

ANTONIO EMYGDIO DE BARROS

**MODELAGEM DE PROBLEMAS DE PRODUÇÃO EM
INDÚSTRIA TÊXTIL: UMA ABORDAGEM POR DINÂMICA DE
SISTEMAS**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Diploma de Engenheiro de Produção

**São Paulo
2011**

ANTONIO EMYGDIO DE BARROS

**MODELAGEM DE PROBLEMAS DE PRODUÇÃO EM
INDÚSTRIA TÊXTIL: UMA ABORDAGEM POR DINÂMICA DE
SISTEMAS**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Diploma de Engenheiro de Produção

Orientador:
Prof. Luis Fernando Pinto de Abreu

**São Paulo
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA

Barros, Antonio Emygdio de
Modelagem de problemas de produção em indústria têxtil:
uma abordagem por dinâmica de sistemas / A.E. de Barros. --
São Paulo, 2011.
113 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.**

**1. Dinâmica de sistemas 2. Simulação 3. Modelagem 4. Pro-
dução I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-
tamento de Engenharia de Produção II. t.**

DEDICATÓRIA

Ao Politécnico Reynaldo Emygdio de Barros

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luis Fernando Pinto de Abreu, pela orientação e pelas agradáveis conversas que serviram de estímulo para o desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores do PRO que por cinco anos auxiliaram em meu desenvolvimento intelectual.

Aos meus amigos Paulo Macedo, Alberto Duarte, Guilherme Favaro, Leonardo Baracat e Paulo Egydio, por tornarem esse difícil período o mais agradável e divertido possível.

A todos os companheiros da Poli que me acompanharam durante essa trajetória.

RESUMO

Com a abertura econômica do setor têxtil brasileiro nos anos 80, a indústria produtora de linhas têxteis, a Linhas Bonfio S.A., adotou uma agressiva política comercial visando estreitar laços com seus clientes e desenvolver barreiras competitivas.

Como resultado, sua estrutura de produção passa a operar com níveis mais baixos de desempenho e com elevada complexidade de gestão, fato comprovado pelo elevado volume de estoques na fábrica e pela co-existência de duas estratégias de produção dividindo os mesmos recursos.

Para auxiliar os gestores de produção da empresa a compreenderem os problemas de seu sistema de produção e desenvolverem soluções para elevar o desempenho do sistema foi traçado o objetivo de construção de uma estrutura conceitual capaz de descrever a gênese dos problemas de desempenho apresentados. Para isso foi desenvolvido um modelo de Dinâmica de Sistemas, capaz de reproduzir os efeitos das políticas comerciais da companhia sobre seu sistema de produção.

Com o modelo pode-se concluir que as políticas comerciais sobrecarregam o sistema de produção, que migra para um estado de baixo desempenho. O modelo permitiu também o ensaio de políticas alternativas para a expansão de capacidade do sistema, visando o alívio da sobrecarga.

Ao final os gestores de produção da companhia ganham uma plataforma conceitual que os permite testar novas políticas e formular propostas de expansão de capacidade, de modo a projetar um sistema de produção que atenda as exigências estratégicas da companhia mantendo um desempenho satisfatório.

ABSTRACT

With the end of the economical protectionism on the Brazilian Textile Industry in the 80's, the thread yarns manufacturer, Linhas Bonfio S.A., adopted an aggressive commercial policy in order to foster competitive edges.

As a consequence the company's production structure started to operate in low levels of performance and with a high management complexity, what could be observer by high inventory levels and by the coexistence of two manufacturing strategies sharing the same resources.

In order to help the company's production managers to better understand the problems they were dealing with and to support them to develop solutions, the objective of this thesis was fixed to build a conceptual structure capable to represent the evolution of the company's problems. The objective was reached through a Systems Dynamics model, capable to reproduce the effects os the company's commercial policies over its production system's structure.

With the model's help it was possible to conclude that the commercial policies overloaded the production system's capacity, depleting its performance. It was also possible to test alternative policies to expand the system's capacity in order to balance the overload.

At the end it was possible to provide the managers a conceptual platform capable to test new policies to expand the system's capacity, helping them to design a new system, capable to support the company's competitive needs keeping a good level of performance.

LISTA DE ABREVIATURAS

DS	Dinâmica de Sistemas
WIP	Work In Process
MTO	Make to Order
MTS	Make to Stock
SKU	Stock-keeping Unit

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma Funcional da Empresa	28
Figura 2: Pressões competitivas na indústria de linhas - Adaptado pelo autor	32
Figura 3: Representação Gráfica das Estruturas Causais - Elaborado pelo autor.....	41
Figura 4: Representação Gráfica do Ciclo Recursivo Positivo - Elaborado pelo autor	42
Figura 5: Representação Gráfica do Ciclo Recursivo Negativo - Elaborado pelo autor	
.....	42
Figura 6: Representação Gráfica das Variáveis de Estoque e Fluxo - Elaborado pelo autor.....	43
Figura 7: Representação Gráfica das Variáveis de Estoque e Constantes - Elaborado pelo autor	44
Figura 8: Estrutura Matemática - Elaborado pelo autor	44
Figura 9: Representação Gráfica dos Atrasos - Elaborado pelo Autor.....	45
Figura 10: Representação do Reservatório - Sterman 2000	45
Figura 11: Representação dos Reservatórios em Série - Sterman 2000	46
Figura 12: Diagrama de Subsistemas Aplicado a Sistema Urbano – Elaborado pelo autor.....	50
Figura 13: Diagrama de Ciclo Causal Aplicado ao Subsistema Econômico Urbano...51	
Figura 15: Interface Gráfica do Vensim PLE	55
Figura 16: Máquinas de Conicalagem da Bonfio - Elaborado pelo Autor	57
Figura 17: Diagrama de Estruturas de Decisões	61
Figura 18: Diagrama de Fluxo e Estoque da Estrutura de Produção MTS.....	66
Figura 19: Estrura de produção do Subsistema de produção MTS	67
Figura 20: Diagrama de Estoque e Fluxo da Estrutura de Controle de Produção MTS	
.....	68
Figura 21: Diagrama de Ciclo Causal - Decisões de Produção MTS	71
Figura 22: Ciclo Recursivo de Reposição de Estoques	72
Figura 23: Ciclo Recursivo de Correção de WIP MTS	73
Figura 24: Diagrama de Estoque e Fluxo da Estrutura de Distribuição de Produtos ...74	
Figura 25: Estrutura de Controle da Carteira de Pedidos MTS	75
Figura 26: Ciclo Recursivo de Baixa de Backlog MTS	76
Figura 27: Ciclo Recursivo de Distribuição de Produtos	77

Figura 28: Diagrama de Estoque e Fluxo do Subsistema de Previsão	78
Figura 29: Estrutura de Produção MTO	80
Figura 30: Estrutura de Controle de Backlog de Demanda MTO	82
Figura 31: Diagrama de Ciclo Causal do Subsistema de Produção MTO.....	83
Figura 32: Ciclo Recursivo de Ajuste de WIP MTO.....	83
Figura 33: Ciclo Recursivo de Atendimento em Pedidos MTO em Aberto.....	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Carteira de Pedidos Média da Bonfio.....	34
Gráfico 2: Efeito dos Atrasos Sobre o Fluxo de Saída	47
Gráfico 3: Efeito dos Atrasos Sobre o Estoque	47
Gráfico 4: Variáveis de Estoque do Sistema MTS em Equilíbrio	89
Gráfico 5: Variáveis de Estoque do Sistema MTO em Equilíbrio	89
Gráfico 6: Variáveis de Estoque MTS em Explosão de Demanda	90
Gráfico 7: Capacidade Disponível para MTS.....	91
Gráfico 8: Variáveis de Estoque MTO em Explosão de Demanda	92
Gráfico 9: Comportamento do Capacidade Efetiva em Colapso.....	92
Gráfico 10: Variáveis de Nível MTS em Colapso de Capacidade	93
Gráfico 11: Variáveis de Estoque MTO em Colapso de Capacidade.....	93
Gráfico 12: Pulso de Demanda MTS	94
Gráfico 13: Variáveis de Estoque MTS em Pulso de Demanda	94
Gráfico 14: Variáveis de Estoque MTO em Pulso de Demanda MTS	95
Gráfico 15: Variáveis de Estoque MTO em Pulso de demanda MTO	95
Gráfico 16: Variáveis de Estoque MTS no Caso Base	96
Gráfico 17: Perfil da Demanda MTS no Caso Base	97
Gráfico 18: Variáveis de Estoque MTO no Caso Base	97
Gráfico 19: Perfil da Demanda MTO no Caso Base	98
Gráfico 20: Variáveis de Estoque MTS em Aumento de Vendas MTO	99
Gráfico 21: Reação do Subsistema MTS ao Aumento de Vendas MTO.....	100
Gráfico 22: Variáveis de Estado MTO em Aumento de Vendas MTO.....	100
Gráfico 23: Consequência do Aumento de Vendas MTO ao Atraso Médio MTO	101
Gráfico 24:Perfil da Demanda Sazonal MTS	102
Gráfico 25: Variáveis de Estoque MTS em Demanda Sazonal MTS.....	102
Gráfico 26: Consequências da Demanda Sazonal MTS	103
Gráfico 27: Variáveis de Estado MTS com Amortecimento da Sazonalidade por Estoques.....	104
Gráfico 28: Consequência do Amortecimento por Estoques.....	105
Gráfico 29: Variáveis de Estoque MTS com Amortecimento de Sazonalidade por Capacidade.....	106
Gráfico 30: Consequências do Amortecimento por Capacidade	107

Gráfico 31: Variáveis de Estoque MTS com Extensão dos Prazos de Entrega.....	108
Gráfico 32: Variáveis de Estado MTO com Extensão de Prazos de Entrega	108
Gráfico 33: Efeitos da Eficiência Operacional no Subsistema MTS.....	109
Gráfico 34: Efeitos da Eficiência Operacional Sobre o Subsistema MTO.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Família de Produtos da Bonfio	30
Tabela 2: Resultado do Questionário Aplicado aos Colaboradores da Conicalagem...	35
Tabela 3: Resumo das Variáveis do Subsistema de Produção MTS	73
Tabela 4: Resumo das Variáveis do Subsistema de Distribuição MTS.....	77
Tabela 5: Resumo das Variáveis do Subsistema de Previsão.....	79
Tabela 6: Resumo das Variáveis Exógenas e Constantes.....	87

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação de Balanço da Variável de Estoque.....	44
Equação 2: Variável de Estoque MTS WIP	67
Equação 3: MTS Taxa de Processamento	67
Equação 4: Estoque Desejado.....	69
Equação 5: Cobertura de Estoque Desejada	69
Equação 6: Ajuste de Estoque	69
Equação 7: MTS Produção Desejada	69
Equação 8: MTS WIP Desejado	70
Equação 9: Ajuste de WIP	70
Equação 10: MTS OP's Desejadas	70
Equação 11: MTS OP's Disparadas	70
Equação 12: Variável de Estoque MTS EPA	74
Equação 13: MTS Taxa de Expedição.....	74
Equação 14: Taxa de Expedição Desejada	74
Equação 15: Taxa de Máxima de Expedição.....	75
Equação 16: Variável de Estoque MTS Backlog de Demanda	76
Equação 17: Variável de Fluxo MTS Chegada de Pedidos.....	76
Equação 18: Variável de Fluxo MTS Entrega de Pedidos	76
Equação 19: Variável de Estoque Expectativa de Demanda	78
Equação 20: Variação na Expectativa de Demanda	78
Equação 21: Variável de Estoque MTO WIP	80
Equação 22: MTO Taxa de Processamento.....	80
Equação 23: Variável de Fluxo MTO Produção Desejada	81
Equação 24: MTS WIP Desejado	81
Equação 25: MTO Ajuste de WIP	81
Equação 26: MTO OP's Desejadas	81
Equação 27: Variável de Fluxo MTO OP's Disparadas	81
Equação 28: Variável de Estoque MTO Backlog de Demanda.....	82
Equação 29: Variável de Fluxo MTO Chegada de Pedidos	82
Equação 30: Variável de Fluxo MTO Entrega de Pedidos.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	25
1.2	VÍNCULO DO ALUNO COM A EMPRESA	26
1.3	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	27
1.3.1	<i>História</i>	27
1.3.2	<i>Estrutura industrial e Organizacional</i>	28
1.3.3	<i>Produtos</i>	29
1.3.4	<i>Processos</i>	30
1.3.5	<i>Clientes</i>	31
1.3.6	<i>Mercado</i>	32
1.4	LEVANTAMENTO DO PROBLEMA	33
1.4.1	<i>Motivações para o Objetivo – Os “Problemas” da Bonfio</i>	33
1.4.2	<i>O Objetivo do Trabalho</i>	36
1.4.3	<i>Escolha do Método de Resolução</i>	36
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
2.1	DINÂMICA DE SISTEMAS - DEFINIÇÃO E ORIGEM.....	38
2.2	RESTRIÇÕES PARA A APLICAÇÃO DA DS	38
2.3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA DINÂMICA DE SISTEMAS	39
2.3.1	<i>Sistemas</i>	39
2.3.2	<i>Modelos</i>	40
2.3.3	<i>Estruturas Causais</i>	41
2.3.4	<i>Ciclos Recursivos</i>	42
2.3.5	<i>Variáveis de Estoque e Fluxo</i>	43
2.3.6	<i>Constantes e Variáveis Auxiliares</i>	44
2.3.7	<i>Relação Matemática</i>	44
2.3.8	<i>Atrasos</i>	45
2.4	O PROCESSO DE MODELAGEM	47
2.4.1	<i>Identificação do Problema</i>	48
2.4.2	<i>Conceptualização</i>	49
2.4.3	<i>Especificação</i>	51
2.4.4	<i>Teste</i>	52
2.4.5	<i>Uso do Modelo</i>	53
2.5	SISTEMAS DE PRODUÇÃO	53
2.6	APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	54

2.7	SOFTWARE UTILIZADO	55
3	DESENVOLVIMENTO	56
3.1	COLETA DE DADOS	56
3.2	DESCRÍÇÃO DETALHADA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA CONICALAGEM.....	57
3.2.1	<i>Processo de Transformação da Conicalagem.....</i>	57
3.2.2	<i>Estrutura Metodológica</i>	58
3.3	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	59
3.4	CONCEPTUALIZAÇÃO.....	60
3.4.1	<i>Estrutura do Sistema</i>	61
3.4.2	<i>Horizonte Temporal e Hipótese de Continuidade.....</i>	64
3.5	ANÁLISE E ESPECIFICAÇÃO DOS SUBSISTEMAS	66
3.5.1	<i>Subsistema de produção MTS</i>	66
3.5.2	<i>Subsistema de Distribuição</i>	73
3.5.3	<i>Subsistema de Previsão</i>	78
3.5.4	<i>Subsistema de Produção MTO.....</i>	79
3.5.5	<i>Constantes e Variáveis Exógenas</i>	85
3.6	SIMULAÇÃO.....	87
3.7	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	88
3.7.1	<i>Equilíbrio.....</i>	88
3.7.2	<i>Explosão de Demanda</i>	90
3.7.3	<i>Colapso de Capacidade</i>	92
3.7.4	<i>Pulso De Demanda</i>	94
3.8	USO DO MODELO	96
3.8.1	<i>Análise Do Caso Base.....</i>	96
3.8.2	<i>Interação MTO – MTS.....</i>	98
3.8.3	<i>Sazonalidade na Demanda MTS.....</i>	101
3.8.4	<i>Análise dos Prazos de Entrega.....</i>	107
3.8.5	<i>Eficiência Operacional</i>	109
3.9	CONCLUSÃO	110
3.10	SUGESTÕES.....	111
4	BIBLIOGRAFIA.....	113
	APÊNDICE	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A abertura econômica ocorrida na década de 80 colocou a indústria têxtil nacional em uma rota de intensa reestruturação organizacional e reformulação estratégica, as empresas sobreviventes a esse período turbulento foram as capazes de adotar estratégias mais ousadas ao custo de um aumento de complexidade em seus sistemas de produção.

