	Estoque (kg)
Presunto	0,0	0,0	0,0
Apresentado	8500,0	0,0	8500,0
Lombo tipo canadense	0,0	0,0	0,0
Mortadela	10528,0	0,0	10528,0
Linguiça Frescal	0,0	0,0	0,0
Linguiça defumada I	20400,0	0,0	20400,0
Linguiça defumada II	2176,0	0,0	2176,0
Salsicha	49459,2	0,0	49459,2
Pos1	10600,0	0,0	10600,0
Pos3	4000,0	0,0	4000,0
Pos5	9200,0	0,0	9200,0
Int1	0,0	0,0	0,0
Int2	8800,0	8500,0	300,0
Int3	0,0	0,0	0,0
Int4	12000,0	11200,0	800,0
Int6	28800,0	24000,0	4800,0
Int7	2800,0	2560,0	240,0
Int8	55500,0	53760,0	1740,0
Pre1	20000,0	10600,0	9400,0
Pre2	8800,0	8800,0	0,0
Pre3	4800,0	4000,0	800,0
Pre4	14400,0	12000,0	2400,0
Pre5	15600,0	9200,0	6400,0
Pre6	33600,0	28800,0	4800,0
Pre7	2800,0	2800,0	0,0
Pre8	60800,0	55500,0	5300,0

A tabela 5.4 apresenta a produção do segundo dia de operação, com os respectivos consumo e estoque dos produtos ao final do dia.

Se objetivo for maximizar a produção de qualquer um dos produtos, é necessário somente alterar o valor da demanda mínima de produção e/ou o peso (preço) deste produto.

Tabela 5.4 Produção e consumo para o Dia 2

Estado	Produção (kg)	Consumido (kg)	Estoque (kg)
Presunto	14500,0	0,0	14500,0
Apresuntado	8800,0	0,0	8800,0
Lombo tipo canadense	2880,0	0,0	2880,0
Mortadela	8272,0	0,0	8272,0
Linguiça Frescal	16000,0	0,0	16000,0
Linguiça defumada I	21930,0	0,0	21930,0
Linguiça defumada II	2380,0	0,0	2380,0
Salsicha	51041,6	0,0	51041,6
Pos1	15000,0	14500,0	500,0
Pos3	4000,0	3500,0	500,0
Pos5	16000,0	16000,0	0,0
Int1	14500,0	14500,0	0,0
Int2	8800,0	8800,0	0,0
Int3	3500,0	3200,0	300,0
Int4	12000,0	8800,0	3200,0
Int6	25800,0	25800,0	0,0
Int7	2800,0	2800,0	0,0
Int8	55500,0	55480,0	20,0
Pre1	20000,0	15000,0	5000,0
Pre2	8800,0	8800,0	0,0
Pre3	4800,0	3500,0	1300,0
Pre4	14400,0	12000,0	2400,0
Pre5	26000,0	16000,0	10000,0
Pre6	28000,0	25800,0	2200,0
Pre7	2800,0	2800,0	0,0
Pre8	60800,0	55500,0	5300,0

5.2 Indústria Operando no modo de Campanha Única

Neste caso o objetivo foi otimizar a produção quando a indústria opera num modo de campanha. Isto ocorre quando a demanda de produção é bem definida, devido à fidelidade dos clientes ou na certeza que conseguirá comercializar toda a produção.

Nesta etapa do trabalho o objetivo foi otimizar a produção mássica da indústria, isto é a máxima quantidade de massa de cada produto, para isto foram feitos dois estudos de caso: no primeiro foi estabelecido que os preços (pesos) dos produtos tivessem o mesmo preço final e no segundo atribuiu-se preços de mercado aos produtos finais.

5.2.1 Operação em Campanha Única com Pesos Iguais

O objetivo deste caso foi simular a operação da planta industrial visando maximização da produção mássica dos produtos levando em conta os produtos com pesos iguais e demanda mínima de produção para cada um dos produtos.

O Gráfico de Gantt representada pelas figuras A.5 e A.6 mostra o programa de produção ótimo para esta aplicação do modelo. A tabela 5.5 mostra a produção dos produtos junto com sua respectiva demanda mínima e mostra também a produção quando utiliza os preços de mercado dos produtos.

Tabela 5.5 Produção para pesos iguais e preços de mercado.

Produto	Demanda Mínima (kg)	Produção (pesos iguais)(kg)	Produção (mercado)(kg)
Presunto	5300,0	14600,0	13600,0
Apresentado	8500,0	8500,0	8800,0
Lombo tipo canadense	2400,0	2700,0	2880,0
Mortadela	7000,0	11280,0	8460,0
Linguiça Frescal	7500,0	13200,0	15700,0
Linguiça defumada tipo I	10000,0	20400,0	23630,0
Linguiça defumada tipo II	2200,0	2380,0	3570,0
Salsicha	34000,0	51060,0	51060,0
Total	76900,0	124120,0	127700,0

5.2.2 Operação em Campanha Única com Preços de Mercado.

Neste caso, o objetivo foi simular a operação da planta industrial visando maximização da produção levando em conta o preço dos produtos, isto é, o preço em reais por quilograma (R\$/kg) e demanda mínima de produção para cada um dos produtos.

Os valores de mercado para os 8 produtos foram pesquisados. Estes valores são os preços de gôndola dos produtos fabricados pela indústria estudada, comercializados por uma rede atacadista da região de Maringá – PR e os valores encontrados são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Preços de Mercado

Produto	Preço R\$/kg
Presunto	5,50
Apresentado	3,30
Lombo tipo canadense	8,60
Mortadela	2,35
linguiça frescal	4,60
linguiça defumada I	5,40
linguiça defumada II	3,60
Salsicha	2,40

Com os valores de mercado dos produtos foi feita a programação da produção no modo de campanha única e os resultados comparados com o caso de produtos com peso único. A programação da produção ótima para esta aplicação do modelo está representado no Gráfico de Gantt da figura A.7 e A.8.

Ao analisar as figuras A.5 e A.6, bem como as figuras A.7 e A.8, observou-se que não há visualmente diferenças na utilização dos equipamentos, apenas diferenças na produção dos produtos como pode ser verificado pela tabela 5.6, isto devido somente aos diferentes pesos (preços) atribuídos aos produtos em cada um dos dois casos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O objetivo do trabalho foi à utilização de um processo de programação com vistas à utilização de métodos sistemáticos de otimização aplicados a indústria de embutidos, visando à otimização operacional da indústria.

O modelo matemático é um ponto de partida e mudanças no modelo envolvendo redução de parâmetros, redução de variáveis e reformulação de restrições pode levar a formulação mais simples.

O problema foi modelado matematicamente como um problema de programação linear inteiro mista (PLIM), e o principal objetivo foi o atender a demanda mínima de cada produto atendendo as necessidades imediatas da indústria e maximizar a produção.

Os resultados computacionais mostraram que a abordagem foi eficiente para os casos propostos e a resolução do modelo, utilizando o GAMS/Cplex, levaram a tempos computacionais viáveis para ser utilizado na prática da indústria.

Os resultados apresentados na forma de Gráfico de Gantt fornece à indústria uma ótima ferramenta para utilização no chão de fábrica.

Um aspecto positivo da abordagem é que ela permite a reprogramação da produção em função da mudança na demanda de produtos e variações nos preços dos produtos finais.

A análise dos resultados obtidos, a partir da aplicação dos modelos com dados operacionais coletados numa indústria local, possibilita a tomada das decisões de programação de produção em indústria de embutidos.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

O assunto desenvolvido não esgota as possibilidades de futuros trabalhos que busquem a otimização da produção de uma indústria de embutidos.

As sugestões mais imediatas visando otimização da produção de uma indústria de embutidos são as seguintes:

- Pesquisar o efeito do custo e restrição das matérias primas e o preço dos produtos finais na otimização.
- Pesquisar o efeito do custo e restrição de mão de obra na otimização da produção.
- Utilizar no modelo o setor de embalagens para fins de otimização.

- Otimizar o uso de sal(sódio) na produção de embutidos.
- Melhorar a interface de entrada de dados e saída de resultados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLEQUIST, G.; SAMIKOGLU, O.; PEKNY, J. F. AND REKLAITIS, G. V.,1997., “Issues in the Use, Design and Evolution of Process Scheduling and Planning Systems”, *ISA Transactions*, Vol. 38, No. 4, pp. 983-997.
- BIREWAR, D. B. AND GROSSMAN, I. E., 1990, “Simultaneous Production Planning and Scheduling in Multiproduct Batch Plants”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 29, pp. 570-580.
- BRASIL, 1998, Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária – ANVISA. Portaria nº 1004/1998. Regulamento Técnico – Atribuição de função de aditivos e seus limites máximos de uso para a categoria 8 – carnes e produtos cárneos. Diário Oficial da União (seção 1), Brasília, 11/12/1998, disponível em <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/>, acesso em: março 2010.
- BRASIL, 2000a, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 04/2000. Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade de Carne Mecanicamente Separada, de Mortadela, de Linguiça e de Salsicha. Diário Oficial da União, Brasília, 05/04/2000. disponível em <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/>, acesso em: março 2010.
- BRASIL, 2000b, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 07/2000. Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade de Almôndega, de Apresuntado, de Fiambre, de Linguiça, de Kibe, de Presunto Cozido e de Presunto. Diário Oficial da União, Brasília, 31/07/2000. disponível em <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/>, acesso em: março 2010.
- BRASIL, 2000c, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 07/2000. Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade de Patê, de Bacon ou Barriga Defumada e de Lombo Suíno. Diário Oficial da União, Brasília, 31/07/2000. disponível em <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/>, acesso em: março 2010.

- BROOKE, A., KENDRICK, D. AND MEERAUS, A., 1992, *GAMS – Sistema Geral de Modelagem Algébrica*, 1ª ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.
- CANHOS, D. A. L., DIAS, E. L., 1985, *Tecnologia de Carne Bovina e Produtos Derivados*, Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia. São Paulo.
- CORETTI, K., 1997, “O desenvolvimento da indústria de tripas” *Revista Nacional da Carne*. São Paulo, n. 245, p.49.
- EDGAR, T. F., HIMMELBLAU, D. M., AND LASDON, L. S., 2002, *Optimization of Chemical Process*, 2ª ed. McGraw-Hill.
- FERREIRA, S. M. R., CAMARGO, L., 1993. Aditivos em Alimentos. *Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos*. Curitiba, v. 11, n. 2., p. 159-175.
- FLOUDAS, C. A. AND LIN, X., 2005, “Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications”, *Annals of Operations Research*, 139 pp. 131-162.
- FLOUDAS, C. A. AND LIN, X., 2004, “Continuous-time Versus Discrete-time Approaches for Scheduling of Chemical Processes: a Review”, *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 28, pp. 2109-2129.
- GAVA, A. J., 1988, *Princípios de Tecnologia de Alimentos*, 1ª edição. São Paulo: Nobel.
- GOUVÊA, J. A. G., GOUVÊA, A. A. L., 2007, “Dossiê Técnico: Carne Mecanicamente Separada”, *Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas*, Rede de Tecnologia da Bahia, maio de 2007.
- GUERREIRO, L., 2006, “Dossiê Técnico: Produção de Salsicha”, *Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas*, Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, outubro de 2006.

- KONDILI, E.; PANTELIDES, C. C. AND SARGENT, R. W. H., 1993, "A General Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations – I. MILP Formulation", *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 17, No. 2, pp. 211-227.
- KU, H., RAJAGOPALAN, D. AND KARIMI, I., 1987, "Scheduling in Batch Processes", *Chem. Eng. Prog.* August. 35-47.
- LAPSHIN, I., 1962, *8th Meeting European Meat Res. Workers*, Moscow, Paper N°39.
- MAUDERLI, A. and RIPPIN, D. W. T., 1979, "Production Planning and Scheduling for Multi-Purpose Batch Chemical Plants *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 3, pp. 199-206.
- MENDÉZ, C. A. et al., 2006, "State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes", *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 30, pp. 913-946.
- PAPAGEORGIU, L. G. AND PANTELIDES, C. C., 1996a, "Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 1. Mathematical Formulation". *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, 488-509.
- PAPAGEORGIU, L. G. AND PANTELIDES, C. C., 1996b, "Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 2. A Mathematical Decomposition Approach". *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, 510-529.
- PARDI M. C., et al, 1994. "*Ciência, Higiene e Tecnologia da Carne*". V.2. Goiânia: editora UFG.
- PEKNY, J. F. AND REKLAITIS, G. V., 1998,. "Towards the Convergence of Theory and Practice: A Technology Guide for Scheduling/Planning Methodology". *Proceedings of the Foundations of Computer Aided Process Operations Conference-FOCAPO'98*, pp. 1-20. Snowbird, Utah.

- PÓVOA, A. P. F. D. B., 1994, “*Detailed Design and Retrofit of Multipurpose Batch plants*”, PhD. Thesis, University of London, London, UK.
- MILNER, K., 1963. *9th Meeting European Meat Res. Workers*, Budapest, Paper N°44.
- REKLAITIS, G. V., 1995, “Computer-Aided Design and Operation of Batch Processes”. *Chemical Engineering Education*. Spring, pp. 76-85.
- ROÇA, R.O., 2000, *Tecnologia da carne e produtos derivados*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.
- ROCCO S. C., 1996, *Embutidos, Frios e Defumados*, Embrapa – SPI, Coleção Saber, 94p
- RODRIGUES. F. A., 1978, *Tecnologia dos Produtos Cárneos*. Instituto de Tecnologia de Alimentos. ITAL/EMBRAPA Campinas.
- SAVIC, I. V., 1985, *Small-scale Sausage Production*, FAO, Animal Production and Health Papers – 52, Roma.
- SHAH, N. AND PANTELIDES, C. C., 1991, “Optimal Long-Term Campaign Planning and Design of Batch Operations”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 30. pp. 2308-2321.
- SHAH, N.; PANTELIDES, C. C. AND SARGENT, R. W. H., 1993a,. “A General Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations – II. Computational Issues”. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 17, No. 2, pp. 219-244.
- SHAH, N.; PANTELIDES, C. C. AND SARGENT, R. W. H., 1993b, “Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Batch Plants”. *Annals of Operations Research*, 42, 193-228.
- SHAH, N., 1998, “Single and Multiple Planning and Scheduling: Current Status and Future Challenges”. *Proceedings of the Foundations of Computer Aided Process Operations Conference*, Snowbird, Utah.

SIMÃO, A. M., 1986, *Aditivos para alimentos sob o aspecto toxicológico*. 2ª edição. São Paulo: editora Nobel.

TAKAHASHI, G., 1980, *Ingredientes e suas Funções na Fabricação de Produtos Cárneos*. Obra Coletiva. UNICAMP, Campinas.

TERRA, N. In SHIMOKOMAKI, M.; OLIVO, R; TERRA, N; FRANCO, B., 2006, *Atualidades em Ciência e Tecnologia de Carnes*. São Paulo: Varela.

TOLEDO, M. C. F., 1990, “Nitratos e Nitritos: presença em alimentos e riscos de sua ingestão”. *Revista Nutrição da PUCCAMP*. V. 3, n. 1. Campinas.

VARNAM, A. H.; SUTHERLAND, J. P., 1998, *Carne y productos cárnicos: tecnología, química y microbiología*. Zaragoza: Acribia, p 423.

WILSON, J. M., 2003, “Gantt charts: A centenary appreciation”. *European Journal of Operational Research*, 149, 430-437.

WINSTON, W. L., ALBRIGHT, S. C. BRANDIE, M., 2001, *Practical Management Science*. 2ª ed. Duxburg/Thomson Learning

ZIMBER, K., 1985, “Importância do uso correto dos aditivos na Indústria da Carne”. *Revista Nacional da Carne*, n. 8, p. 15-26, agosto.

APÊNDICE A. GRÁFICOS DE GANTT

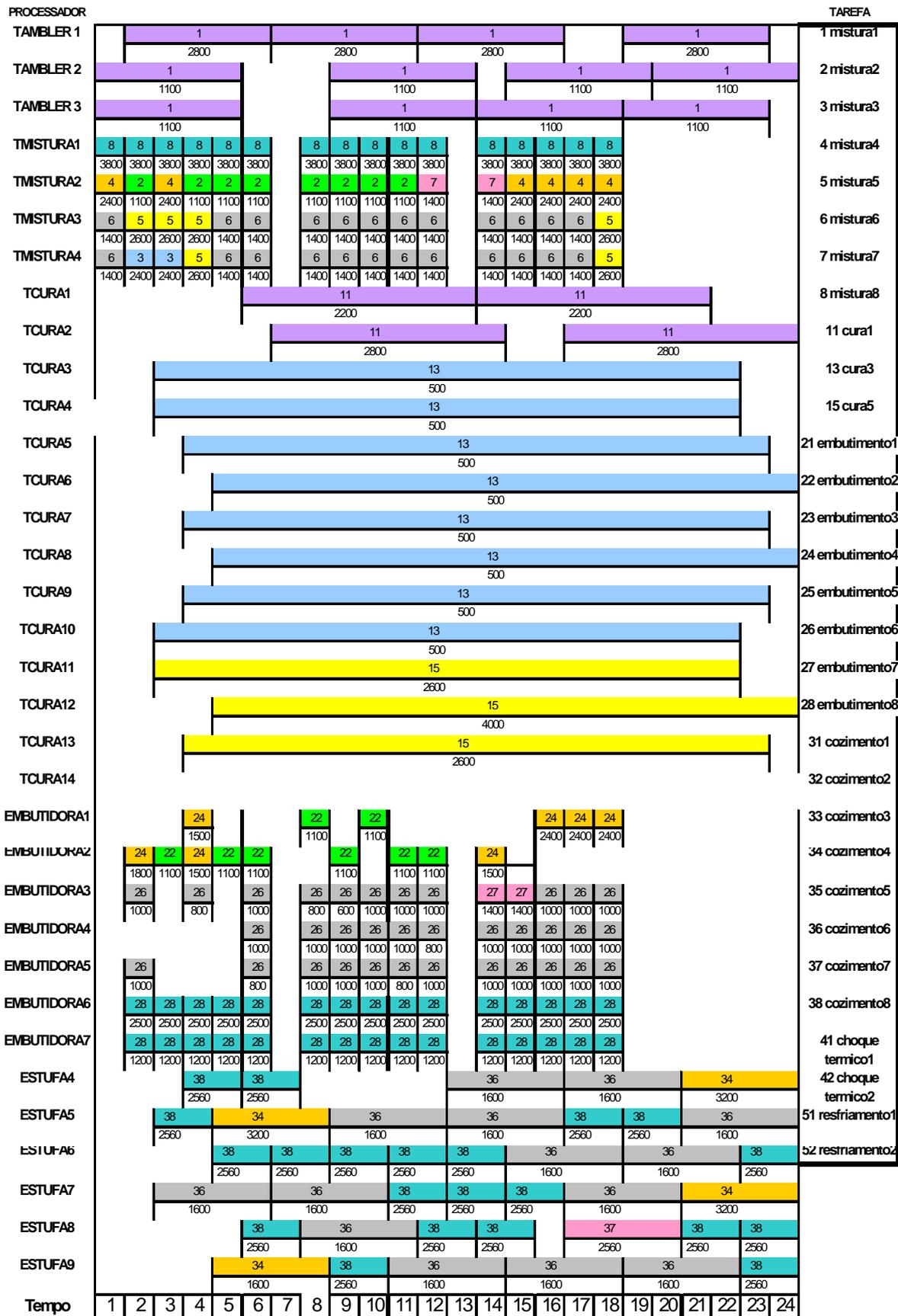


Figura A.1 Gráfico de Gantt para dia 1 (a)