Nesse contexto que nasce a Linhas Bonfio, tradicional fabricante de linhas têxteis, que a mais de uma década vem adotando um progressivo plano de reestruturação operacional. Tantas mudanças trouxeram um alto teor de complexidade ao sistema de produção da companhia, o que tem dificultado bastante o trabalho de seus administradores.

Os administradores do sistema de produção da Bonfio demonstraram uma interpretação pouco clara e heterogênea a respeito das causas do comportamento apresentado pelo sistema, o que vem dificultando a formulação consciente de uma política de produção eficaz, fato que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho tem por objetivo a construção de uma estrutura conceitual homogênea capaz de auxiliar os administradores da Bonfio a compreender melhor o comportamento do sistema de produção da companhia e sua reação a novas políticas.

Tal objetivo será alcançado utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas, cujo processo de desenvolvimento passará por um mapeamento qualitativo do sistema de produção, o desenvolvimento de um modelo quantitativo representando o sistema mapeado e se encerrando através da simulação matemática do modelo quantitativo, que facilitará a associação do comportamento observado às suas causas inerentes.

O modelo resultante da metodologia de dinâmica de sistemas está longe de ser o mais completo para a companhia, porém é um passo importante para que um entendimento homogêneo sobre o sistema de produção seja alcançado além de constituir uma ótima plataforma para um futuro refinamento.

1.2 VÍNCULO DO ALUNO COM A EMPRESA

O vínculo entre o autor e a empresa foi estabelecido apenas com a finalidade de realização do presente trabalho. Isso foi viável graças à relação pessoal do autor com o presidente da empresa, Alfredo Emílio Bonuki, que gentilmente permitiu o livre acesso às plantas, dados gerenciais e funcionários da companhia.

Os estudos iniciais contemplaram todas as unidades da empresa, porém, ao longo do tempo foi dado foco exclusivo à unidade de conicalagem, por essa apresentar operações mais complexas e de maior relevância do que as demais unidades da companhia.

O contato do autor com a companhia durante o desenvolvimento do trabalho ocorreu através de visitas técnicas, entrevistas com funcionários e acompanhamento de processos. Os colaboradores e gerentes da Bonfio foram muito receptivos e transparentes ao longo da execução do estudo, sempre demonstrando grande entusiasmo com o trabalho, o que muito colaborou para sua qualidade.

1.3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O trabalho foi realizado na **Linhas Bonfio S/A** (referida também como “empresa”, “companhia” ou “Bonfio”), empresa do ramo têxtil que desempenha atividades de manufatura e comercialização de linhas têxteis no Brasil. Nessa sessão o leitor poderá observar a evolução histórica da companhia, sua estrutura no presente e seu ambiente de negócios, o que facilitará a compreensão do problema estruturado na próxima sessão.

1.3.1 História

A Linhas Bonfio nasceu no ano de 1941 como um pequeno comércio próximo da Rua 25 de Março, em São Paulo, em menos de uma década a empresa expandiu seus negócios para o ramo industrial instalando uma fábrica de retorção na cidade de Americana, na época denominada Bonduki Bonfio.

Já estabelecida no ramo industrial, a empresa inicia uma estratégia de expansão através da ampliação do portfólio de produtos, culminando com a aquisição em 1989 da Tintoria S/A, uma das líderes em linhas de bordar.

Após a abertura do setor têxtil em 1996 a Bonduki Bonfio deu início a um intenso programa de reestruturação, modernizando seu parque fabril e renovando sua estrutura de gestão. Como consequência da abertura econômica a empresa alterou também sua estratégia de expansão, passando a buscar a verticalização de processos, o que se deu através da aquisição da Tinturaria Stilbene em 1999 e do estabelecimento de uma fábrica de retorção em Três Lagoas no ano de 2003.

No ano de 2005 a Bonduki Bonfio deu seu mais importante passo em direção à reestruturação ao celebrar uma Joint Venture com a empresa americana American & Efird (A&E), uma das líderes mundiais na fabricação de linhas.

Da união entre a A&E e a Bonduki Bonfio nasceu a Linhas Bonfio, uma companhia com tecnologia e processos de gestão de classe mundial, dispondo atualmente de uma estrutura de quatro unidades fabris, 350 colaboradores, atendendo a mais de 5.000 clientes e com produção mensal de 160 mil toneladas.

1.3.2 Estrutura industrial e Organizacional

A presente estrutura organizacional da Bonfio possui um forte caráter hierárquico e de concentração funcional, como pode ser observado pela Figura 1:

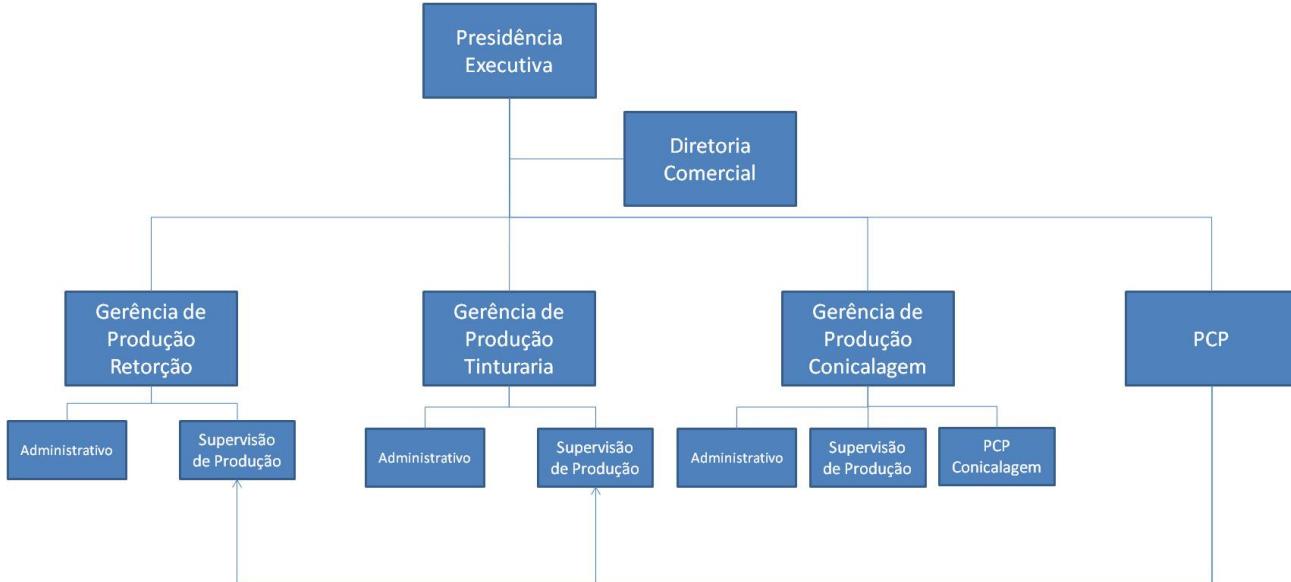


Figura 1: Organograma Funcional da Empresa

A presidência, cargo acumulado por Alfredo Bonduki, encontra-se acima de todas as unidades funcionais, dela que partirão as decisões finais sobre reformulações estratégicas da empresa, políticas das unidades funcionais e metas para as unidades funcionais. O presidente executivo observa a empresa de uma forma ampla, coordenando as unidades funcionais em períodos críticos como conflitos internos.

A diretoria comercial é a unidade funcional mais próxima à presidência executiva, seu papel é definir e implementar a política comercial da empresa, o que é feito em conjunto com a presidência executiva. Dentre as atividades correntes da diretoria destacam-se o processo de venda, contato com clientes e a elaboração das previsões de demanda e tendências de médio-longo prazo.

O PCP é o veículo de implementação das políticas comerciais delineadas pela diretoria comercial, o departamento utilizará a previsão de demanda e as tendências de consumo provenientes da diretoria para elaborar os planejamentos de produção e compras no médio e longo prazo. Além do planejamento de longo prazo, cabe ao PCP supervisionar o planejamento de curto prazo que é elaborado pela divisão de PCP exclusiva da unidade de conicalagem.

Os gerentes das unidades funcionais de produção são responsáveis pelo desempenho operacional de suas unidades, eles serão cobrados por um sistema de metas elaborado pela presidência executiva e possuem autonomia para ajustar as metodologias de produção aplicadas em suas unidades.

Os supervisores estão diretamente vinculados às operações no chão de fábrica, devido à companhia não possuir um sistema de informação capaz de monitorar a atividade produtiva, os supervisores se encarregam de passar ao PCP as condições do sistema produtivo. Da interação entre os supervisores e o PCP que será concebido o planejamento final a ser executado pelas operações.

As políticas estratégicas e de produção adotadas pela empresa são resultantes de uma longa interação entre os grupos funcionais descritos acima, porém, ao longo do desenvolvimento do trabalho, pode ser percebido que as unidades de produção possuíam um poder de influência inferior ao da unidade comercial, fato que traz grande desconforto para os gerentes e supervisores.

1.3.3 Produtos

As linhas são produtos pouco percebidos pelos clientes finais da cadeia têxtil, porém têm papel determinante tanto para a qualidade dos produtos onde são empregadas quanto para a eficiência dos processos de indústrias a jusante da cadeia têxtil.

Apesar da aparência simples as linhas são produtos de denso conteúdo técnico, para se definir um tipo de linha são necessários quatro atributos, são eles: tipo de fio que a compõe, tipo de bobina utilizada, comprimento total e cor.

Uma das estratégias adotadas pela Bonfio foi a expansão de sua família de produtos, atualmente a empresa oferece ao mercado cinquenta e dois tipos de linhas, que são agrupadas em cinco categorias, como colocado pela Tabela 1: na de acordo com sua aplicação. Para uma melhor visualização, as categorias de produtos da Bonfio e seus respectivos modelos são expostos na Tabela 1:

Produtos	Composição	Modelos
Linhas Mistas 	Compostas por filamentos contínuos de poliéster recobertos com algodão fibra longa ou fibras de poliéster. São destinadas a costura de alta performance	  
Linhas de Bordado 	Compostas por Linhas trilobais de poliéster de alta tenacidade em títulos finos ou grossos, Rayon Viscose de altíssimo brilho e toque suave e Metalizados de alta performance	   
Linhas de Costura 	Podem ser compostas por Poliéster fiado, Poliéster trilobal ou algodão. Seguem requisitos técnicos rigorosos para garantir alta produtividade à costura	   
Fios Texturizados 	Compostos por fios de poliéster ou poliamida texturizados e aquecidos. Oferecem boa elasticidade à costura, sendo ideais para pontos de cobertura	  
Produtos Técnicos 	Linhas para operações especiais compostas por meta-aramida, de propriedades anti-chamas ou poliéster retorcido, de alta tenacidade	 

Tabela 1: Família de Produtos da Bonfio

As categorias definidas na Tabela 1 agrupam os produtos da Bonfio segundo o tipo de fio utilizado na fabricação da linha, cada uma das categorias é subdividida em modelos, que são definidos segundo o propósito da aplicação da linha, finalmente dentro dos modelos são dadas as especificações dos os produtos finais, definindo-se o comprimento do fio, a bobina e a cor.

1.3.4 Processos

Em termos gerais o processo de produção de linhas nada mais é do que uma série de processos de beneficiamento dos fios têxteis, que recebem propriedades mecânicas, propriedades estéticas e formato final segundo a necessidade dos clientes.

Com o estabelecimento da *joint venture* em 2005, a Bonfio passa a importar fios têxteis de uma subsidiária da A&E na China, colhendo os benefícios dos baixos custos de produção do país asiático, cabendo ao parque industrial brasileiro o beneficiamento e acabamento da matéria prima importada.

Dentro do sistema de produção da Bonfio o beneficiamento dos fios têxteis ocorre por meio de três processos: retorção, tinturaria e conicalagem.

O processo de retorção é realizado na unidade de retorção em Três Lagoas, esse processo adiciona aos fios as propriedades mecânicas requeridas pelas especificações técnicas do produto final. Desde a parceria com a A&E, a Bonfio vem aumentando o volume de importação de fios já retorcidos, tornando o processo de retorção cada vez menos importante para a empresa.

Os fios retorcidos seguem para a unidade de tinturaria localizada em Itaquaquecetuba, na tinturaria os fios serão tingidos já assumindo a cor apresentada pelo produto final.

Da tinturaria os fios seguem para a unidade de conicalagem em Americana, onde recebem o formato do produto final transformando-se em linhas. No processo de conicalagem os fios tingidos receberão um tratamento superficial, sendo definidos o brilho e a rugosidade do produto final, e o formato final, definindo-se o tipo de cone e o comprimento do produto final.

Observa-se que a atividade de planejamento vai se tornando mais difícil a medida que se avança nos processos, estando a maior carga de planejamento sob a unidade de conicalagem, cujos processos caracterizaram o produto final. Isso explica a existência de uma unidade de PCP exclusiva para a conicalagem.

1.3.5 Clientes

O perfil dos clientes exerce grande influência sob as políticas de produção da Bonfio, por isso a importância de sua boa compreensão. Inicialmente é interessante distinguir os clientes dos usuários finais das linhas têxteis.

Os usuários finais das linhas na cadeia têxtil dividem-se entre grandes indústrias, como Coteminas, Colchões Probel, Vulcabras, Guararapes, e pequenas fábricas como confecções e malharias. Os dois grupos possuem padrão de consumo bastante distinto, enquanto as grandes indústrias trabalham com um grande horizonte de planejamento e pedidos de grande volume, as confecções e malharias trabalham com pedidos pequenos e de curto prazo, sem um planejamento elaborado.

O perfil dos clientes diretos da indústria de linhas é decorrente do perfil dos usuários finais do produto. As grandes Indústrias, por possuírem consumo estável e volumoso, adquirem as linhas diretamente dos fabricantes sendo clientes diretas e usuárias finais. No caso das pequenas confecções e malharias, que possuem um consumo discricionário e baixo, forma-se um elo intermediário entre fabricantes e usuário final, os armarinhos, que serão clientes imediatos dos fabricantes.

No caso da Bonfio, os armários são responsáveis por 80% do volume de vendas e as grandes indústrias por 20%. Tal perfil traz grandes dificuldades para as unidades de produção da Bonfio, pois a demanda dos armários apresenta variabilidade e instabilidade muito superior à das grandes indústrias.

1.3.6 Mercado

O ambiente de negócios da Bonfio pode ser caracterizado como hostil, o mercado brasileiro de linhas é um mercado altamente competitivo e possui uma estrutura que exerce alta pressão sobre os produtores industriais, como resumido pela Figura 2:

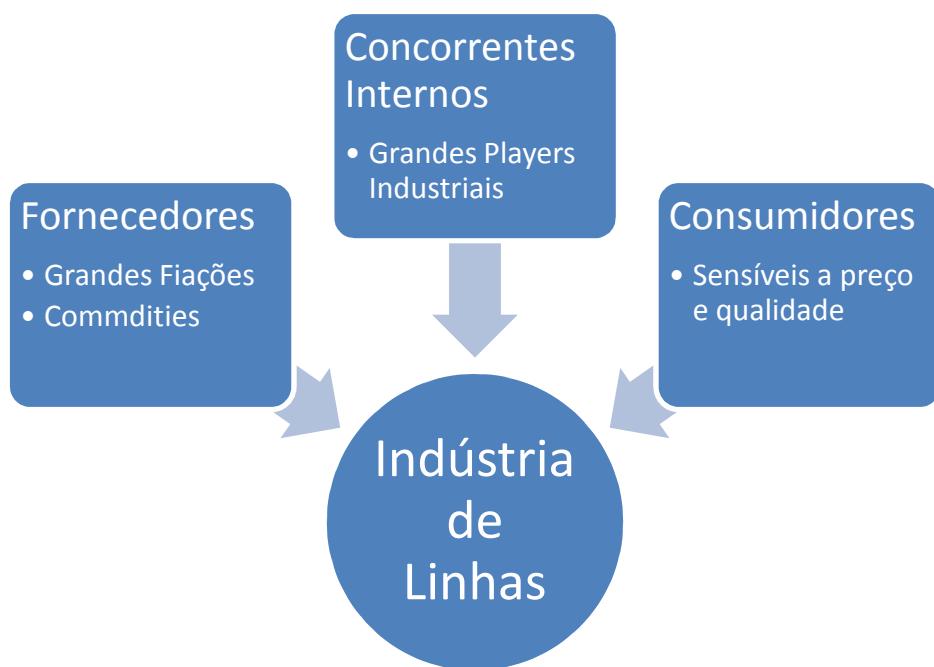


Figura 2: Pressões competitivas na indústria de linhas - Adaptado pelo autor

Analizando-se os concorrentes internos, pode-se verificar a presença de grandes *players* como: Linhas Bonfio, Seta Linhas, Linhas Nil, Resistente e a Coats Plc., todos operam atualmente com um considerável nível de capacidade ociosa, tornando a concorrência interna bastante intensa.

Dentre os fornecedores destacam-se as grandes fiações, cuja estrutura de custos é altamente correlacionada ao preço de commodities como a celulose e o petróleo. Devido ao seu grande porte, as fiações possuem força o suficiente para repassar as oscilações de preços das commodities para a indústria de linhas, deixando-as sem poder de barganha.

O consumo de linhas de costura está vinculado ao consumo de bens duráveis com conteúdo têxtil tais como roupas, artigos de cama mesa e banho, colchões, móveis entre

outros. Tais produtos não preenchem necessidades básicas do consumidor final, podendo ter seu consumo adiado em períodos de instabilidade econômica, o que torna o consumidor final sensível a reajustes de preços.

Pode-se observar que os fabricantes são os amortecedores da indústria de linhas têxteis, a eles serão transferidos todos os choques de demanda e custos, além da grande variabilidade da indústria de moda, cuja cadeia de suprimentos contém a indústria de linhas têxteis.

Dada a dinâmica da indústria de linhas têxteis pode-se intuir que os fabricantes bem sucedidos serão aqueles que administrarem melhor as oscilações da indústria e possuirem flexibilidade o suficiente para absorver a variabilidade da demanda, nesse sentido a Bonfio vem buscando aprofundar seus laços com clientes, oferecendo um maior nível de serviço e uma oferta mais ampla de produtos.

1.4 LEVANTAMENTO DO PROBLEMA

Nessa sessão será descrita a gênese do objetivo traçado para o trabalho e sustentada a opção pelo método utilizado para atingir o objetivo traçado, para isso serão explorados os problemas observados na empresa.

1.4.1 Motivações para o Objetivo – Os “Problemas” da Bonfio

As buscas pelos problemas no sistema de produção da Bonfio ocorreram em duas etapas, a primeira etapa consistiu em uma busca visual por meio de visitas técnicas e acompanhamentos de processos, a segunda etapa consistiu em uma busca por informações detalhadas, feita através de entrevistas semi-abertas com colaboradores da empresa.

Durante as visitas técnicas um aspecto que atraiu a atenção do autor foi o alto nível de estoques de produto acabado, ao buscar informações sobre a recorrência desse sintoma, o autor descobriu que apesar de a empresa tem trabalhado com um nível de estoques mais alto que o normal, visando manter um bom nível de serviços aos clientes e evitar perder bons momentos do mercado, como aconteceu no ano de 2010. O volume estocado pela empresa cresceu a um ponto em que a empresa foi obrigada a alugar um imóvel para ampliar sua capacidade física de estocagem.

O segundo sintoma observado foi a coexistência de duas estratégias de produção, produtos padronizados eram produzidos para estoque enquanto produtos personalizados eram produzidos para ordem. Segundo os colaboradores, pedidos personalizados constituem apenas

20% das vendas, como exposto pelo Gráfico 1, porém trazem grandes transtornos para a produção e complicam o planejamento.

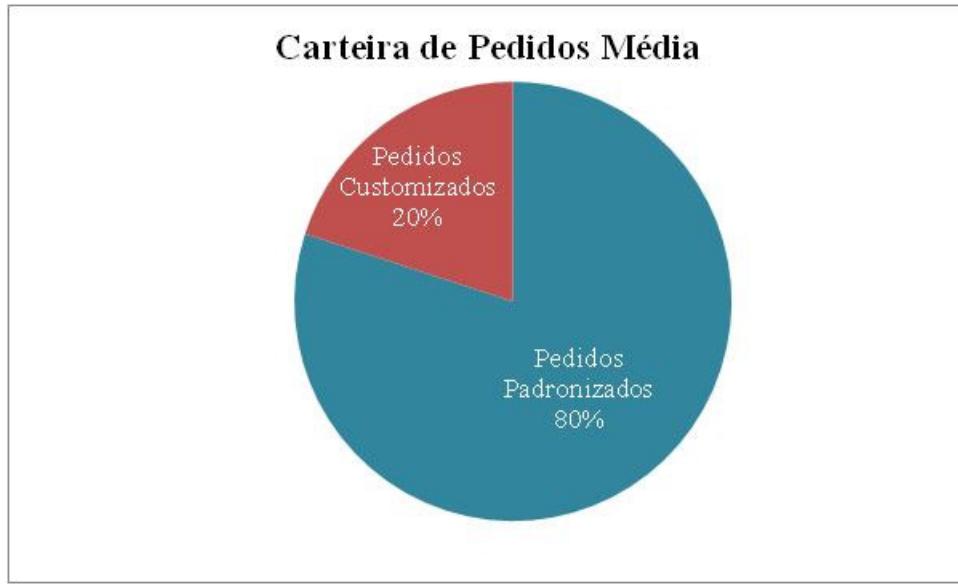


Gráfico 1: Carteira de Pedidos Média da Bonfio

Os dois principais sintomas observados pelo autor eram altamente indesejados pelos colaboradores da Bonfio e são originados na unidade de conicalagem da empresa, as demais unidades trabalham com longos horizontes de planejamento decorrentes do lento processo de importação, enquanto a conicalagem sofre impacto direto das instabilidades na demanda na Bonfio.

A primeira etapa rendeu descobertas sobre os sintomas indesejados do sistema, o alto volume de estoques e a coexistência de duas estratégias de produção, e o endereço das suas fontes, a unidade de conicalagem. As descobertas foram um grande avanço, porém ainda não eram suficientes para esclarecer por que os sintomas observados se manifestavam e por que o sistema de produção não era capaz de reagir contra esses sintomas.

O autor deu início à segunda etapa de levantamento, direcionando as investigações para a unidade de conicalagem iniciando uma bateria de entrevistas com seus colaboradores a fim de responder às perguntas remanescentes. O conteúdo das entrevistas poderia ser agrupado em três pontos principais:

1. A percepção dos entrevistados sobre os sintomas levantados
2. A percepção dos entrevistados sobre as origens dos sintomas
3. Propostas para combater os sintomas observados

A Tabela 2 consolida o resultado da pesquisa, que é detalhado nos parágrafos subsequentes.

Pergunta	Resultado
Percepção dos sintomas	Respostas uniformes, entrevistados reconhecem a existência dos sintomas e têm uma impressão negativa a seu respeito
Percepção das origens	Respostas uniformes, entrevistados apontam as políticas comerciais como fontes dos sintomas
Propostas para solução	Respostas divergentes, sugestões envolviam o “relaxamento” das propostas comerciais

Tabela 2: Resultado do Questionário Aplicado aos Colaboradores da Conicalagem

Ao responderem a primeira questão, todos os entrevistados demonstraram reconhecer os sintomas, mostrando grande insatisfação com a sua ocorrência, pois era depositada sobre eles a responsabilidade pelo desempenho produtivo da unidade e os sintomas resultavam em péssimos indicadores de produtividade para a conicalagem.

A segunda questão também apresentou respostas homogêneas entre os entrevistados, todos associaram as causas dos sintomas às sucessivas mudanças na estratégia comercial da companhia, tais mudanças teriam exercido esforços cada vez maiores sobre a estrutura produtiva da companhia, fazendo com que as operações convergissem para um estado de menor produtividade.

A terceira questão provocou reações interessantes, as sugestões imediatas fornecidas pelos entrevistados consistiam, essencialmente, em “relaxar” as exigências da estratégia comercial sobre o sistema de produção, porém, quando questionados em um segundo momento sobre a possibilidade inversa, de o sistema se adaptar à estratégia comercial, as respostas foram muito divergentes e fragilmente estruturadas.

As respostas dadas às primeiras duas questões sustentaram a relevância da discussão iniciada pelo autor, porém foram as respostas dadas à terceira questão que motivaram a opção pelo objetivo do trabalho.

Pela reação dos colaboradores à terceira questão pode-se perceber que pouco se exercitou a ideia de alterar a estrutura do sistema de produção da conicalagem, ficou evidente também que, apesar de apontarem as políticas comerciais como origem dos sintomas observados, os entrevistados não conseguiam descrever a formação dos sintomas de uma maneira clara e homogênea.

1.4.2 O Objetivo do Trabalho

Concluída a segunda etapa da investigação, o autor pode retirar as motivações que estabeleceram o objetivo do trabalho, são elas:

- A existência de dois sintomas, ou problemas, operacionais indesejados que indicam um mau desempenho do sistema de produção
- A dificuldade de se combater os problemas devido à compreensão pouco clara de seu processo de formação

Com essas motivações o autor estabelece como o objetivo do trabalho:

A construção de uma estrutura conceitual capaz de prover aos colaboradores da conicalagem da Bonfio uma compreensão clara sobre a formação dos sintomas que prejudicam o desempenho do sistema de produção, e que facilite a construção de propostas para combater tais sintomas.

Observa-se que o objetivo estabelecido não consiste na aplicação de uma ferramenta para a solução de um problema específico da empresa, mas sim na capacitação da empresa de resolver seus problemas no presente e também no futuro, o que, sob o ponto de vista deste trabalho, constitui no problema da Bonfio.

1.4.3 Escolha do Método de Resolução

Para atingir o objetivo estabelecido, será necessário o emprego de uma metodologia capaz de satisfazer as seguintes demandas:

- O método deve ser didático na descrição de como os sintomas são formados
- O método deve facilitar a elaboração de propostas para a correção de sintomas indesejados

Para satisfazer tais demandas o autor optou por empregar o processo de modelagem por Dinâmica de Sistemas, que se mostrou adequada ao objetivo traçado pelos seguintes motivos:

- Os sistemas de produção geram seu comportamento de maneira endógena, podendo ser modelados pela metodologia

- A metodologia construirá a estrutura do sistema de produção e simulará seu comportamento, dando grande auxílio à compreensão do processo de formação dos sintomas
- Uma vez construída a estrutura do sistema, a metodologia permite que alterações sejam feitas, expondo seus efeitos sobre o sistema

Maiores detalhes sobre a metodologia empregada serão expostos nas sessões de revisão bibliográfica e desenvolvimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão expostos os conceitos e metodologias que darão amparo ao desenvolvimento do trabalho, para isso será dada uma visão geral da Dinâmica de Sistemas, seguida de uma descrição detalhada sobre a ferramenta e seu processo de implementação.

2.1 DINÂMICA DE SISTEMAS - DEFINIÇÃO E ORIGEM

Essa sessão auxilia o leitor a compreender a Dinâmica de Sistemas (“DS”), sua origem, seus objetivos, a forma como são atingidos e quando as situações em que pode ser utilizada. O autor reconhece o grande número de definições e conceitos apresentados na bibliografia, porém não cabe a esse trabalho uma discussão filosófica sobre DS.

A origem da DS se dá com o trabalho do professor Jay W. Forrester no M.I.T., quem adaptou a filosofia e as formas de representação, desenvolvidas na Teoria de Controle, para representação de sistemas sociais. Como resultado do trabalho do professor Forrester foi desenvolvida uma metodologia que, amparada por uma estrutura de linguagem homogênea, é capaz de representar, modelar e simular sistemas complexos.

Uma definição que, de forma sucinta e precisa, exprime o que é DS é a dada pelo professor Sterman: “*a Dinâmica de Sistemas é um método para ampliar o aprendizado em sistemas complexos*” (Sterman 2000 – tradução livre).

Da definição de Sterman tira-se o objetivo da DS de “*ampliar o aprendizado em sistemas complexos*”. É importante que fique claro para o leitor que o objetivo da DS não é prover a solução um problema específico, mas sim auxiliar a compreensão de problemas complexos, tornando o desenvolvimento de uma solução mais fácil e eficaz.