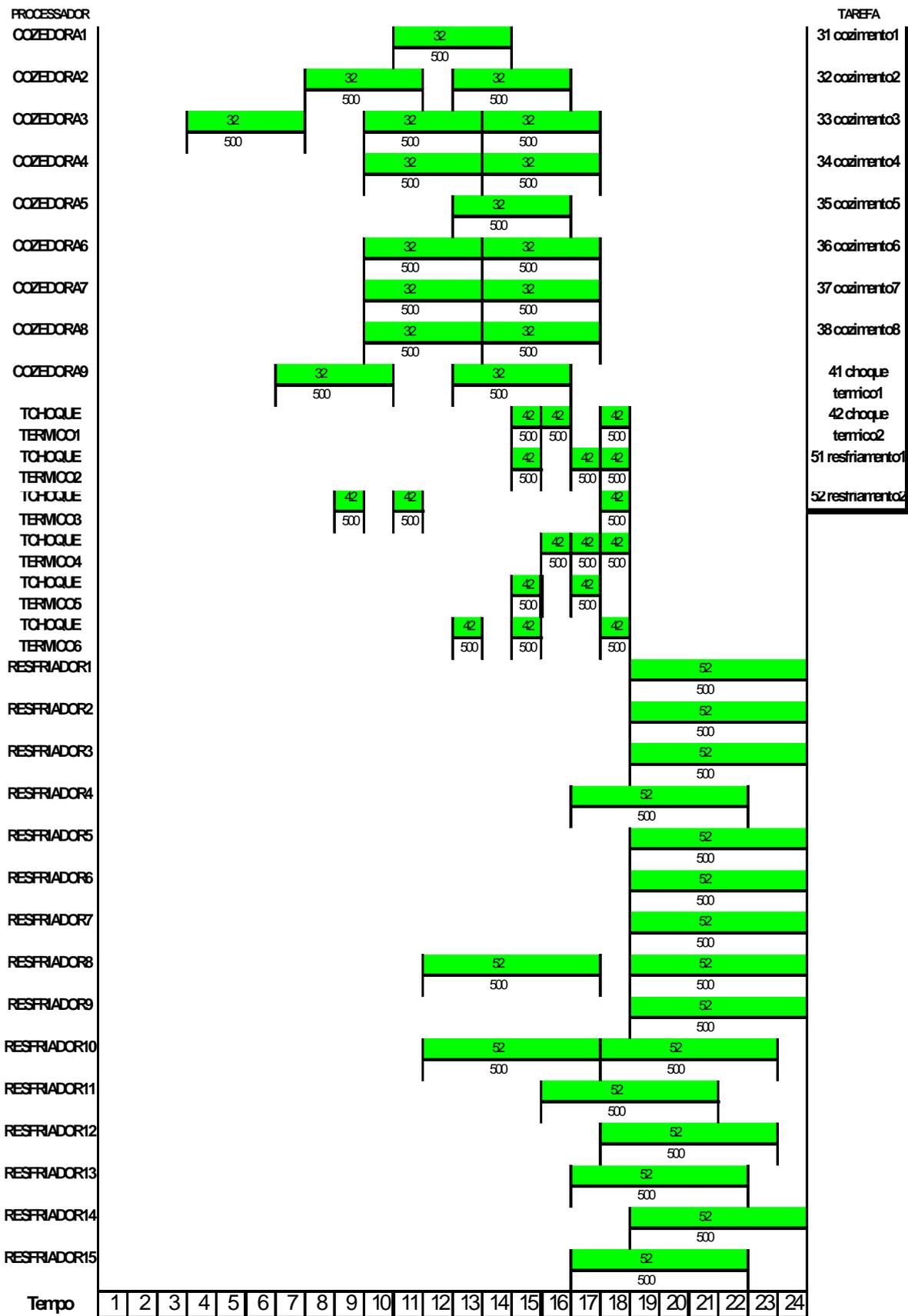


Figura A.2 Gráfico de Gantt para dia 1 (b).

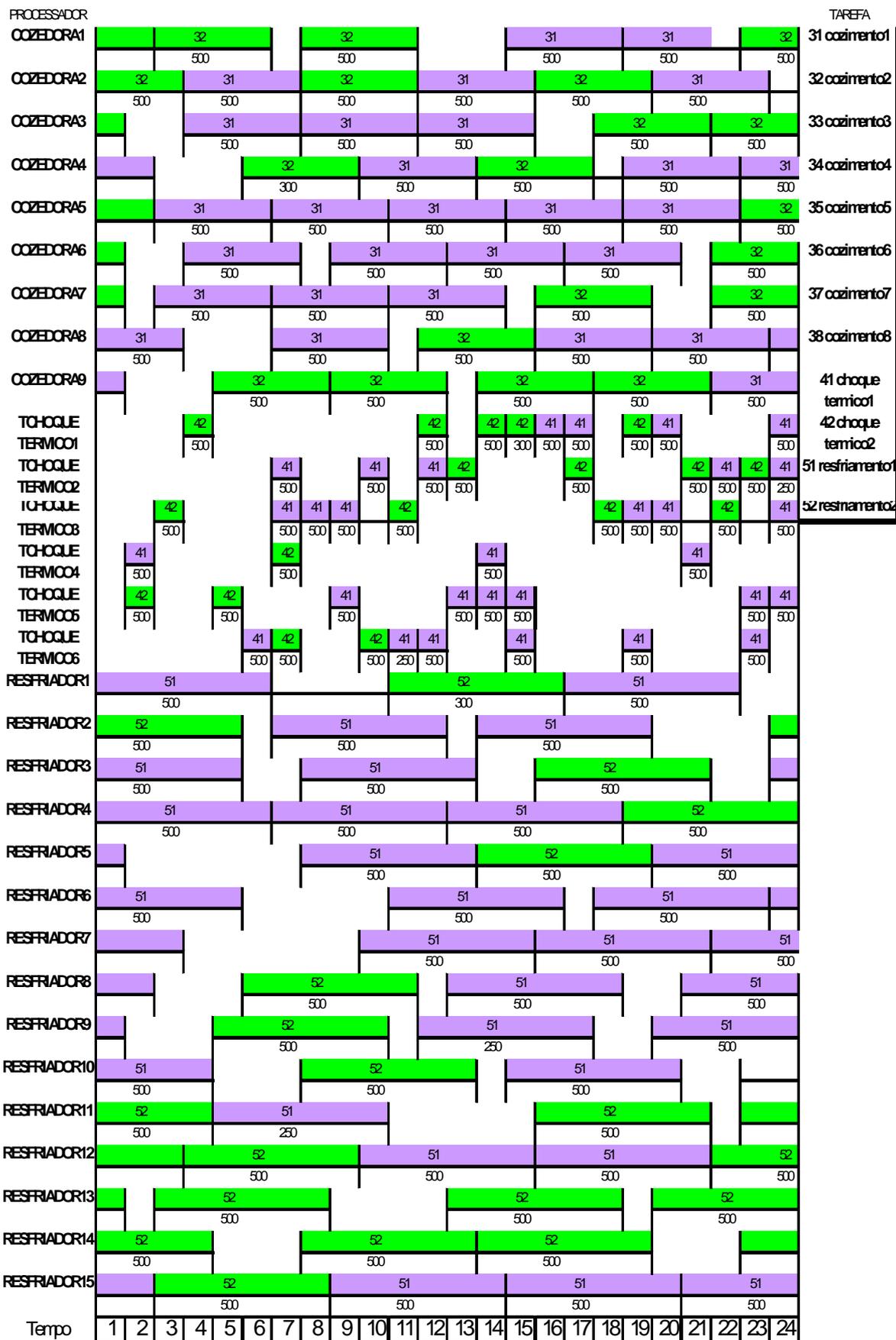


Figura A.4 Gráfico de Gantt para dia 2 (b)

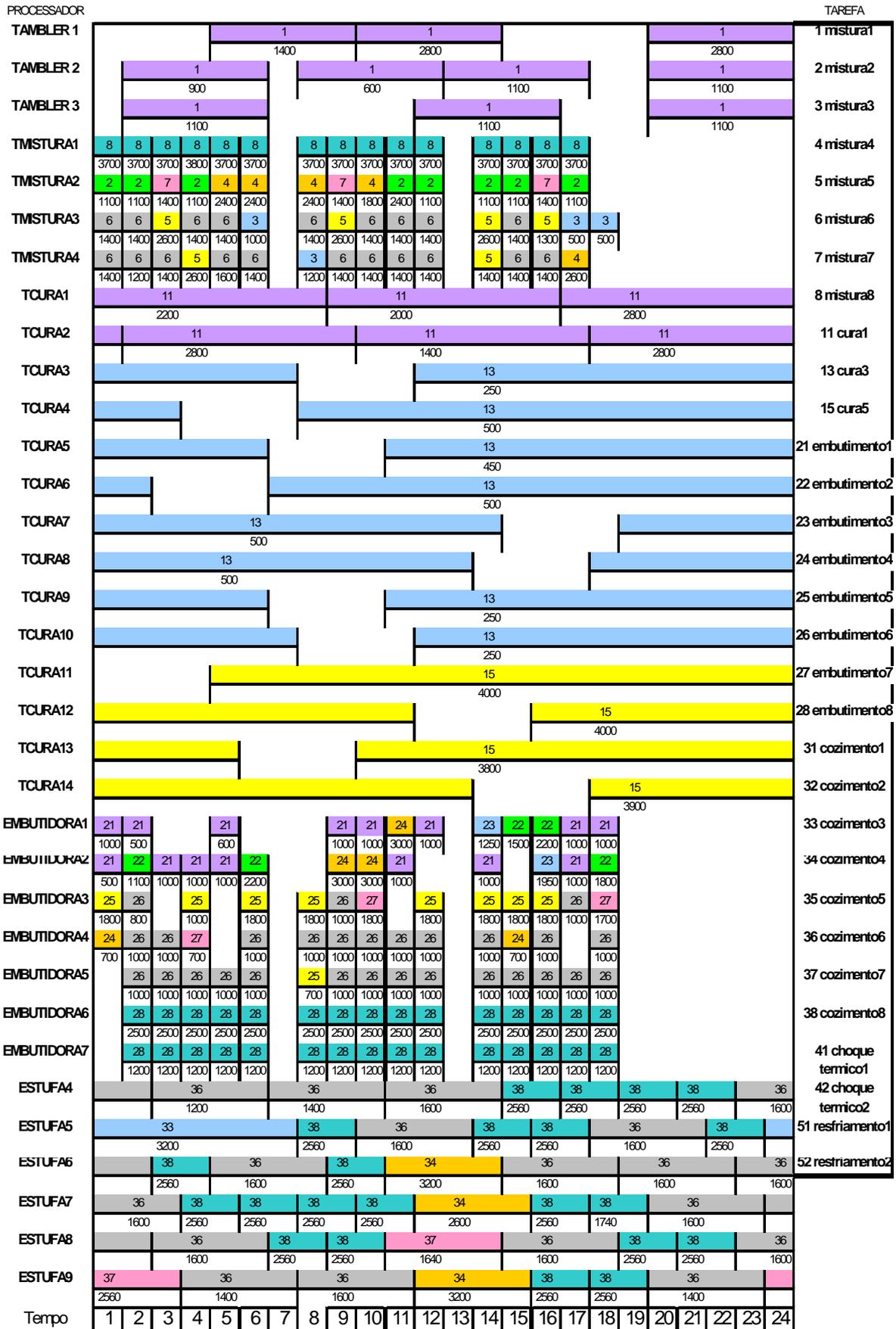


Figura A.5 Gráfico de Gantt para produção em campanha pesos iguais (a).

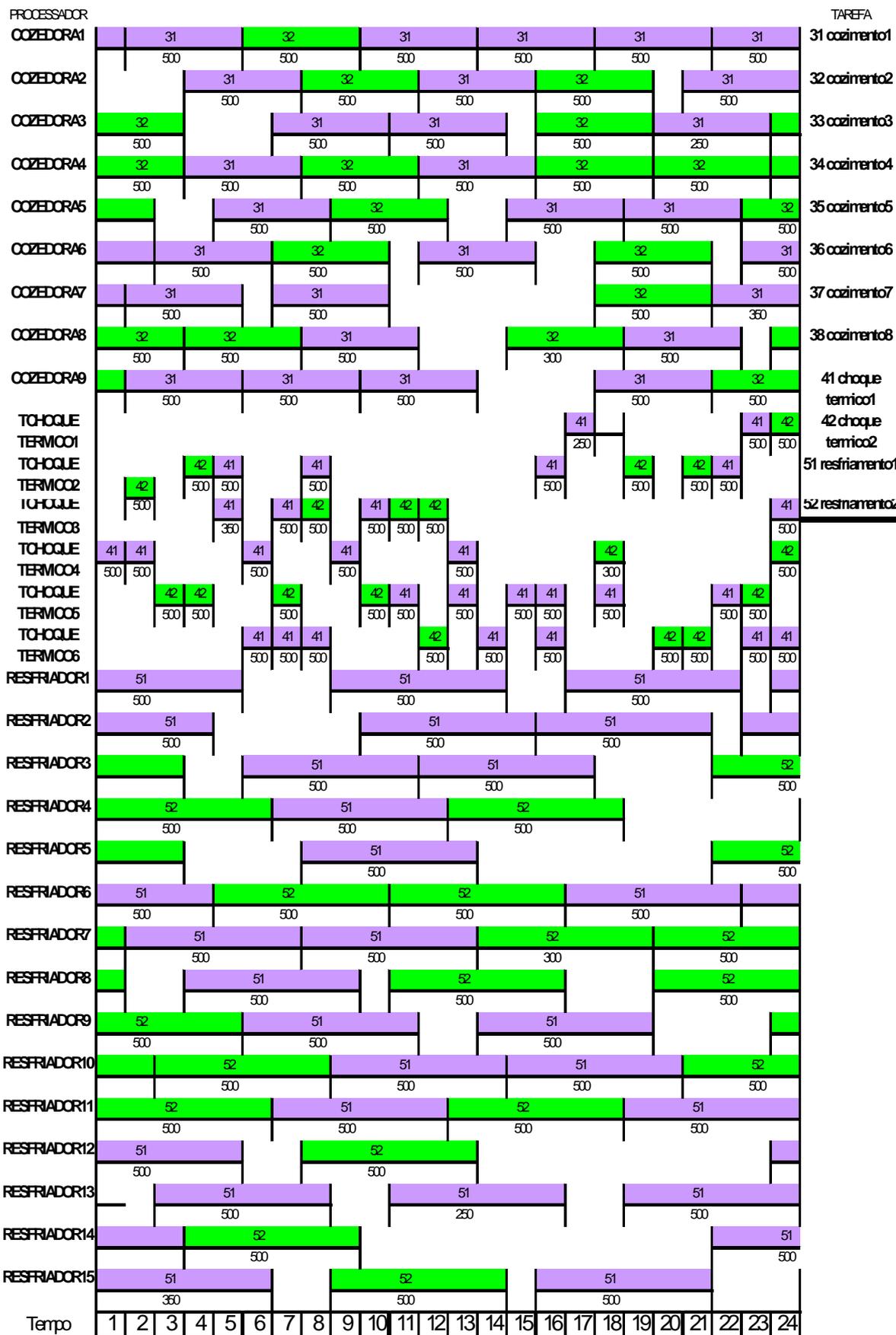


Figura A.6 Gráfico de Gantt para produção em campanha pesos iguais (b).

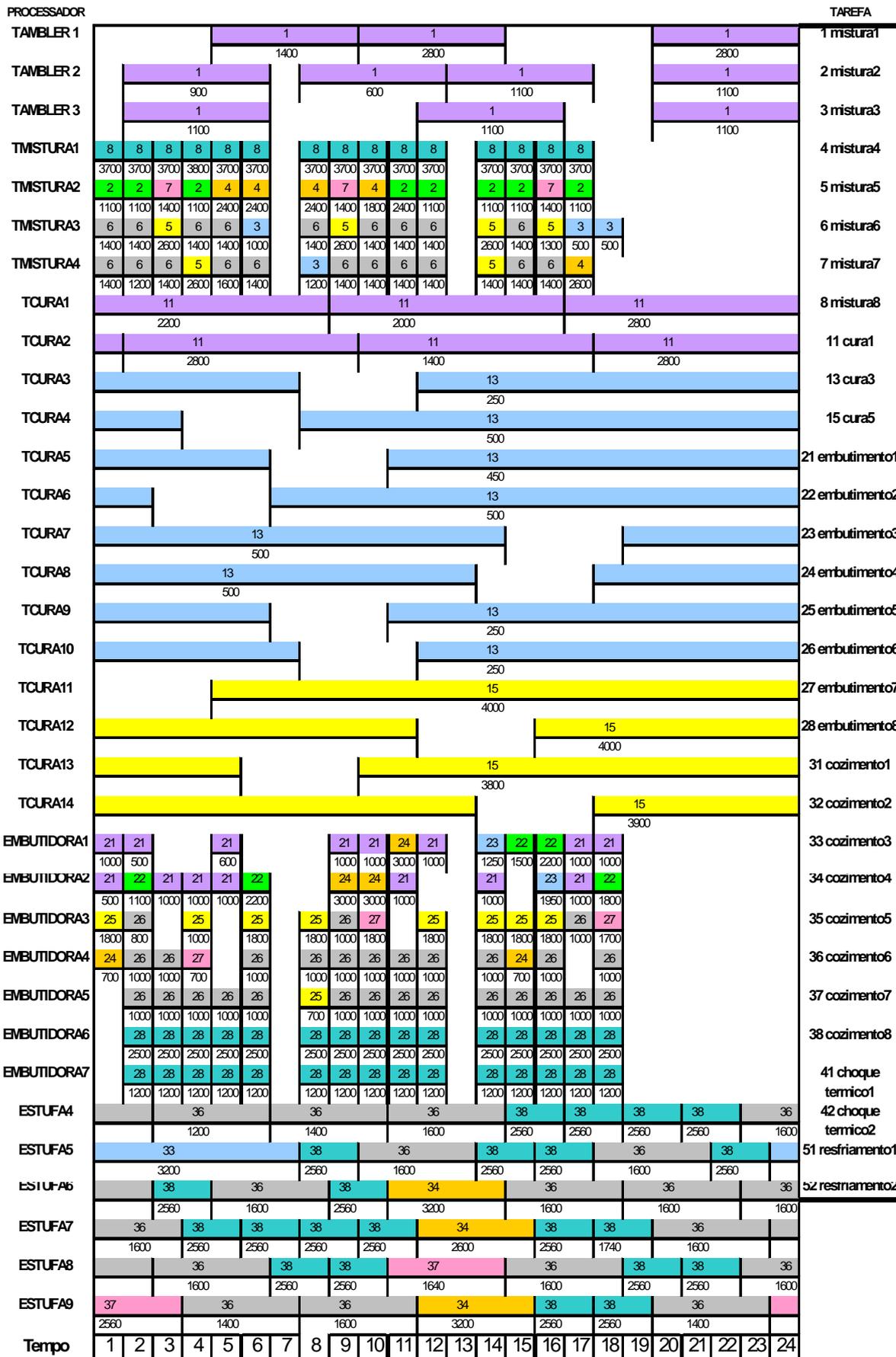


Figura A.7 Gráfico de Gantt para produção em campanha preços de mercado (a).