A DS atingirá seu objetivo através de um rigoroso método interativo para a observação e identificação do comportamento dinâmico dos sistemas em estudo, desenvolvendo um modelo quantitativo capaz de explicar o comportamento observado. Mais detalhes a respeito do método de modelagem seriam expostos adiante.

2.2 RESTRIÇÕES PARA A APLICAÇÃO DA DS

Apesar de sua definição ter um caráter bastante abrangente, a DS mostra-se não apropriada em situações em que:

- Há falta de interrelação sistemática
- O passado não influencia o futuro

- As mudanças ao longo do tempo não são importantes
- Baixo nível de agregação

2.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA DINÂMICA DE SISTEMAS

Como visto na sessão anterior, a DS se apoia em uma estrutura de representação bem definida, o objetivo nessa sessão é destacar os principais conceitos que fazem parte dessa estrutura, expondo ao leitor os pilares que sustentarão o método de modelagem da DS.

2.3.1 Sistemas

A importância do conceito de Sistemas motivou o desenvolvimento de um vasto campo teórico, a *Teoria de Sistemas*, a DS, no entanto, aborda uma modalidade específica de sistemas, dessa forma dispensando uma longa caminhada pela Teoria de Sistemas. O objetivo aqui será fornecer ao leitor um conceito geral de sistemas e caracterizar os sistemas abordados pela DS.

A Teoria de Sistemas fornece inúmeras definições para o conceito de sistemas, vamos aqui adotar a definição dada por Forrester por sua objetividade e simplicidade: *Sistema significa um agrupamento de partes que operam em conjunto com um propósito em comum.* (Forrester 1968 - tradução livre).

Como complemento da definição de Forrester, a definição dada por Ackoff (1994) lista importantes propriedades apresentadas pelos Sistemas:

Um Sistema é um todo constituído de duas ou mais partes que:

- *Cada uma das partes podem afetar as propriedades do todo*
- *Nenhuma das partes pode afetar, de maneira independente, as propriedades do todo*
- *Nenhum sub-grupo de partes pode afetar, de maneira independente, as propriedades do todo*

Portanto o Sistema, ou o todo, não pode ser dividido em partes ou sub-grupos de partes independentes. (Ackoff 1994 – tradução livre)

Tão importante quanto a definição geral de Sistemas é a classificação dos Sistemas estudados pela DS. A DS se aplica a Sistemas Fechados, *sistemas cuja ação de controle no presente baseia-se em resultados das ações passadas* (Forrester 1968 – tradução livre). O comportamento dos Sistemas Fechados é uma consequência de acontecimentos endógenos ao

Sistema, portanto um Sistema Fechado é capaz de gerar seu próprio comportamento ao longo do tempo.

Tendo uma visão clara do objeto de análise da DS, os Sistemas Fechados, é interessante definir dois de seus mais importantes componentes estruturais, os Subsistemas e as fronteiras.

2.3.1.1 Subsistemas

Dentro dos Sistemas é possível fazer agrupamentos de partes que possuem um alto teor de autonomia com relação ao todo, esses agrupamentos são definidos como Subsistemas. A identificação dos Subsistemas é de grande auxílio para compreender o Sistema, sendo uma forma coordenada e controlada de simplificar o estudo de Sistemas, sem romper a observação final de Ackoff (1994).

2.3.1.2 Fronteiras

Em Sistemas Fechados, cada uma das partes do Sistema é influenciada pelo próprio Sistema, no entanto, é muito comum se deparar com variáveis que não sofrem influência do Sistema, essas variáveis são definidas como variáveis exógenas ao Sistema e são elas que delimitarão as fronteiras do Sistema. Pode-se, portanto, definir as fronteiras dos Sistemas como seu limite de influência.

2.3.2 Modelos

Segundo Forrester o modelo é um substituto para um objeto ou sistema real, por exemplo, para um físico uma expressão matemática pode substituir um corpo em movimento ou sua interação com outro corpo da mesma forma que para uma criança, bonecos de brinquedo substituem pessoas reais.

Dos exemplos ilustrados podemos observar que as substituições, ou modelos, podem se manifestar de diversas maneiras, um boneco de brinquedo constitui um modelo concreto de uma pessoa real e a expressão matemática constitui um modelo abstrato do corpo físico em movimento.

Observa-se também que a substituição, ou o modelo, não ocorre de forma arbitrária, ela é sempre regida por um propósito. Substitui-se um corpo real em movimento por uma expressão matemática com um propósito compreender melhor a natureza do movimento de corpos ou prever como o corpo se movimentará no futuro, da mesma forma que a criança

substitui pessoas reais por bonecos com o propósito de estimular melhor sua imaginação durante a brincadeira.

Sob o ponto de vista da DS os modelos servirão como substitutos do Sistema real em estudo, sendo construídos de acordo com os objetivos do estudo.

2.3.3 Estruturas Causais

As estruturas causais são o ponto de partida da construção dos modelos de DS, para a DS não existem correlações ou influências indiretas, a DS baseia-se nas relações diretas entre as partes do sistema que são representadas pelas estruturas causais.

Existem dois tipos de relação causal em DS, a positiva e a negativa como definido abaixo:

- Relação Causal Positiva: Uma relação causal é positiva se o comportamento da variável, ou parte, influente provoca um comportamento mesma natureza na variável influenciada, portanto se a variável influente aumentar (diminuir) a variável influenciada também aumentará (diminuirá). Expressando simbolicamente temos:

$$\circ \quad A \rightarrow +B \Rightarrow \frac{\partial B}{\partial A} > 0$$

- Relação Causal Negativa: Uma relação causal é negativa se o comportamento da variável, ou parte, influente provoca um comportamento de natureza oposta na variável influenciada, portanto se a variável influente aumentar (diminuir) a variável influenciada também diminuirá (aumentará). Expressando simbolicamente temos:

$$\circ \quad A \rightarrow -B \Rightarrow \frac{\partial B}{\partial A} < 0$$

Na DS as estruturas causais são representadas por setas acompanhadas do sinal da relação, como exposto na Figura 3:

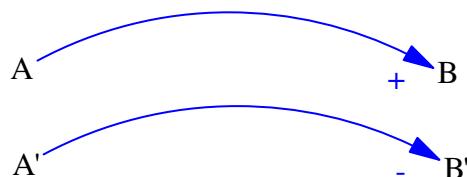


Figura 3: Representação Gráfica das Estruturas Causais - Elaborado pelo autor

2.3.4 Ciclos Recursivos

Os ciclos recursivos consistem de duas ou mais estruturas causais entre elementos, combinadas de uma forma que a influência de qualquer um dos elementos é transferida ao longo do ciclo, retornando ao ponto de partida.

Assim como as estruturas causais os ciclos recursivos também são classificados como positivos e negativos:

- Ciclo Recursivo Positivo

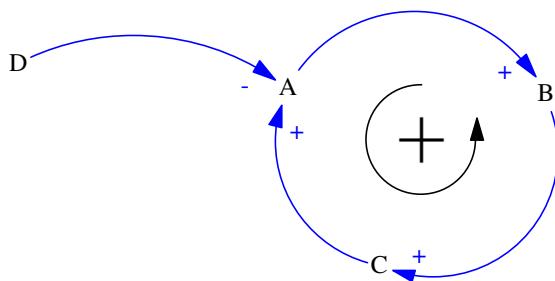


Figura 4: Representação Gráfica do Ciclo Recursivo Positivo - Elaborado pelo autor

A Figura 5 contém um ciclo recursivo positivo, A possui uma relação causal positiva com B, que por sua vez possui uma relação causal positiva com C, que encerra o ciclo com uma relação causal positiva com A. Qualquer alteração em um dos elementos do ciclo será transferida para todos os outros voltando ao primeiro e assim sucessivamente. As estruturas causais positivas preservarão a natureza da alteração ao longo de todo o ciclo, dando o caráter positivo ao ciclo.

- Ciclo Recursivo Negativo:

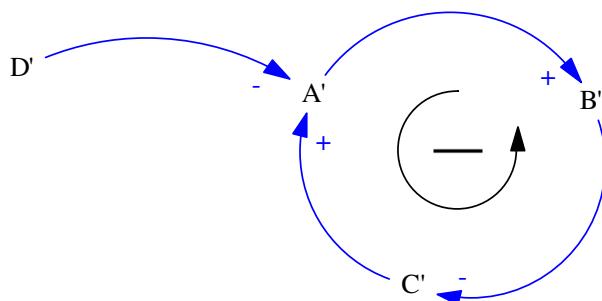


Figura 5: Representação Gráfica do Ciclo Recursivo Negativo - Elaborado pelo autor

A Figura 5 expõe o ciclo recursivo formado por A', B' e C', seguindo a mesma estrutura do ciclo A, B, C com a diferença que a estrutura causal B', C' inverterá a natureza das variações transmitidas ao longo do ciclo, dando um caráter negativo ao ciclo. Vale observar que para ciclos maiores com um grande número de relações causais positivas e negativas, a polaridade do ciclo é dada pelo número de relações causais negativas, caso esse número seja par, o ciclo é positivo, caso o número seja ímpar, o número é negativo.

Os ciclos recursivos são elementos muito importantes para a DS, pois eles manifestam comportamentos já conhecidos, por exemplo, um ciclo positivo crescerá ou diminuirá indefinidamente, enquanto um ciclo negativo entrará em equilíbrio.

2.3.5 Variáveis de Estoque e Fluxo

Dois importantes elementos estruturais da DS são as variáveis de estoque e as variáveis de fluxo.

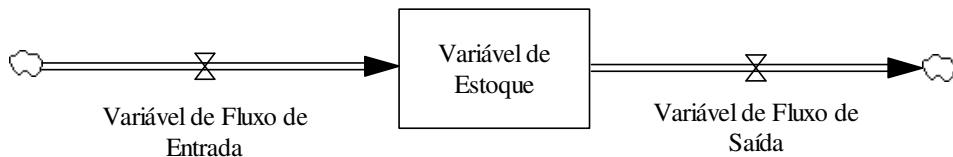


Figura 6: Representação Gráfica das Variáveis de Estoque e Fluxo - Elaborado pelo autor

As variáveis de estoque são aquelas onde ocorre acumulação, um exemplo clássico seria uma caixa d'água cuja função é acumular água.

As variáveis de fluxo são aquelas que alteram as variáveis de estoque, no caso da caixa d'água, a variável de fluxo de entrada seria a bomba d'água e a de saída a válvula de exaustão.

Um bom meio de se identificar as variáveis de fluxo e estoque de um sistema é imaginando seu comportamento caso ele pare completamente de funcionar, que equivale a nenhuma alteração ser passada adiante pelas relações causais, por exemplo, uma loja fecha as portas aos domingos, a loja será impossibilitada de comprar ou vender mercadorias, pois está fechada, dessa forma as variáveis de compra e venda vão a 0, enquanto a variável de estoque fica inalterada. No cenário de paralização as variáveis de fluxo cairão a 0 e as de estoque ficarão estáveis.

2.3.6 Constantes e Variáveis Auxiliares

As constantes e as variáveis auxiliares são associadas às variáveis de fluxo, em conjunto com as variáveis de estoque elas determinarão o valor do fluxo para um dado instante, na Figura 7 pode-se ver a representação gráfica das variáveis auxiliares e constantes:

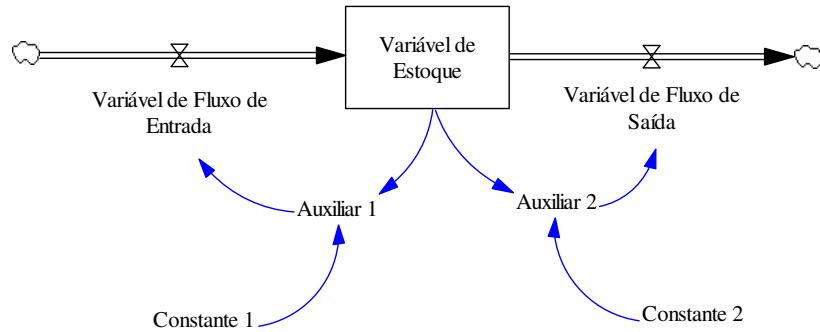


Figura 7: Representação Gráfica das Variáveis de Estoque e Constantes - Elaborado pelo autor

2.3.7 Relação Matemática

Os quatro tipos de variáveis definidos: Estoque, Fluxo, Auxiliar e Constante podem ter sua relação resumida a uma expressão matemática, tal expressão será levantada baseando-se no sistema exposto na Figura 8:

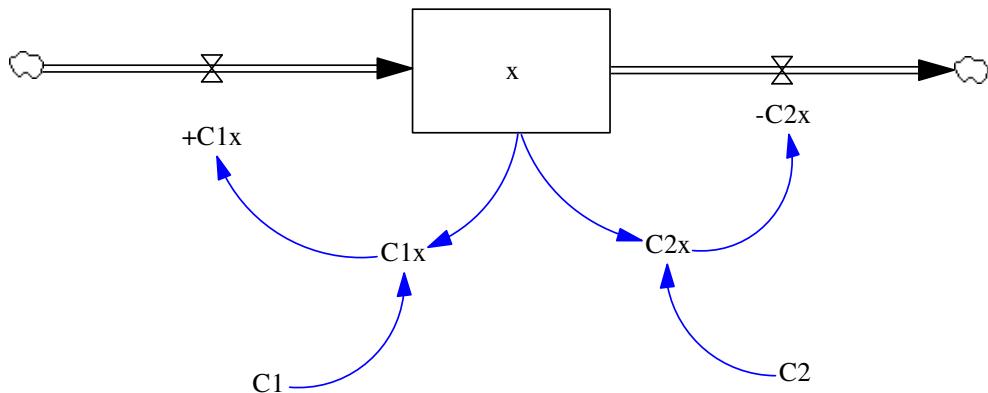


Figura 8: Estrutura Matemática - Elaborado pelo autor

Dada a variável de estoque x e os fluxos $C1x$ e $-C2x$, pode-se representar a acumulação da variável de estoque x através da equação de balanço:

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t (+C1x - C2x) dt$$

Equação 1: Equação de Balanço da Variável de Estoque

2.3.8 Atrasos

Os atrasos são estruturas muito comuns em sistemas fechados, a forma como eles se manifestarão dependerá da natureza do sistema estudado, as três formas mais comuns de atrasos são o atraso de duto (tradução livre para o termo *pipeline delay*), o atraso de primeira ordem e o atraso de segunda ordem. Graficamente, a DS representa os atrasos através de setas cortadas por um traço:

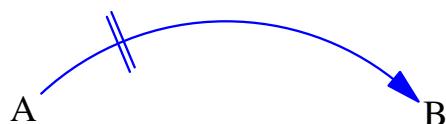


Figura 9: Representação Gráfica dos Atrasos - Elaborado pelo Autor

A explicação mais simples para o efeito dos atrasos sobre o sistema é, na opinião do autor, é a fornecida por Sterman (2000). Sterman utiliza o exemplo de um reservatório de água para demonstrar o efeito de cada um dos tipos de atrasos é sobre o fluxo de saída de água do reservatório, como esquematizado na Figura 10:

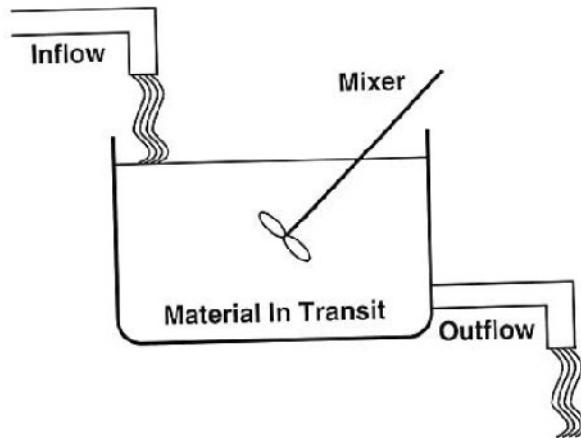


Figura 10: Representação do Reservatório - Sterman 2000

O efeito do atraso de duto sobre o fluxo de saída ocorrerá como se o misturador estivesse desligado, de modo que as partículas de água no reservatório mantêm sempre a mesma posição. Nesse caso uma variação no fluxo de entrada teria exatamente o mesmo comportamento no fluxo de saída passado o intervalo do atraso.