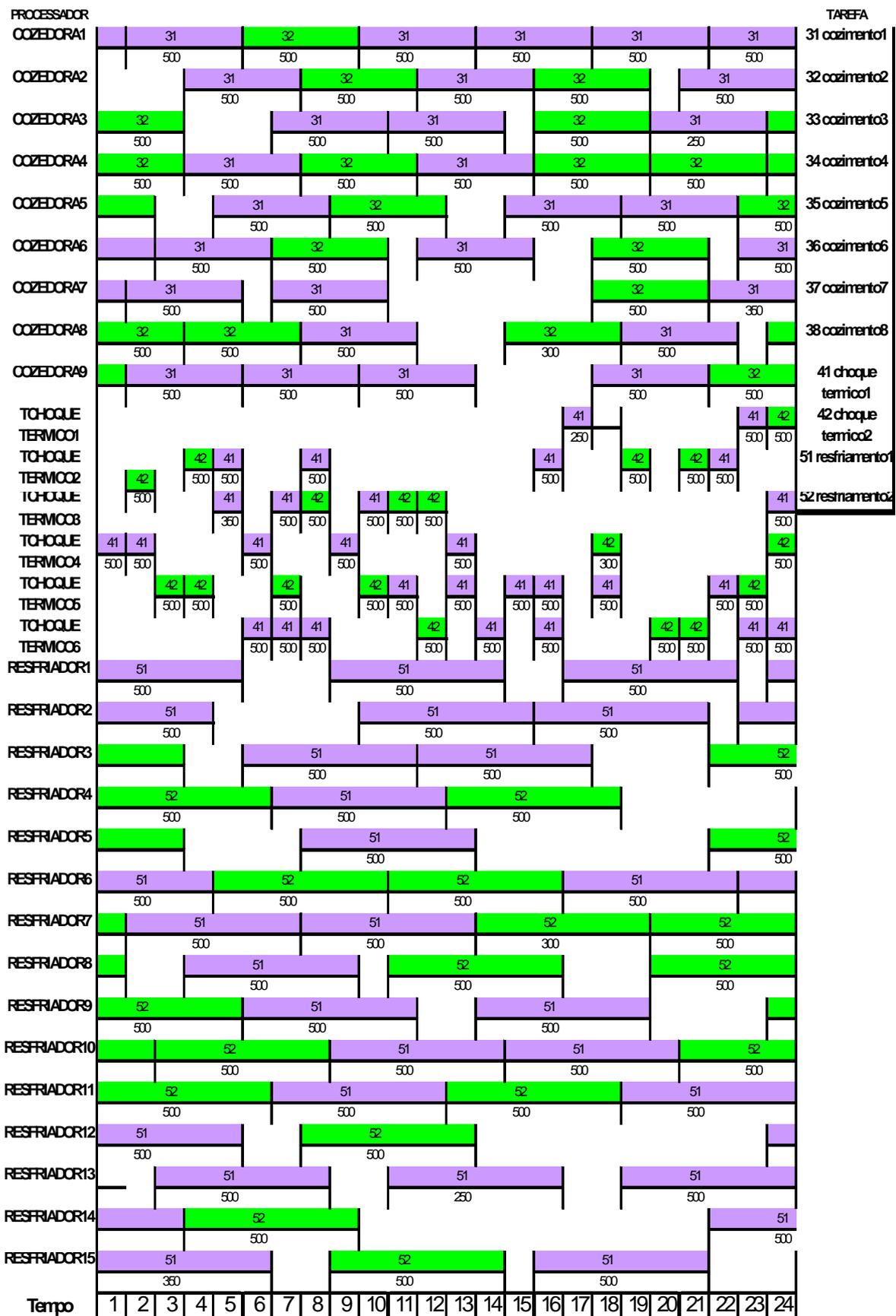


Figura A.8 Gráfico de Gantt para produção em campanha preços de mercado (b).

APÊNDICE B. LINGUAGEM DE MODELAGEM GAMS

Para mostrar a aplicação da linguagem de modelagem GAMS, utilizaremos um exemplo de programação de planta batelada multiproduto.

Este exemplo foi obtido de Edgar *et al.* (2002), com algumas modificações. Consideramos quatro produtos (tarefas) (p1, p2, p3, p4) que serão produzidos como uma série de bateladas numa planta multiproduto consistindo de três reatores batelada em série. Veja Figura 1 os tempos de processamento para cada reator batelada e cada produto são dados na Tabela 1. Assume-se que armazenagem de intermediários não está disponível entre as unidades de processamento. Se um produto termina seu processamento na unidade j e a unidade $j+1$ não está disponível, porque ela ainda esta processando um produto prévio, então o produto pronto deve ser mantido na unidade j , até a unidade $j+1$ tornar-se livre. Quando um produto termina o processamento na última unidade, ele é imediatamente enviado ao estoque de produto. Assuma que os tempos necessários para transferir produtos de uma unidade para outra são negligenciáveis comparado com o tempo de processamento.

O problema para este exemplo é determinar o tempo de seqüência para produção dos quatro produtos assim como minimizar o *makespan* (tempo total de processamento das tarefas). Assume-se também que todas as unidades estão inicialmente vazias no tempo zero e a manufatura de qualquer produto pode ser atrasada numa quantidade de tempo arbitraria para mantê-lo na unidade anterior.

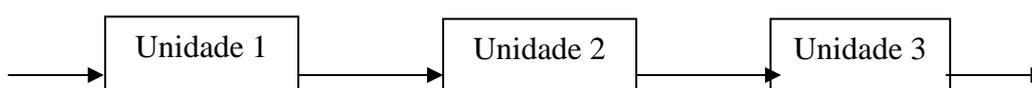


Figura B.1. Planta Multiproduto

Tabela B.1. Tempos de processamento (h)

unidade	Tarefas			
	T1	T2	T3	T4
1	3,5	4,0	3,5	12,0
2	4,5	5,5	7,5	3,5
3	9,0	3,5	6,0	8,0

A solução que se pretende obter deve ser uma seqüência de permutação, ou seja o ordenamento das tarefas em cada processador deve ser o mesmo. Para tanto considera-se a seqüência de tarefas e a posição de cada tarefa nesta seqüência (que será a mesma para cada processador). Seja X_{ik} uma variável binária definida como:

$X_{ik} = 1$ se a tarefa i está na posição k

$X_{ik} = 0$ caso contrário

O *makespan* é usado com critério de desempenho, deste modo, problema completo declarado é:

Minimizar:

$$C_{NM} \quad (B1)$$

Sujeito a:

$$\sum_i X_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (B2)$$

$$\sum_k X_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (B3)$$

$$C_{k,j} \geq C_{k-1,j} + \sum_{s=1}^N X_{s,k} TP_{s,j} \quad \forall j; k = 2, \dots, N \quad (B4)$$

$$C_{k,j} \geq C_{k,j-1} + \sum_{s=1}^N X_{s,k} TP_{s,j} \quad \forall k; j = 2, \dots, M \quad (B5)$$

$$C_{1,j} \geq C_{1,j-1} + \sum_{s=1}^N X_{s,1} TP_{s,j} \quad j = 2, \dots, M \quad (B6)$$

$$C_{1,1} \geq \sum_{s=1}^N X_{s,1} TP_{s,1} \quad (B7)$$

$$C_{k,j} \geq C_{k-1,j+1} \quad k = 1, \dots, N \quad j = 1, \dots, M - 1 \quad (B8)$$

$$C_{k,j} \geq 0 \quad \forall k, \forall j \quad (B9)$$

Sendo:

i : tarefas;

j : processadores ou estágios;

- k: posição na seqüência;
- N: número de tarefas;
- M: número de processadores;
- TP_{i,j}: tempo de processamento da tarefa i no processador j;
- C_{k,j}: tempo de fim de processamento no processador j da tarefa ocupando a posição k na seqüência.

B.1. ESTRUTURA GERAL DO MODELO GAMS

Os componentes básicos de um modelo GAMS são os seguintes:

Dados de Entrada

Definição e declaração de *sets*;

Definição e declaração de *scalars*, *parameters*, *tables* e equações de atribuição;

Determinação de *displays* de controle sobre as equações de atribuição.

Elementos do Modelo

Definição e declaração, designação do tipo, limitantes e valores iniciais de *variables*;

Definição e declaração de *equations* (função objetivo e restrições).

Soluções do Modelo

Comandos: *Models*; *Solve*; *Displays*.

O programa em GAMS que implementa o problema descrito pelas equações A1 a A9 está incluído na seqüência.

```
$TITLE EXEMPLO GAMS
```

```
$OFFUPPER
```

```
$OFFSYMREF
```

```
$OFFSYMLIST
```

```
SETS TAR Tarefas/T1*T4/
```

```
PROC Processadores/P1*P3/
```

SEQ Sequencia/1*4/;

TABLE TP (TAR,PROC) Tempos de processamento

	P1	P2	P3
T1	3.5	4.5	9.0
T2	4.0	5.5	3.5
T3	3.5	7.5	6.0
T4	12.0	3.5	8.0;

SCALAR N Numero de tarefas

M Numero de processadores

NN numero da sequencia;

N=CARD(TAR);

M=CARD(PROC);

NN=CARD(SEQ);

VARIABLES C (SEQ,PROC) Tempo de fim de PROC da tarefa na posicao SEQ

X(TAR,SEQ) Tarefa TAR na posicao SEQ

MSPAN Maskepan;

POSITIVE VARIABLES C;

BINARY VARIABLES X;

EQUATIONS CUSTO (SEQ) makespan

POSXI (SEQ) Uma so TAR na SEQ eqA2

POSXK (TAR) uma SEQ para cada TAR eqA3

CSEQJK (SEQ,PROC) Tempos de fim de processamento eqA4

CSEQKJ (SEQ,PROC) idem eqA5

CSEQJ1 (SEQ,PROC) idem para SEQ 1 do PROC eqA6

CSEQ11 (SEQ,PROC) idem para SEQ 1 do PROC 1 eqA7;

CUSTO (SEQ)..MSPAN=G=C(SEQ,'P3');

POSXI(SEQ)..SUM(TAR,X(TAR,SEQ))=E=1;

POSXK(TAR)..SUM(SEQ,X(TAR,SEQ))=E=1;

CSEQJK (SEQ,PROC)\$ (ORD(SEQ) GT 1)..C(SEQ,PROC)=G=C(SEQ-1,PROC)
+SUM(TAR,X(TAR,SEQ)*TP(TAR,PROC));

CSEQKJ (SEQ,PROC)\$ (ORD(PROC) GT 1)..C(SEQ,PROC)=G=C(SEQ,PROC-1)
+SUM(TAR,X(TAR,SEQ)*TP(TAR,PROC));

CSEQJ1 (SEQ,PROC)\$ (ORD(PROC) GT 1)..C('1',PROC)=G=C('1',PROC-1)
+SUM(TAR,X(TAR,'1')*TP(TAR,PROC));

CSEQ11 (SEQ,PROC)..C('1','P1')=E=SUM(TAR,X(TAR,'1')*TP(TAR,'P1'));

MODEL APENDICE/ALL/;

OPTION LIMROW=0;

OPTION LIMCOL=0;

OPTION SOLPRINT=OFF;

OPTION SYSOUT=OFF;

OPTION OPTCR=0.01;

OPTION ITERLIM=5000;

SOLVE APENDICE USING MIP MINIMIZING MSPAN;

DISPLAY X.L,C.L,MSPAN.L,X.M;

A seguir será apresentada a solução deste programa gerada pelo GAMS, porém como a saída do GAMS inclui a formulação apresentada anteriormente, apenas a parte relativa a solução será apresentada:

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	7	SINGLE EQUATIONS	49
BLOCKS OF VARIABLES	3	SINGLE VARIABLES	29
NON ZERO ELEMENTS	250	DISCRETE VARIABLES	16
GENERATION TIME	=	0.016 SECONDS	4 Mb WIN229-229 Dec 1, 2008
EXECUTION TIME	=	0.016 SECONDS	4 Mb WIN229-229 Dec 1, 2008

S O L V E S U M M A R Y

MODEL APENDICE	OBJECTIVE MSPAN
TYPE MIP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX	FROM LINE 56

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 34.5000

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.078	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	21	5000

ILOG CPLEX Dec 1, 2008 22.9.2 WIN 7311.8080 VIS x86/MS Windows
 Cplex 11.2.0, GAMS Link 34
 MIP status(101): integer optimal solution
 Fixed MIP status(1): optimal
 Proven optimal solution.

MIP Solution:	34.500000	(21 iterations, 0 nodes)
Final Solve:	34.500000	(0 iterations)

Best possible:	34.500000
Absolute gap:	0.000000
Relative gap:	0.000000

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED

Execution

---- 58 VARIABLE X.L Tarefa TAR na posicao SEQ

	1	2	3	4
T1	1.000			
T2				1.000
T3		1.000		
T4			1.000	

---- 58 VARIABLE C.L Tempo de fim de PROC da tarefa na posicao SEQ

	P1	P2	P3
1	3.500	8.000	17.000
2	7.000	15.500	23.000
3	19.000	22.500	31.000
4	23.000	28.500	34.500

---- 58 VARIABLE MSPAN.L = 34.500 Maskepan

---- 58 VARIABLE X.M Tarefa TAR na posicao SEQ

	1	2	3	4
T1	17.000	9.000	9.000	9.000
T2	13.000	3.500	3.500	3.500
T3	17.000	6.000	6.000	6.000
T4	23.500	8.000	8.000	8.000

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 3 Mb WIN229-229 Dec 1, 2008

USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC G871201/0000CA-ANY
Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com DC0000

**** FILE SUMMARY

Input D:\Meus Documentos\PAULO\Doutorado\gams\APENDICE.gms
Output d:\Meus Documentos\gammdir\projdir\APENDICE.lst

Antes de prosseguirmos com a apresentação individual dos elementos básicos utilizados no GAMS. È importante apresentar alguns pontos fundamentais da estrutura dos modelos GAMS

Um programa GAMS inicia-se com os seguintes enunciados, apresentados abaixo do modelo dado:

\$TITLE EXEMPLO GAMS
\$OFFUPPER

O enunciado \$TITLE impõe que o mesmo seja impresso no cabeçalho de cada página. O segundo enunciado \$OFFUPPER controla o aparecimento de maiúsculas e minúsculas na impressão de *echo*.

Um modelo GAMS é uma sequência de enunciados, em que cada entidade, ou elemento, só pode ser utilizada após sua existência ter sido declarada

O compilador GAMS não distingue entre letras maiúsculas e minúsculas.

A criação de entidades de um modelo GAMS é feita em dois estágios: o primeiro é a declaração da entidade e o segundo, a atribuição ou definição da entidade. Declarar consiste em dar um nome a uma entidade. Valorar ou definir consiste em fornecer um valor ou uma fórmula.

Todo nome de uma entidade tem de começar obrigatoriamente por uma letra, podendo vir seguida de outras letras ou dígitos.

Na sequência apresentaremos os elementos básicos de um programa GAMS, maiores detalhes podem ser encontrados em Brooke *et al.*, 1997.

B.2. OS ELEMENTOS BÁSICOS UTILIZADOS NO GAMS

B.2.1 Conjuntos

Os conjuntos (SETS) correspondem a índices na representação algébrica de um modelo GAMS. No modelo, dado, há três declarações de SETS, TAR, PROC e SEQ, que representam as tarefas *i*, os processadores *j* e a sequência *k*, respectivamente.

B.2.2 Dados

No GAMS existe três modos de se entrar com dados no modelo: SCALARS, PARAMETERS e TABLES são elementos de entrada de dados. Os valores escalares utilizam o comando SCALARS, os vetores utilizam o comando PARAMETERS e as matrizes de segunda ordem ou superiores utilizam o comando TABLES.

No modelo foram exibidos dois dos modos de se entrar com dados:

TABLE TP (TAR,PROC) Tempos de processamento

	P1	P2	P3
T1	3.5	4.5	9.0
T2	4.0	5.5	3.5
T3	3.5	7.5	6.0
T4	12.0	3.5	8.0;

SCALAR N Numero de tarefas
 M Numero de processadores
 NN numero da sequencia;
 N=CARD(TAR);
 M=CARD(PROC);
 NN=CARD(SEQ);

B.2.3 Variáveis

As variáveis de decisão de um modelo expresso em GAMS devem ser declaradas com o identificador VARIABLES. No modelo, aparece o seguinte enunciado do tipo VARIABLE:

VARIABLES

C (SEQ,PROC) Tempo de fim de PROC da tarefa na posicao SEQ

X(TAR,SEQ) Tarefa TAR na posicao SEQ

MSPAN Maskepan;

O primeiro enunciado declara uma variável para cada par de elementos de k e de j e o segundo enunciado declara uma variável para cada par de elementos de i e de k. A variável MSPAN é declarada sem nenhum domínio porque é uma quantidade escalar. Todo modelo de otimização em GAMS deve obrigatoriamente conter uma variável para servir de quantidade a se minimizada ou maximizada.

Uma vez declarada, a cada variável deve ser atribuído um tipo. Os tipos permitidos são os seguintes:

Nome do tipo da variável	Valores permitidos da variável
--------------------------	--------------------------------

FREE(<i>default</i>)	$-\infty$ até $+\infty$
------------------------	-------------------------

POSITIVE	0 até $+\infty$
----------	-----------------

NEGATIVE	$-\infty$ até 0
----------	-----------------

BINARY	0 ou 1
INTEGER	0, 1, 2, ..., +∞

A variável a ser otimizada deve ser um escalar e deve ser do tipo FREE. No modelo, MSPAN é mantida livre por *default*, mas a variável C(SEQ,PROC) é definida para assumir somente valores positivos e a variável X(TAR,SEQ) é definida para assumir valores binário (0 ou 1).

B.2.4 Equações

O poder da linguagem de modelagem GAMS se torna mais aparente na criação de equações e inequações existentes no modelo. Isso porque sempre que um grupo de equações ou inequações possui estrutura algébrica, todos os membros do grupo são criados simultaneamente, e não individualmente.

Equações devem ser declaradas em enunciados separado. O formato é análogo às outras declarações em GAMS: primeiro vem a palavra chave EQUATIONS, seguida do nome e texto. No modelo aparece a seguinte declaração de equações:

EQUATIONS

```
CUSTO (SEQ) makespan
POSXI (SEQ) Uma so TAR na SEQ eqA2
POSXK (TAR) uma SEQ para cada TAR eqA3
CSEQJK (SEQ,PROC) Tempos de fim de processamento eqA4
CSEQKJ (SEQ,PROC) idem eqA5
CSEQJ1 (SEQ,PROC) idem para SEQ 1 do PROC eqA6
CSEQ11 (SEQ,PROC) idem para SEQ 1 do PROC 1 eqA7;
```

Em GAMS, a palavra EQUATION possui significado mais abrangente, pois é usado tanto para equações propriamente ditas como também para inequações.