Para o atraso de primeira ordem a hipótese é de que o misturador funciona em velocidade máxima, de modo a fazer com que as partículas de água estejam perfeitamente misturadas no reservatório. Nesse caso uma variação no fluxo de entrada será transmitida pelo fluxo de saída através de um decaimento exponencial durante o intervalo do atraso.

O atraso de terceira ordem é representado por uma série finita de atrasos de primeira ordem, nesse caso o fluxo de saída do primeiro reservatório alimenta o segundo reservatório que continua a sequência, como exibido pela Figura 11. A sobreposição dos atrasos de primeira ordem empobrece a mistura das partículas, de modo que uma variação no fluxo de entrada terá um pico de efeito sobre o fluxo de saída após o intervalo de atraso, com ascenção e queda suave.

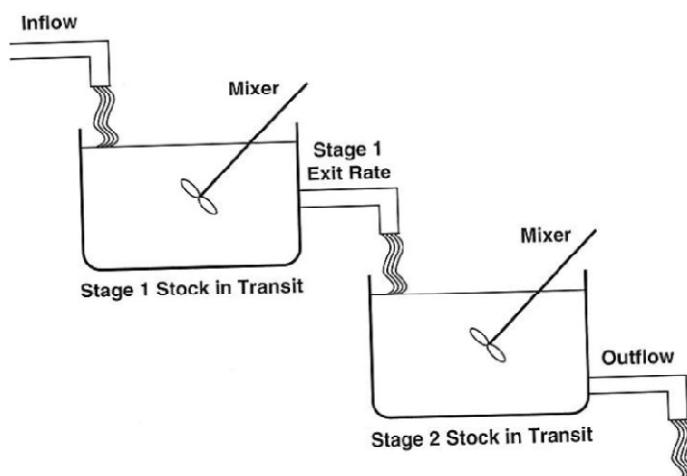


Figura 11: Representação dos Reservatórios em Série - Sterman 2000

O efeito dos atrasos sobre o fluxo de saída e a variável de estoque associada a eles pode ser mais bem observado através do Gráfico 2 e do Gráfico 3:

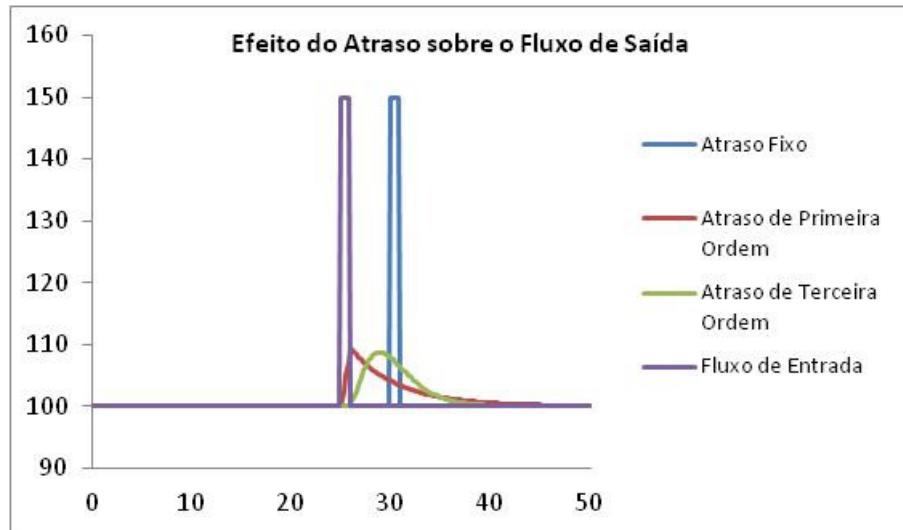


Gráfico 2: Efeito dos Atrasos Sobre o Fluxo de Saída



Gráfico 3: Efeito dos Atrasos Sobre o Estoque

Dos gráficos pode-se observar que o efeito do atraso é mais suave para o atraso de primeira ordem, seguido pelo atraso de segunda ordem e pelo atraso fixo, é interessante observar que a área abaixo das curvas de fluxo de saída deve coincidir de modo a satisfazer o princípio da continuidade.

Para o sistema de produção da Bonfio, a estrutura de atraso utilizada é o atraso de terceira ordem, pois melhor representa a natureza do sistema de manufatura (Forrester 1968).

2.4 O PROCESSO DE MODELAGEM

A sessão 2.3 apresentou ao leitor os elementos fundamentais da DS, agora que a “linguagem” utilizada pela DS foi apresentada, temos condições de explorar o processo de

modelagem da DS. A apresentação será feita aplicando-se todo o processo de modelagem a um exemplo clássico da DS, o controle de nível d'água em um reservatório.

Na bibliografia de DS não há um consenso sobre o conteúdo e a nomenclatura das fases do processo de modelagem, pode-se perceber, entretanto, que independente da nomenclatura e conteúdos atribuídos, a essência do processo de modelagem proposto pelos diferentes autores é bastante uniforme. Nesse trabalho o processo de modelagem proposto é o sugerido por Pruyt 2008.

O processo de modelagem adotado por Pruyt segue cinco passos:

1. Identificação do problema
2. Conceptualização
3. Especificação
4. Teste do modelo
5. Uso do modelo

Cada um dos passos será detalhado exemplificado nas sessões subsequentes.

2.4.1 Identificação do Problema

Para ser útil o modelo de DS deve abordar problemas específicos dentro do sistema em estudo, um modelo que exponha todos os detalhes de um sistema mais atrapalharia do que ajudaria na compreensão de seu comportamento, Sterman menciona Von Clasevitz, alertando que o mapa não é o território, um mapa com os detalhes do território não seria de nenhuma utilidade. (Sterman 2000)

Dessa forma a fase de identificação do problema recebe o papel de definir claramente qual com qual propósito o modelo será desenvolvido e quais aspectos do sistema são mais relevantes para que esse propósito seja atingido.

Para o levantamento do propósito do modelo, Sterman sugere uma sequência de cinco perguntas, são elas:

- i. Quais os donos do problema?
- ii. Qual a questão que mais preocupa os donos do problema?
- iii. Qual a questão que os donos do problema estão tentando solucionar?
- iv. Qual o problema real por traz dos sintomas observados?
- v. Qual o propósito do modelo?

Uma vez identificado o propósito do modelo, é dado início a uma etapa crítica de todo o processo de modelagem, as simplificações. Sterman de refere à etapa de simplificações

como uma “faca lógica”, em que apenas os aspectos do sistema realmente relevantes para o cumprimento do propósito estipulado, serão considerados no desenvolvimento do modelo, os demais aspectos devem ser “cortados”.

A identificação do problema formará as fundações das etapas subsequentes do processo de modelagem, por isso ela deve receber bastante atenção, caso contrário, graves falhas conceituais podem emergir em etapas futuras, podendo comprometer todo o processo de modelagem.

2.4.2 Conceptualização

A conceptualização é a fase qualitativa do processo de modelagem, nela os estudos iniciais sobre o sistema serão organizados de modo a facilitar o aprendizado qualitativo e abrir caminho para sua modelagem quantitativa.

O objetivo da fase de conceptualização é o de “capturar as estruturas recursivas do sistema, que podem oferecer uma explicação endógena para o comportamento observado.” (Sterman 2000).

As estruturas recursivas mencionadas por Sterman, nada mais são, do que os ciclos recursivos apresentados na sessão 2.3.4, sua identificação deve ser antecedida pelo mapeamento das estruturas causais do sistema. O mapeamento das estruturas causais e a identificação dos ciclos recursivos não são tarefas simples o suficiente para serem realizadas mentalmente, para isso a DS oferece duas ferramentas gráficas que facilitam a execução das tarefas, o diagrama de Subsistemas e o diagrama de ciclos causais, ambos apresentados a seguir:

2.4.2.1 Diagrama de Estruturas de Decisões

O diagrama de Estruturas de Decisões identificará os Subsistemas, as variáveis exógenas e as variáveis de estoque do sistema em estudo, mostrando também como esses elementos estão conectados. A Figura 12 expõe um exemplo de um sistema urbano através do diagrama de Subsistemas:

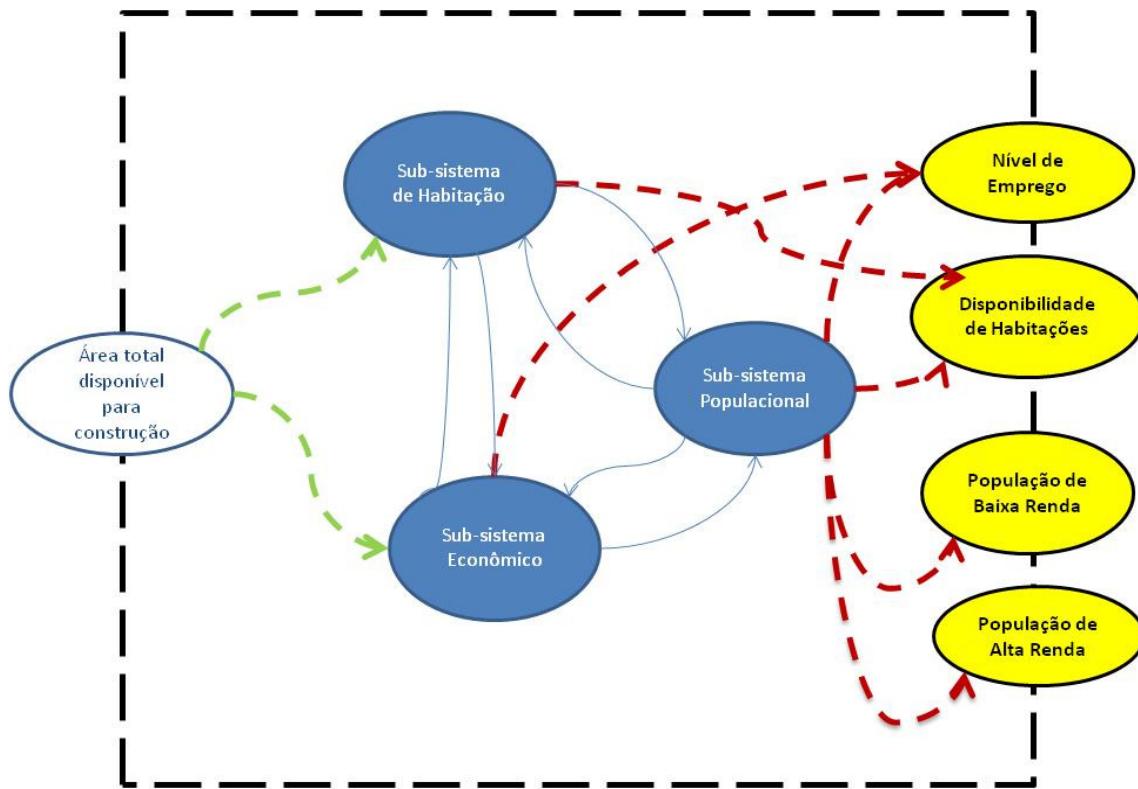


Figura 12: Diagrama de Subsistemas Aplicado a Sistema Urbano – Elaborado pelo autor

No diagrama de Subsistemas observa-se que a aresta esquerda do quadrado contém as variáveis exógenas ao sistema, o interior do quadrado contém, as variáveis de decisão, ou Subsistemas formados pelas variáveis endógenas do sistema e a aresta direita contém as variáveis de nível do sistema. As setas representam relações causais entre os elementos que serão detalhados pelo diagrama de ciclo causal.

A grande vantagem do diagrama de Subsistemas é que ele pode ser construído através das primeiras impressões obtidas sobre o sistema, seus elementos tem um caráter de fácil percepção visual e auxiliam a organizar as primeiras impressões obtidas sobre o sistema.