Definições de equações são o enunciado mais complexo que aparecem em GAMS em termos de variedade. Os componentes das definições de uma equação são dados pela seguinte ordem:

1. O nome da equação a ser definida.
2. O domínio.
3. Condições de restrições dos domínios.

4. O símbolo “..”.
5. A expressão do lado esquerdo da equação.
6. O operador relacional:
 - =L= menor ou igual a
 - =G= maior ou igual a
 - =E= igual a
7. A expressão do lado direito da equação.

O modelo contém sete destes enunciados:

```
CUSTO (SEQ)..MSPAN=G=C(SEQ,'P3');
POSXI(SEQ)..SUM(TAR,X(TAR,SEQ))=E=1;
POSXX(TAR)..SUM(SEQ,X(TAR,SEQ))=E=1;
```

```
CSEQJK (SEQ,PROC)$ (ORD(SEQ) GT 1)..C(SEQ,PROC)=G=C(SEQ-1,PROC)
+SUM(TAR,X(TAR,SEQ)*TP(TAR,PROC));
CSEQKJ (SEQ,PROC)$ (ORD(PROC) GT 1)..C(SEQ,PROC)=G=C(SEQ,PROC-1)
+SUM(TAR,X(TAR,SEQ)*TP(TAR,PROC));
CSEQJ1 (SEQ,PROC)$ (ORD(PROC) GT 1)..C('1',PROC)=G=C('1',PROC-1)
+SUM(TAR,X(TAR,'1')*TP(TAR,PROC));
CSEQ11 (SEQ,PROC)..C('1','P1')=E=SUM(TAR,X(TAR,'1')*TP(TAR,'P1'));
```

B.2.5 Função Objetivo

GAMS não possui nenhuma entidade explicitamente denominada de “função objetivo.” Para especificar uma função a ser otimizada, basta criar uma variável, a qual é livre (sem restrição de sinal) a valores escalares (sem domínio) e que aparece na definição de uma equação, igualando-a à sua função objetivo.

B.2.6 Os enunciados do tipo MODEL e SOLVE

Em GAMS a palavra MODEL significa simplesmente uma coleção de equações. Como todas as outras entidades GAMS, ela as nomeia em uma declaração. O formato da declaração é a palavra chave MODEL seguida do nome do modelo, seguida de uma lista de equações entre barras. Se todas equações definidas devem ser incluídas, podemos entrar com a expressão /ALL/ no lugar da referida lista. No exemplo do modelo existe apenas um enunciado do tipo MODEL:

MODEL APENDICE/ALL/;

Uma vez declarado o modelo, e suas equações assinaladas, podemos agora chamar o *solver*. Isso é feito mediante um enunciado SOLVE, que, em nosso exemplo está escrito da seguinte maneira:

SOLVE APENDICE USING MIP MINIMIZING MSPAN;

O formato do enunciado SOLVE é o seguinte:

1. A palavra chave SOLVE.
2. O nome do modelo que está sendo resolvido.
3. A palavra chave USING.
4. Um procedimento de resolução tal como
 - LP para programação linear;
 - NLP para programação não-linear;
 - MIP para programação inteira mista;
 - RMIP para programação inteira mista relaxada.
5. A palavra chave MINIMIZING ou MAXIMIZING
6. O nome da variável a ser otimizada.

B.2.7. Os enunciados do tipo OPTION

Estas opções controlam a saída de depuração produzida em todas as fases do enunciado SOLVE, o modelo do exemplo apresenta seis destes enunciados:

```
OPTION LIMROW=0;
OPTION LIMCOL=0;
OPTION SOLPRINT=OFF;
OPTION SYSOUT=OFF;
OPTION OPTCR=0.01;
OPTION ITERLIM=5000;
```

Agora será descrito o significado de cada um destes enunciados:

```
OPTION LIMROW=0;
```

Controla o número de linhas que estão listadas na EQUATION LISTING para cada equação. O valor *default* de três é usado caso o usuário não force alguma mudança. Especifique zero para suprimir a EQUATION LISTING completamente.

```
OPTION LIMCOL=0;
```

Isso significa que o detalhe para zero colunas de cada variável será mostrado na COLUMN LISTING. Novamente o valor *default* é três.

```
OPTION SOLPRINT=OFF;
```

Usando esta especificação, fica suprimida a lista da solução que se segue ao *solve*. O *default*, para listar a solução, será restaurado pelo comando “OPTION SOLPRINT=ON;”.

```
OPTION SYSOUT=OFF;
```

Faz com que o arquivo de status do *solver* não seja listado como parte da saída. O comportamento *default* é listar o arquivo.

```
OPTION OPTCR=0.01;
```

Essa opção é usada apenas com problemas contendo variáveis discretas, o modelo GAMS tipo MIP. Problemas gerais inteiros mistos são em geral extremamente difíceis de serem resolvidos e, para provar que a solução encontrada é a melhor possível, pode dispensar uma quantidade enorme de recursos. Essa opção fixa uma tolerância relativa de término, o que significa que GAMS para e relata a primeira solução encontrada, cujo valor objetivo está dentro dos limites de tolerância da melhor solução possível. O valor *default* é 0.1, o que significa, por exemplo, que se o problema é de minimização e o *solver* determina que o menor valor de objetivo possível é 100, então a primeira solução encontrada com o valor de objetivo menor que 110 fará com que o *solver* pare e o GAMS recupere a solução.

```
OPTION ITERLIM=5000;
```

Essa opção limita o número de interações feitas por um determinado *solver*. Isto significa que, se o problema não foi resolvido até o fim quando se tenha atingido o número de iterações, no exemplo o número de iterações permitidas são 5000, o *solver* para e a solução intermediária é comunicada ao usuário, juntamente com a razão da parada, que no caso é “ITERATION INTERRUPT”. O limite *default* é normalmente 1000.

B.2.8 Os enunciados tipo DISPLAY

Os enunciados tipo DISPLAY é um elemento opcional que determina que resultados serão exibidos no formulário de saída do GAMS. Variáveis com terminação .LO se referem a limites inferiores, variáveis com terminação .UP são usadas para limites superiores, os valores primais são identificados pela terminação .L e os valores duais são identificados pela terminação .M, nosso exemplo contém o seguinte enunciado:

```
DISPLAY X.L,C.L,MSPAN.L,X.M;
```

Os campos .LO e .UP são inteiramente controlados pelo usuário, ao passo que os campos .L e .M são inicializados pelo usuário mas são controlados pelo *solver*.

B.3. SAÍDA DO PROGRAMA GAMS

Os relatórios de saída do GAMS fornecem informações sobre a eventual existência de erros de compilação e erros de execução, informações sobre as equações declaradas (apresentadas de forma detalhada para que o usuário possa conferir seu conteúdo), relatórios de status e estatísticas do modelo (determinando o número de variáveis e restrições existentes) e apresenta os resultados encontrados

A saída produzida durante a compilação do programa contém duas ou três partes: a impressão de *echo* de seu programa, uma explanação dos erros detectados, e os mapas.

A primeira saída de GAMS é rodar um *echo* de seu arquivo de entrada, trata-se apenas da listagem de seu arquivo de entrada (omitido no nosso exemplo).

B.3.1 Relatório de Erros

Os erros são agrupados em três fases da modelagem GAMS: compilação, execução e geração do modelo. Todas as mensagens de erro possuem duas características comuns. Em primeiro lugar, elas vêm marcadas por quatro sinais asteriscos “****” no começo de uma linha da listagem de saída. Em segundo lugar, todas são fatais: em GAMS não existem mensagens de alerta. O processamento para na primeira oportunidade mais conveniente e os arquivos de trabalho não serão salvados. Um modelo nunca será resolvido depois que um erro tenha sido detectado. A única coisa a fazer é corrigir o erro e rodar novamente.

B.3.2 Mapas de Referência

A seção seguinte da saída, que é a última que aparece se erros foram detectados, é um par de mapas de referência, que contêm sumários e análises dos arquivos de entrada para fins de depuração e documentação. Os mapas são extremamente úteis se você está examinando o modelo de outra pessoa, ou se você está tentando efetuar mudanças em seu próprio modelo depois de passar um tempo longe dele. Todos os mapas podem ser suprimidos, (como foram no exemplo) mediante uma linha contendo \$OFFSYMREF e em outra linha \$OFFSYMLIST, que deverá ser colocado no início do programa. O primeiro mapa de referência é o mapa de referência cruzada. Trata-se de uma lista em ordem alfabética de referências cruzadas de todas as entidades (conjuntos, parâmetros, variáveis e equações) do modelo. A lista mostra o tipo de cada entidade e uma referência codificada para cada instância da entidade na saída. O segundo mapa de referência é a lista de entidades do modelo agrupadas por tipo e listadas como os correspondentes textos de documentação.

B.3.3 Estatística do Modelo

Esta seção de saída o GAMS é um grupo de estatística que dizem respeito ao tamanho do modelo, para o caso do exemplo pode ser visto como segue:

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	7	SINGLE EQUATIONS	49
BLOCKS OF VARIABLES	3	SINGLE VARIABLES	29
NON ZERO ELEMENTS	250	DISCRETE VARIABLES	16

GENERATION TIME = 0.016 SECONDS 4 Mb WIN229-229 Dec 1, 2008

EXECUTION TIME = 0.016 SECONDS 4 Mb WIN229-229 Dec 1, 2008

Seu uso mais óbvio é encontrar rapidamente quão grande e quão não linear é o modelo. As contagens de BLOCK se referem às equações e variáveis de GAMS, as contagens SINGLE a linhas e colunas individuais do problema gerado. Os tempos que seguem as estatísticas também são úteis. O GENERATION TIME é o tempo gasto para preparar o modelo para solução, o EXECUTION TIME é todo o tempo usado uma vez terminada a verificação sintática, incluindo o tempo gasto para gerar o modelo.

B.3.4 Sumário do *Solve*

Quando o modelo é resolvido, esta etapa da saída contém detalhes a respeito da solução do sistema, é dividido em duas partes, a primeira sendo comum a todos os *solvers*, e a segunda sendo específico para um *solver* em particular. A parte comum do sumário do *solve* do exemplo é o seguinte:

S O L V E S U M M A R Y

MODEL APENDICE	OBJECTIVE MSPAN
TYPE MIP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX	FROM LINE 56

```
**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 34.5000
```

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.078	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	21	5000

Os relatórios de status são precedidos pela mesma sequência de asteriscos “****” que aparece nas mensagens de erro. O estado desejado do *solver* é 1 NORMAL

COMPLETION, que significa que o *solver* terminou de forma normal, mas existem outras possibilidades. Existem cerca de onze *status* possíveis de modelos, para programação linear o estado desejado do modelo é 1 OPTIMAL. Em programação não linear é 2 LOCALLY OPTIMAL, o máximo que o programa pode garantir em programação não linear é um valor ótimo local. Em programação inteira, o estado final desejado é 8 INTEGER SOLUTION, que significa que uma solução inteira factível foi encontrada.

A segunda parte do sumário do *solver* é particular ao programa do *solver* que foi usado. Esta seção normalmente começa com uma mensagem identificando o *solver*, no exemplo dado foi usado o CPLEX..

No final do relatório da solução do *solver* aparece um relatório muito importante, o relatório sumário, que fornece um apanhado do número total de linhas e colunas não otimizadas, não factíveis e ilimitadas. Por exemplo, no relatório sumário de nosso exemplo, todas as saídas de zeros correspondentes são mostradas:

```
**** REPORT SUMMARY :    0  NONOPT
                        0  INFEASIBLE
                        0  UNBOUNDED
```

Depois que o relatório do *solver* é emitido, o controle do programa é devolvido par GAMS. Todos os valores de nível e marginais são inseridos no banco de dados do GAMS. Esses valores podem ser transformados e mostrados em qualquer relatório que se deseje. O usuário lista as quantidades a serem mostradas, e GAMS automaticamente formata e rotula a ordem correspondente. Por exemplo, o enunciado de entrada do nosso exemplo

```
DISPLAY X.L,C.L,MSPAN.L,X.M;
```

Resulta na seguinte saída:

```
---- 58 VARIABLE X.L Tarefa TAR na posicao SEQ
```

	1	2	3	4
T1	1.000			
T2				1.000
T3		1.000		
T4			1.000	

---- 58 VARIABLE C.L Tempo de fim de PROC da tarefa na posicao SEQ

	P1	P2	P3
1	3.500	8.000	17.000
2	7.000	15.500	23.000
3	19.000	22.500	31.000
4	23.000	28.500	34.500

---- 58 VARIABLE MSPAN.L = 34.500 Maskepan

---- 58 VARIABLE X.M Tarefa TAR na posicao SEQ

	1	2	3	4
T1	17.000	9.000	9.000	9.000
T2	13.000	3.500	3.500	3.500
T3	17.000	6.000	6.000	6.000
T4	23.500	8.000	8.000	8.000

A última parte do arquivo de saída dá os nomes dos arquivos de disco, de entrada e saída.

**** FILE SUMMARY

Input D:\Meus Documentos\PAULO\Doutorado\gams\APENDICE.gms
 Output d:\Meus Documentos\gamsdir\projdir\APENDICE.lst

APÊNDICE C. O GRÁFICO DE GANTT

O Gráfico de Gantt fornece um meio de compreensão rápido e fácil para descrever as atividades do projeto e este fato tem estimulado seu uso em pacotes de gerenciamento de projetos baseados em microcomputadores (Wilson, 2003).

Originalmente Gráficos de Gantt eram preparados laboriosamente à mão, no entanto com o advento dos computadores e software de gerenciamento de projetos, Gráficos de Gantt podem ser criados, atualizados e impressos facilmente.

Atualmente, os Gráficos de Gantt são mais comumente utilizados para projetos de programação da produção. Para isso, é útil por ser capaz de mostrar informações adicionais sobre as várias tarefas ou fases do projeto, por exemplo como as tarefas se relacionam entre si, o quanto cada tarefa tem progredido, que recursos estão sendo usados para cada tarefa e assim por diante

O Gráfico de Gantt é facilmente programado e pode ser facilmente apresentada em uma variedade de formatos úteis para gestores.

A popularidade do Gráfico Gantt no gerenciamento de projetos tem aparentemente estimulado seu uso em outras áreas, particularmente onde exibir informações sobre horários é importante. Por este motivo aplica-se Gráfico de Gantt para programação de produção em batelada. Os gráficos também podem fornecer ferramentas muito eficientes que permitem que os usuários criem e avaliem programas de produção manualmente, com boas soluções para problemas complexos.

Gráficos de Gantt são úteis para exibir programações quer sejam produzidas manualmente ou através de algum algoritmo heurístico ou de otimização. Nestes casos os benefícios resultam de sua eficácia em apresentar uma grande quantidade de informações (qual tarefa executada, quando, em que máquinas, por quanto tempo, e onde a ociosidade/inatividade ou gargalos ocorrem). O método é altamente adaptável e pode facilmente se concentrar em questões que preocupam os gestores. Os Gráficos de Gantt não são técnicas de solução mas eles facilitam a comunicação entre o analista e o usuário, e fornece um poderoso método para implementação de abordagens interativas de programação da produção.

Um Gráfico de Gantt, comumente usado em gerenciamento de projetos, é uma das maneiras mais úteis de mostrar atividades (tarefas ou eventos) contra o tempo. Em geral, o eixo horizontal em um Gráfico de Gantt representa um período de tempo, no eixo vertical está uma lista de atividades. Cada atividade é representada por uma barra, a posição e o

comprimento da barra mostra o tempo de início, duração e tempo de término da atividade.

Isto permite ver em rapidamente:

- (i) Quais são as diversas atividades;
- (ii) Quando cada atividade começa e termina;
- (iii) Quanto tempo cada atividade esta programada para durar;
- (iv) Onde atividades sobrepõem com outras atividades e por quanto tempo;
- (v) Os tempos de começo e o final de todo o projeto ou produção.

Resumindo, um Gráfico de Gantt mostra o que tem que ser feito (as atividades) e quando (o cronograma).

O Gráfico de Gantt mostrado na Figura C.1, representa a resposta da otimização obtida no exemplo do Apêndice B. O gráfico mostra a sequência ótima de operação que é uma sequência de permutação e quando e onde as tarefas serão executadas e o *makespan* de 34,5 horas. Cada tarefa é representada por uma barra, o ponto de início da barra mostra o tempo no qual a tarefa começa e o ponto final mostra o tempo no qual a tarefa termina e o comprimento da barra mostra o tempo de duração da tarefa, por exemplo a tarefa T3 na unidade 2, tem início no tempo de 5 horas e termina no tempo de 15,5 horas com uma duração total de 10,5 horas

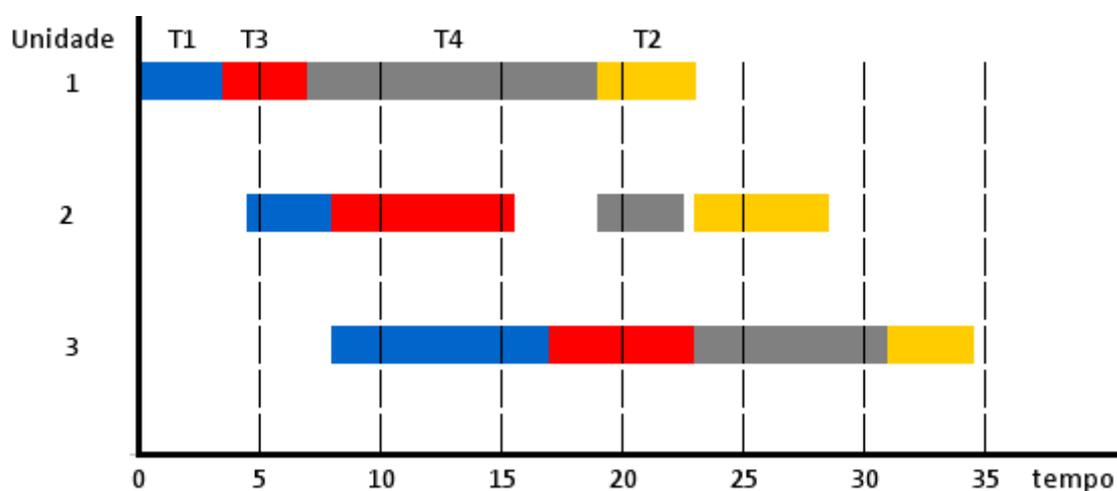


Figura C.1 - Gráfico de Gantt para o exemplo do Apêndice B

Os Gráficos de Gantt, apesar de serem usados a mais de um século, ainda são ferramentas populares de gestão. Sua aplicação para problemas de planejamento e programação da produção os Gráficos de Gantt fornecem uma interface que permite rapidamente ao usuário limitar problemas e melhor entender e aceitar soluções.