2.4.2.2 Diagrama de ciclo causal

O diagrama de ciclo causal representará o conjunto das estruturas causais pertencentes aos Subsistemas identificados pelo diagrama de Subsistemas. A Figura 13 expõe o diagrama de ciclo causal do Subsistema econômico do sistema urbano da Figura 12:

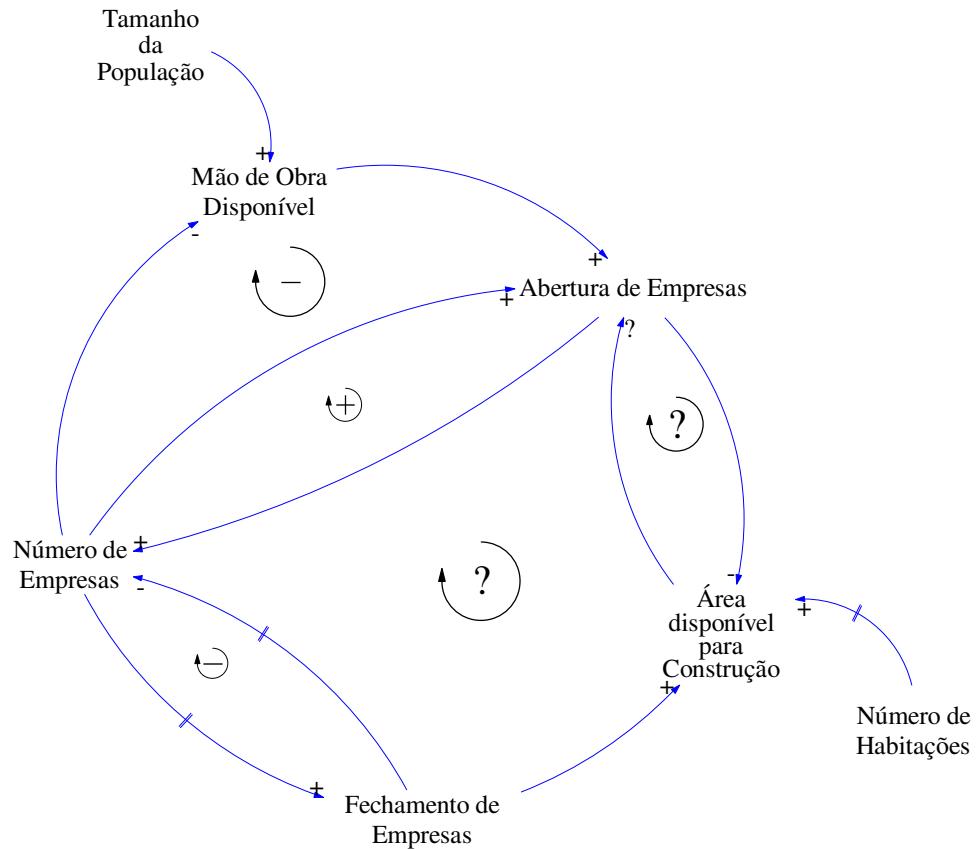


Figura 13: Diagrama de Ciclo Causal Aplicado ao Subsistema Econômico Urbano

Pode-se observar na Figura 13 que o diagrama de ciclo causal torna evidente todos os ciclos recursivos do Subsistema, além de conter as variáveis que conectam o Subsistema representado aos demais Subsistemas do sistema, sendo de grande auxílio para a compreensão qualitativa do sistema.

2.4.3 Especificação

A fase de especificação dará início ao estágio quantitativo do processo de modelagem, uma vez estruturados os ciclos recursivos é hora de determinar as variáveis de estoque, variáveis de fluxo, auxiliares e constantes para cada um dos ciclos identificados. A Figura 14 expõe a transição do diagrama de ciclo causal para o diagrama de estoque e fluxo aplicado ao Subsistema econômico urbano:

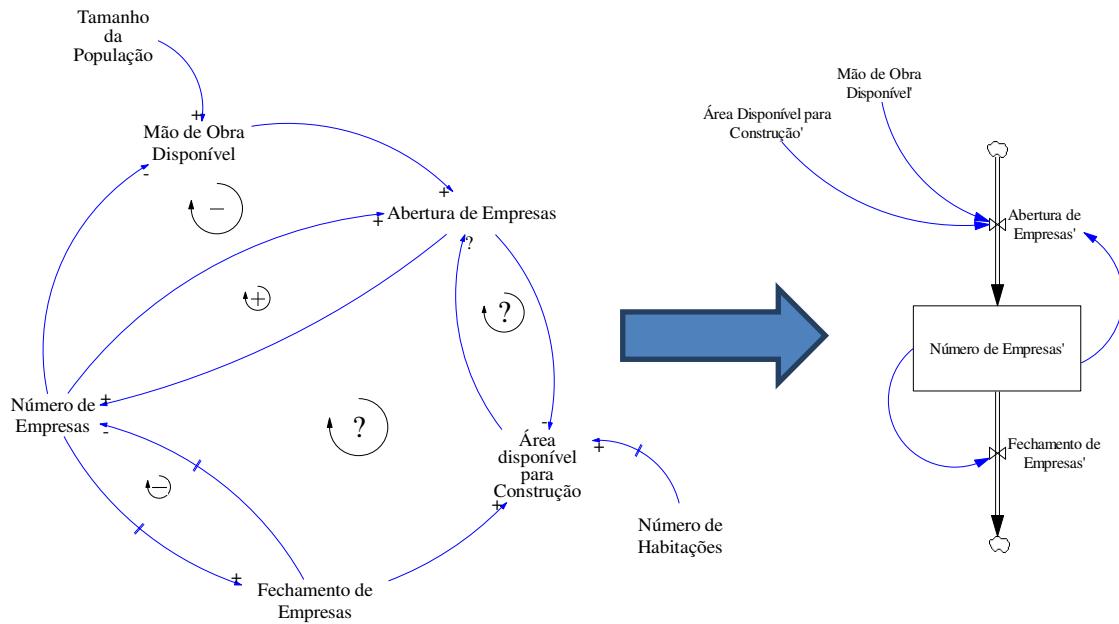


Figura 14: Especificação do Subsistema Econômico Urbano

Cada uma das variáveis de estoque do Subsistema definirá uma equação de balanço, como a exposta na Equação 1. A identificação dos elementos que definem a equação de balanço não é um processo fácil, as constantes são evidentes, pois constituem aspectos imutáveis sistema, já os fluxos representam a relação de controle do sistema e são mais difíceis de serem identificados. Ao longo da elaboração do modelo da Bonfio as equações de balanço serão descritas em detalhe, facilitando a compreensão do leitor.

2.4.4 Teste

Uma vez identificadas as equações de balanço do modelo, deve-se iniciar uma fase de testes com o intuito de se certificar de que o modelo está adequado aos objetivos do estudo e se adequa à conceptualização previamente realizada.

A fase de testes será realizada em dois estágios, inicialmente será realizada uma verificação das equações de balanço em conjunto com uma análise dimensional, para que qualquer erro de programação seja identificado.

Verificadas as equações de balanço, deve-se então dar início à validação da estrutura do modelo. Os dois métodos mais empregados na validação da estrutura do modelo, são a simulação em condições extremas e a simulação em condições reais.

O primeiro método consiste em submeter o sistema a condições extremas, em que seu comportamento possa ser deduzido por intuição. Um exemplo seria simular uma parada total do sistema, observando qual a reação das variáveis de estoque. O segundo método consiste

em simular o modelo nas condições próximas às do sistema real, verificando-se se o comportamento observado se assemelha ao comportamento histórico do sistema real.

A fase de tese é bastante útil para o programador se familiarizar com o sistema, não é raro que erros de modelagem ou até conceituais apareçam nessa fase, porém a identificação dos erros demonstra que cada vez mais o comportamento do sistema real está incorporado à intuição do programador, provocando um processo construtivo para a ampliação do conhecimento do programador sobre o sistema.

2.4.5 Uso do Modelo

A fase de uso do modelo seria o passo inicial para uma atividade de projeto do sistema em estudo, nessa fase o programador poderá alterar o modelo construído e usufruir da simulação quantitativa para visualizar quais os efeitos das alterações sobre o comportamento do sistema.

Dois tipos de alterações podem ser implementadas pelo programador, a primeira e mais simples é a alteração das constantes, que representam parâmetros do sistema real, e a segunda seria a alteração da estrutura do sistema real, que envolve as variáveis de estoque e fluxo.

Neste trabalho será realizado apenas o primeiro tipo de alteração no sistema real, o segundo tipo terá apenas algumas alterações sugeridas.

2.5 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Por ser objeto de estudo do trabalho, é importante que os sistemas de produção sejam adequadamente definidos e seus conceitos principais expostos.

No artigo “The Emerging Theory of Manufacturing” (HBR, 1990), Peter Drukcer se refere aos sistemas de produção como “um conjunto de processos integrados que transforma materiais em satisfações econômicas”, uma definição prática e precisa, porém não dispensa o detalhamento dos conceitos fundamentais desses sistemas.

Hopp e Spearman no livro *Factory Physics* (2001) propõem uma estrutura conceitual com o intuito de facilitar a análise dos sistemas de produção, para isso os autores definem uma série de conceitos de grande utilidade na interpretação da dinâmica dos sistemas de produção. A seguir serão definidos os conceitos empregados neste trabalho:

- *Taxa de Processamento (TH)*: É o volume de produção médio de um processo por uma unidade de tempo
- *Capacidade*: É a taxa de processamento máxima do processo

- *Work in Process* (WIP): É todo o volume de material entre o início e o fim de uma rota de processos
- *Tempo de Ciclo* (CT): É o tempo médio para uma ordem de produção percorrer uma rota de processos
- *Sistema empurrado*: É o sistema que, alimentado de dados exógenos, visa sincronizar o WIP com a demanda
- *Sistema puxado*: É o sistema que utiliza dados endógenos para a manutenção de um WIP constante
- *Make to Order* (MTO): É o sistema ativado por pedidos de clientes, o fabricante só inicia o processo de produção após receber o pedido do cliente
- *Make to Stock* (MTS): É o sistema ativado pela necessidade de reposição de estoques, os pedidos de clientes não possuem influência direta sobre as decisões de produção

2.6 APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Uma das primeiras aplicações dadas à DS ainda pelo Professor Forrester foi a modelagem de um sistema produção – distribuição, demonstrando fenômenos clássicos como o efeito chicote.

Apesar de os problemas de Engenharia de Produção terem feito parte da gênese da DS, a ferramenta atualmente está longe de ser um instrumento popular na solução de problemas de Engenharia de Produção. Este fenômeno é evidente quando se leva em consideração países como o Brasil, que não oferecem a disciplina nem na categoria de optativa.

Um dos motivos da impopularidade da DS no campo de conhecimento da Engenharia de Produção decorre da preferência dos administradores de sistemas de produção por soluções prontas. Metodologias que ensaiam soluções sem dar um tratamento detalhado ao problema são bastante populares no campo de engenharia de produção.

Entretanto o ambiente da indústria de transformação está tornando-se cada vez mais hostil exigindo sistemas de produção cada vez mais complexos, nesse contexto a DS floresce como um importante instrumento, não apenas de auxílio à compreensão dos novos sistemas de produção, mas como base para uma abordagem de projeto de sistemas de produção.

2.7 SOFTWARE UTILIZADO

Para a simulação numérica e construção gráfica do modelo foi utilizado o software *Vensim PLE*, produzido pela *Ventana Systems Inc.*. A *Ventana Systems* foi fundada por ex-orientandos do Professor Forrester no M.I.T., com o objetivo de desenvolver softwares de simulação de sistemas fechados. A versão *PLE (Personnel Learning Edition)* do software *Vensim* é disponibilizada gratuitamente na página da companhia (www.ventanasystems.com).

O *Vensim PLE* possui uma ótima interface gráfica facilitando bastante o processo de modelagem por DS, além de produzir simulações numéricas com alta versatilidade. A interface do *Vensim PLE* pode ser vista pela Figura 15:

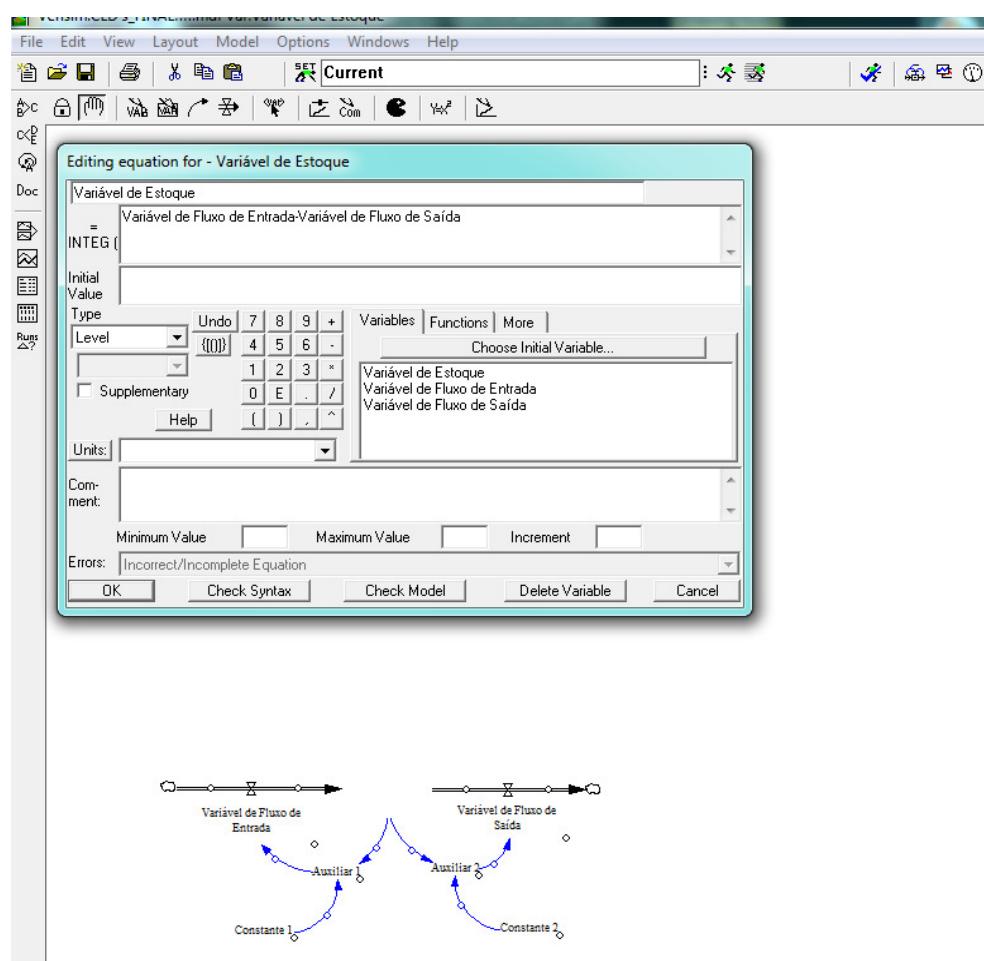


Figura 15: Interface Gráfica do Vensim PLE

O autor adquiriu conhecimento sobre o software através do curso de modelagem de sistemas contínuos, fornecido pela Delft University of Technology na Holanda, onde o autor passou um semestre em regime de intercâmbio autônomo.

3 DESENVOLVIMENTO

Exposta a estrutura teórica que sustentará o desenvolvimento do trabalho, pode-se dar início ao processo de modelagem por DS, parém antes de ser dado início ao processo de modelagem, é útil expor a forma como os dados utilizados no processo foram obtidos e fazer uma descrição mais detalhada do sistema de produção da conicalagem antes de ser dada procedênciia ao processo de modelagem.

3.1 COLETA DE DADOS

As fontes de dados utilizadas no desenvolvimento do trabalho foram o conhecimento dos colaboradores da conicalagem, obtido através de entrevistas, e as bases de dados da empresa.

O conhecimento dos colaboradores foi fundamental para o bom andamento do processo de modelagem, durante as entrevistas os colaboradores tornaram claras informações que não são explícitas apenas por análise de dados, como a relação entre variáveis, restrições operacionais, ou o propósito de certo procedimento. Tais informações são muito ricas para um modelo de DS, possuindo valor superior ao de bancos de dados numéricos.

Para efeitos do modelo desenvolvido no trabalho, pode-se ressaltar a colaboração do supervisor de produção, Sr. Eliel, da gerente de PCP da conicalagem, Sra. Érica, e do gerente da unidade de conicalagem, Sr. José Carlos, eles foram responsáveis pela maior parte das informações utilizadas para estruturar o modelo aqui desenvolvido.

As bases de dados da Bonfio não estão consolidadas em um único Banco de dados, apenas as informações essenciais para o gerenciamento da companhia são expostas no sistema de informação integrado, informações detalhadas como tempo de processamentos, agendamento de ordens de produção, alocação de operadores por máquinas, são armazenadas em planilhas separadas e desenvolvidas por advento de necessidade diversos colaboradores da Bonfio.

Para o modelo aqui desenvolvido ganharam maior relevância as planilhas desenvolvidas pelo supervisor de produção, contendo dados operacionais da conicalagem, e as planilhas desenvolvidas pela equipe de PCP da conicalagem, contendo dados detalhados de produção e demanda da conicalagem.

3.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA CONICALAGEM

Pode-se dividir o sistema de produção da conicalagem da Bonfio em duas estruturas, a estrutura técnica que irá desempenhar a transformação física dos produtos e a estrutura metodológica, que governará a estrutura técnica.

3.2.1 Processo de Transformação da Conicalagem

O Processo de transformação física da conicalagem ocorre em dois estágios, o primeiro estágio nas máquinas de conicalagem e o segundo estágio nas máquinas de embalagem.

A Bonfio possui sete máquinas de conicalagem, cada uma delas com múltiplos “fusos”, como pode ser visto pela Figura 16:



Figura 16: Máquinas de Conicalagem da Bonfio - Elaborado pelo Autor

Cada fuso pode ser interpretado como uma estação de produção independente, de forma que todos os fusos de uma mesma máquina podem ser programados para processar diferentes categorias de produtos concomitantemente, gerantindo grande flexibilidade ao processo de conicalagem.

Somando-se a quantidade de fusos das sete máquinas de conicalagem da Bonfio, chega-se ao valor total de 420 fusos o que indica que a fábrica é capaz de processar 420 tipos de produtos ao mesmo tempo. Essa situação, no entanto, nunca será observada na Bonfio e a justificativa para esse fato se encontra na natureza do processo.

O processo executado pelas máquinas se alimenta com os fios provenientes da tinturaria, as máquinas basicamente aplicarão um tratamento superficial aos fios e os enrolará no cone específico do produto final. Isso é feito através de um processo contínuo que desenrola os fios de grandes bobinas, transporta os fios através de um orifício tubular irrigado com uma resina específica e os enrola no cone determinado para o produto final.

Como visto o processo é contínuo e ocorre a velocidade constante, portanto a única maneira de elevar a velocidade de processamento de um mesmo produto é alocando-o em mais fusos, ou seja, destinando mais estações de trabalho para processá-lo.

Terminado o processamento nas máquinas de conicalagem, o lote de cones é transportado até as máquinas de embalagem, onde serão agrupados em uma quantidade específica e envolvidos por uma embalagem plástica. Ao término da embalagem do lote, os pacotes são guardados em caixas de papelão e seguem para o estoque de produto acabado, caso o produto do lote seja padronizado, ou para a expedição, caso o produto do lote seja customizado.

No caso dos produtos customizados, que seguem para o estoque de produtos acabados, eles serão coletados, a medida que chegam os pedidos de clientes, pela equipe de controle de estoque, que montará os pedidos recebidos e os enviará para a expedição.

O processo físico da conicalagem não possui grandes complicações técnicas como pode ser observado pela descrição, entretanto o mesmo não pode ser dito para o processo de controle da produção, que tomará decisões envolvendo 52 produtos distintos que compartilham os mesmos recursos produtivos como será mostrado na sequência.

3.2.2 Estrutura Metodológica

Como já mencionado, a estrutura metodológica deverá tomar as decisões de produção referentes aos 52 produtos da família da Bonfio e receberá a maior carga de complexidade.

A estrutura metodológica é operada pelo PCP da conicalagem e suas decisões definem basicamente:

- O que produzir? → Especificação do produto a ser produzido
- Quanto Produzir? → Dimensionamento do lote a ser produzido

- E (para) Quando Produzir? → Definição do início da produção e da velocidade de produção

Os critérios levados em conta para que as definições acima sejam delineadas dependem da natureza do pedido, se padronizado ou customizado.

Para o caso dos produtos customizados, o estímulo para a decisão de produção é dado pelo pedido do cliente. Recebido o pedido, o produto e o volume demandado já estão especificados, restando ao PCP definir o a data e início de processamento. Ambos os parâmetros serão definidos levando-se em consideração o prazo para entrega do pedido, que é definido pela diretoria comercial, e a ocupação das máquinas, que é resultante da combinação de decisões de produção tomadas pelo PCP. Os produtos customizados sempre possuem prioridade sobre os produtos padronizados, chegando, em casos extremos, a interromper a produção dos produtos padronizados.

Para o caso dos produtos padronizados, a decisão de produção é estimulada pelo estado do estoque de produto acabado e pela expectativa de demanda futura, que pode ser na definição de produção “empurrada” adotada por Hopp e Spearman.

A expectativa de demanda futura adotada pelo PCP é derivada da suavização exponencial da demanda histórica por produtos padronizados, a expectativa calculada é então utilizada para medir a cobertura do estoque de produto acabado sobre a demanda esperada, caso a cobertura do estoque seja inferior à cobertura desejada o PCP dispara uma ordem de produção.

O valor da cobertura desejada é ajustado empiricamente, condicionado ao objetivo de entregar os pedidos em um prazo máximo de dois dias, o PCP levará em conta as oscilações da estrutura de produção e a velocidade de processamento de produtos padronizados, regulando a cobertura de estoque desejada.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Na sessão 1.4 foi estabelecido o objetivo do trabalho e a DS foi apresentada como uma ferramenta cujos recursos são adequados para atingi-lo, agora serão esclarecidas quais as demandas que a DS deve preencher para atingir aos objetivos traçados para o trabalho. Para isso separa isso será definido o problema a ser representado pelo modelo seguindo-se os passos sugeridos na sessão 2.4.1

- i. Quais os donos do problema?

De acordo com as regras organizacionais da Bonfio, os colaboradores da unidade de conicalagem, em especial seu gerente, se responsabilizarão pelo desempenho produtivo da unidade perante a presidência executiva, dessa forma pode-se colocá-los como os “donos” dos problemas apresentados pelo sistema de produção.

ii. Qual a questão que mais preocupa os donos do problema?

A questão que mais gera preocupação aos colaboradores da conicalagem é a cobrança que sofrerão por parte da presidência executiva sobre o desempenho de seu sistema de produção.

iii. Qual a questão que os donos do problema estão tentando solucionar?

Os colaboradores da conicalagem estão tentando conter os efeitos colaterais das políticas comerciais estabelecidas pela diretoria comercial, que, segundo a visão dos colaboradores, vêm contribuindo para a baixa performance operacional do seu sistema de produção.

iv. Qual o problema real por traz dos sintomas observados?

É consenso dentre os colaboradores da empresa e de crensa do autor que o problema real por tráz dos sintomas de baixa performance operacional da conicalagem é a incompatibilidade da estrutura operacional com a rígida política comercial imposta pela diretoria comercial da Bonfio.

v. Qual o propósito do modelo?

Coloca-se então o propósito do modelo como sendo o **mapeamento dos efeitos da política comercial da Bonfio sobre o desempenho do sistema de produção da conicalagem**.

3.4 CONCEPTUALIZAÇÃO

Defidido o problema a ser representado pelo modelo de DS, pode ser dado início à fase de conceptualização do modelo, para fins didáticos, o autor restringiu a etapa de concetualização à definição da estrutura do sistema, exposição das hipóteses simplificatórias, identificação dos principais Subsistemas e definição do horizonte temporal. Uma análise detalhada das estruturas causais do sistema e a inferência da hipótese dinâmica serão feitos em conjunto com a fase de especificação.

3.4.1 Estrutura do Sistema

A ferramentagráfica mais adequada para se obter uma visão ampla sobre a estrutura do modelo é o diagrama de estruturas de decisões, na sua construção devem ser especificadas: as principais estruturas recursivas do modelo, as variáveis exógenas que influenciarão o sistema representado e as principais variáveis de estoque que irão expor o comportamento do sistema modelado. Para a compreensão de como os parâmetros do diagrama foram definidos é útil rever a descrição detalhada do sistema de produção da conicalagem, feita na sessão 3.2.

A Figura 17 expõe o diagrama de estruturas de decisões elaborado, o diagrama expõe em sua aresta direita as variáveis exógenas do sistema, em seu interior as estruturas de decisão do sistema e em sua aresta direita as variáveis de estoque do sistema. A descrição de cada um dos elementos do diagrama e as simplificações adotadas pelo autor serão feitas a seguir.

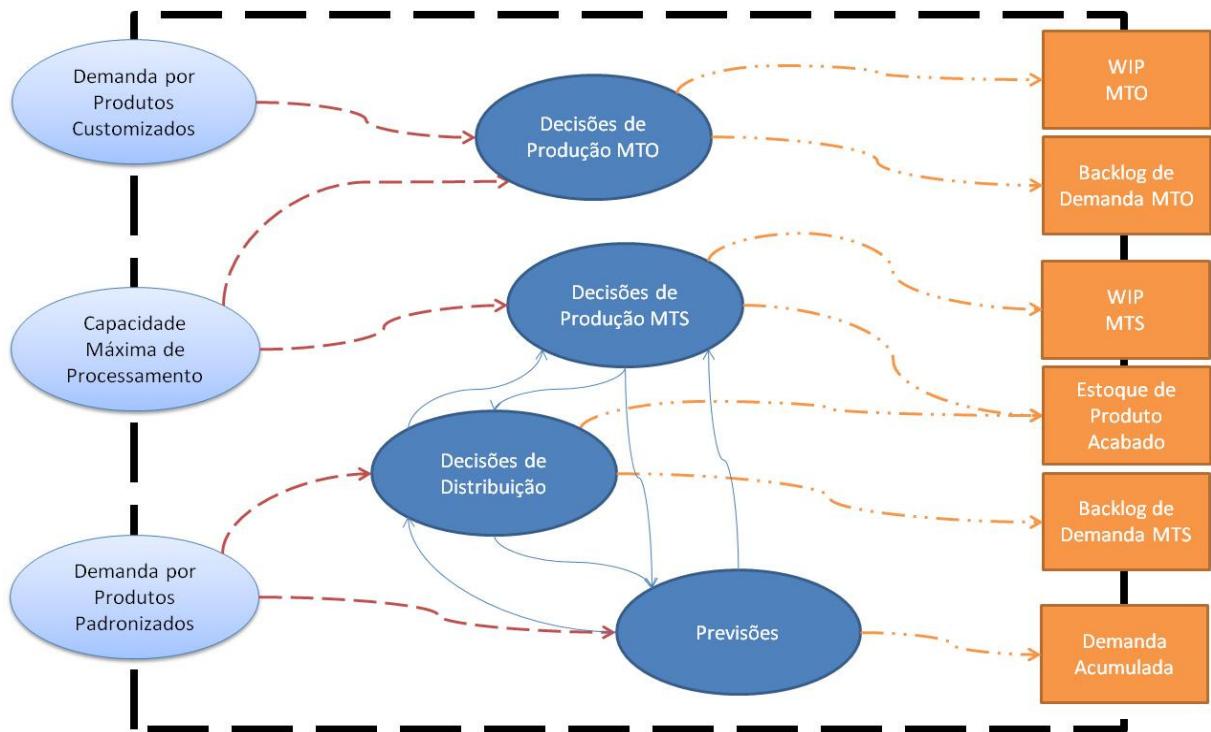


Figura 17: Diagrama de Estruturas de Decisões

3.4.1.1 Variáveis Exógenas

As primeiras variáveis a serem identificadas são as variáveis exógenas, sua identificação definirá as fronteiras do sistema segundo o propósito traçado para o modelo. São elas:

- *Demand por produtos customizados*: Representa os pedidos de clientes por produtos customizados

- *Demanda por produtos padronizados:* Representa os pedidos de clientes por produtos padronizados
- *Capacidade máxima de processamento:* Representa a taxa de processamento máxima do gargalo da unidade de conicalagem, as máquinas de conicalagem. Tal valor pode ser interpretado como a capacidade de produção de todos os fusos das máquinas de conicalagem

Das variáveis exógenas definidas pode-se listar as seguintes hipóteses simplificatórias assumidas pelo autor:

- *O sistema não influenciará o mercado:* Caso o modelo fosse parte de um estudo de Marketing, essa hipótese seria extremamente prejudicial aos resultados, porém para representar a interação entre a política comercial e a estrutura de produção, a interção do sistema de produção com o mercado pode ser simplificada.
- *Produtos assumirão apenas duas classificações:* Como colocado na sessão 1.3.3, a família de produtos da Bonfio contém 52 tipos de produtos, porém, sob o ponto de vista do modelo, a família de produtos da Bonfio será dividida em produtos customizados e produtos padronizados.
- *Capacidade não pode ser alterada pelo sistema:* Será assumido que o sistema de produção não é capaz de ajustar sua capacidade.
- *Disposição ilimitada de matéria prima:* O modelo assumirá a oferta de matéria prima é ilimitada, portanto efeitos da escacez de matéria prima serão desconsiderados.

3.4.1.2 Variáveis de Estoque

As variáveis de estoque exibem o estado do sistema e são influenciadas pelas estruturas de decisão e variáveis exógenas. Para o modleo foram definidas as seguintes variáveis:

- *WIP MTO:* Representa o volume de produtos customizados em processamento pelo sistema MTO, serão alteradas pelas decisões de produção MTO
- *Backlog de Demanda MTO:* Representa o volume de pedidos de produtos customizados que aguardam a entrega, também alterada pelas decisões de produção MTO pois o ciclo de produção MTO contém a etapa de expedição

- *WIP MTS*: Representa o volume de produtos padronizados em processamento pelo sistema MTS, será alterada pelas decisões de produção MTS
- *Estoque de Produto Acabado*: Representa o volume de produtos padronizados disponíveis para a entrega, será alterado pelas decisões de produção MTS e pelas decisões de distribuição
- *Backlog de Demanda MTS*: Representa o volume de pedidos de produtos customizados que aguardam a entrega, será alterado pelas decisões de distribuição
- *Demandas Acumuladas*: Representa a acumulação de dados referentes à demanda por produtos padronizados em certo intervalo de tempo, será manipulada pela estrutura de previsões

Podem-se listar as seguintes hipóteses simplificatórias decorrentes da definição das variáveis de nível:

- *Desacoplamento do fluxo físico de produtos padronizados e customizados*: Em linha com a separação das estruturas de decisão, o fluxo físico dos produtos padronizados e customizados também foi separado através da definição de duas variáveis de WIP e Backlog

3.4.1.3 Estruturas de Decisão

As estruturas de decisão serão compostas pelos mecanismos de intervenção do PCP sobre a produção, Tais estruturas podem ser agrupadas seguindo-se a definição de Subsistemas dada no item **Error! Reference source not found.**. Foram definidos três agrupamentos independentes para os mecanismos de decisão do PCP, são eles:

- *Decisões de produção MTO*: Processa informações provenientes da demanda por produtos customizados e da capacidade de processamento convertendo-as em ordens de produção
- *Decisões de produção MTS*: Processa informações provenientes da capacidade de processamento, nível de estoque e das previsões de demanda, convertendo-as em ordens de produção
- *Decisões de distribuição MTS*: Monitora o estado dos pedidos não atendidos tomando as decisões de expedição de pedidos
- *Previsões*: Processam informações do mercado produzindo as expectativas futuras fornecidas para as *decisões de produção MTS*

Das estruturas de decisão definidas pode-se listar as seguintes hipóteses simplificatórias adotadas pelo autor:

- *Independência do sistema MTO:* As decisões de produção MTO não interagem com as demais estruturas de produção, agindo com total independência em relação às demais. Essa hipótese está em linha com a prática operacional da Bonfio, que A sustentação dessa hipótese está no fato de a demanda MTO ser de natureza distinta da demanda MTS
- *Vínculo entre os sistemas MTO e MTS:* O vínculo entre os sistemas MTO e MTS ocorre através da capacidade máxima de processamento, uma variável exógena, isso se deve ao fato de ambos os sistemas compartilharem os mesmos recursos de produção. Por o sistema MTO ter prioridade em relação ao sistema MTS, o primeiro terá preferência na alocação de recursos, podendo limitar a produção do segundo

3.4.1.4 Subsistemas Identificados

O agrupamento das estruturas de decisão já indicam os Subsistemas definidos para o sistema da Bonfio, é interessante prover uma clara definição de cada um dos Subsistemas, pois eles serão muito utilizados nas próximas fases.

- *Subsistema de Produção MTO (também Subsistema MTO):* Encarrega-se da produção e distribuição dos produtos customizados.
- *Subsistema MTS:* Se encarrega da produção, controle de estoques e distribuição dos produtos padronizados, é subdividido em outros três Subsistemas definidos a seguir.
- *Subsistema de Produção MTS:* Encarregado de produzir produtos padronizados para atender à demanda MTS.
- *Subsistema de Distribuição MTS:* Encarregado de atender aos pedidos em aberto de clientes, distribuindo os produtos em estoque.
- *Subsistema de Previsão:* Se encarrega de formular as expectativas da empresa quanto ao futuro da demanda MTS.

3.4.2 Horizonte Temporal e Hipótese de Continuidade

A conicalagem da Bonfio opera com um sistema de produção por lotes, sistema com um caráter altamente discreto, no entanto, o fato de a empresa possuir uma ampla família de

produtos com processo de transformação semelhante, dá um caráter contínuo ao sistema de produção quando visto de maneira agregada. Como a família de produtos é vista de maneira agregada pelo modelo, será considerado que as estruturas de decisão agirão continuamente sobre o sistema.

O termo contínuo no caso da Bonfio pode ser interpretado como diário, as decisões de produção são tomadas diariamente na empresa, fazendo do dia a unidade temporal mais adequada para o modelo. Como horizonte temporal, um intervalo de 360 dias, ou um ano, mostra-se mais do que suficiente para que o sistema manifeste os efeitos da política comercial, um intervalo menor já seria satisfatório, mas ao considerar-se a possível sazonalidade da demanda por produtos padronizados o prazo de uma ano se mostra mais adequado.

3.5 ANÁLISE E ESPECIFICAÇÃO DOS SUBSISTEMAS

Com a estrutura geral do sistema definida, pode-se iniciar uma análise mais detalhada dos Subsistemas formados por seus elementos estruturais, tal análise adicionará as variáveis auxiliares e constantes associadas a cada uma das estruturas de decisão e a especificação das expressões matemáticas associadas às variáveis de controle. Em paralelo com a definição quantitativa das estruturas de decisão será utilizado o recurso dos círculos causais para se inferir o comportamento dinâmico dos Subsistemas.

3.5.1 Subsistema de produção MTS

O Subsistema de produção MTS tem como função o controle e a produção de produtos padronizados com a meta de satisfazer a demanda esperada. Sua estrutura contém as *decisões de produção MTS* e as variáveis de estoque *MTS WIP* e *MTS EPA*, e irá interagir com a variável exógena *Capacidade Máxima de Processamento*, a estrutura de previsão e as decisões de distribuição, variáveis que, sob o ponto de vista do Subsistema de produção MTS, podem ser interpretadas como exógenas.

3.5.1.1 Estrutura de Produção

A Figura 19 exibe o diagrama fluxo e estoque da estrutura que desempenha a função de produção do Subsistema:

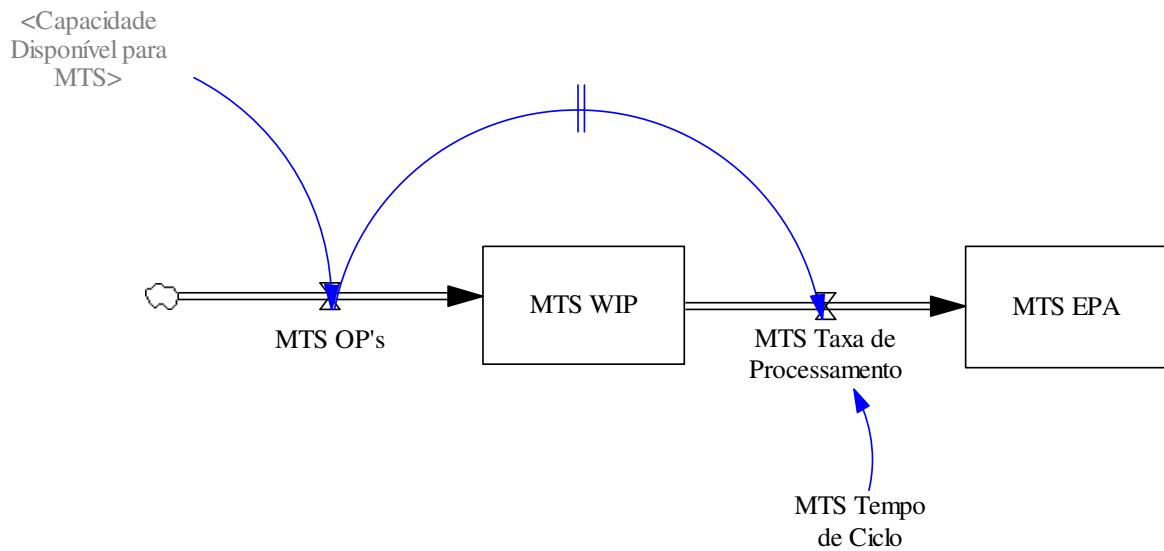


Figura 18: Diagrama de Fluxo e Estoque da Estrutura de Produção MTS

A variável de fluxo *MTS OP's* marca o início do processo de produção, representando as ordens de produção disparadas. A definição do fluxo *MTS OP's* é feita pela estrutura de controle e será definida mais adiante.

Para representar o processo de manufatura foi utilizado um atraso de terceira ordem, os atrasos de terceira ordem consistem em uma boa representação de processos em cadeia sendo usualmente empregados em processos de fabricação.

A estrutura de atraso determinará a taxa de processamento do sistema, representada pela variável *MTS Taxa de Processamento*, utilizando como parâmetro o tempo de ciclo do processo, representado pela constante *MTS Tempo de Ciclo*.

Durante o período de atraso o material em processamento será acumulado na variável de estoque *MTS WIP*, que será definida pela Equação 2:

$$MTS\ WIP = MTS\ WIP\ 0 + \int_{t_0}^t (MTS\ OP's - MTS\ Taxa\ de\ Processamento) dt$$

Equação 2: Variável de Estoque MTS WIP

Onde:

$$MTS\ Taxa\ de\ Processamento = ATRASO3(MTS\ OP's, MTS\ Tempo\ de\ Ciclo)$$

Equação 3: MTS Taxa de Processamento

O efeito do atraso de terceira ordem sobre a taxa de processamento seguirá o perfil exposito no Gráfico 2, poderá ser observada a acumulação da taxa de processamento ao redor do tempo de ciclo com um decaimento suave a medida que se afasta do tempo de ciclo.

Vale observar o diagrama causal da estrutura de produção exibido pela Figura 19, para facilitar a compreensão do leitor foram destacadas as variáveis exógenas, na cor cinza, as variáveis de fluxo, abaixo das ampolas, as variáveis de estoque, no interior dos retângulos, variáveis auxiliares em pretos e constantes em verde:

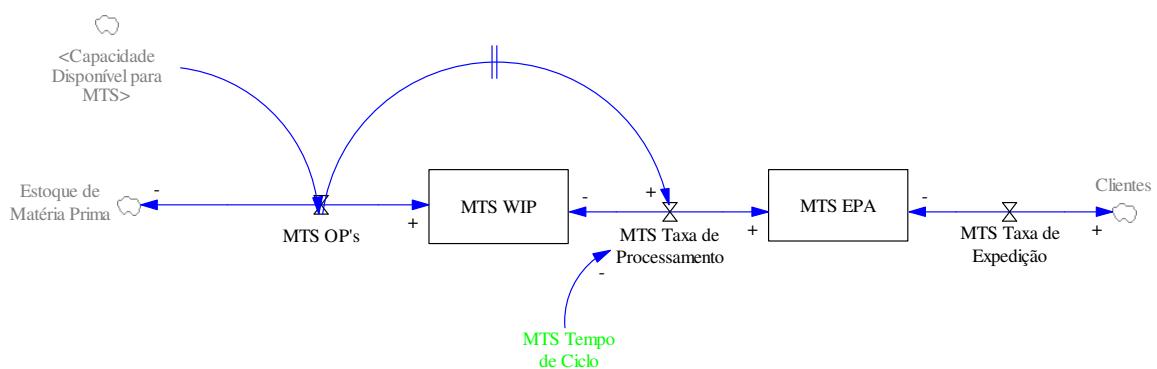


Figura 19: Estrutura de produção do Subsistema de produção MTS

Observa-se que as estruturas causais entre *MTS OP's* e o estoque de produto acabado, representado pela variável *MTS EPA*, são todas de polaridade positiva, indicando que qualquer oscilação nas ordens de produção provocará uma oscilação de mesma natureza no estoque de produto acabado, o que é intuitivo.

3.5.1.2 Estrutura de Controle

A estrutura de controle determinará as ordens de produção necessárias para que a taxa de processamento seja suficiente para garantir o atendimento da demanda esperada, característica típica de um sistema de produção empurrado, como o caracterizado por Hopp e Spearman (2001).

O PCP da conicalagem utiliza o sistema de ponto de pedido para a reposição de estoques, porém o método é aplicado continuamente devido à grande família de produtos, fato que suavisa o caráter discreto do sistema em níveis agragados.

Como já mencionado, o modelo assumirá que o sistema tem comportamento contínuo tomando decisões de produção diariamente, sob o ponto de vista de controle da produção esse sistema estaria próximo de sistema de revisão periódica com período de um dia, se ajustando continuamente. Outra observação importante é que as decisões tomadas dizem respeito à taxas, não a volumes, a estrutura de controle é capaz de alterar apenas as taxas de produção, portanto mesmo que a referência de decisão esteja em volumes, estes devem ser convertidos em taxas.

A estrutura de controle do modelo é exibida pelo diagrama de estoque na Figura 20:

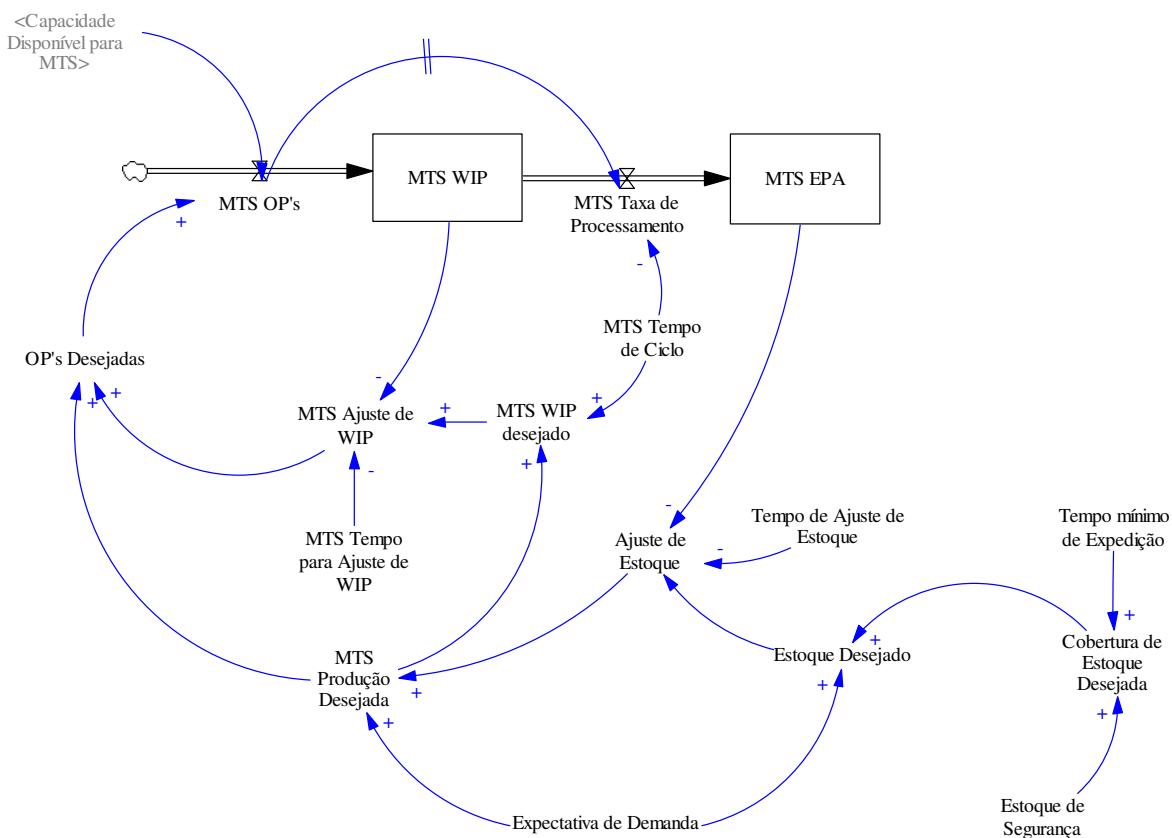


Figura 20: Diagrama de Estoques e Fluxo da Estrutura de Controle de Produção MTS

Como mencionado, a estrutura de controle buscará transformar o estado do sistema de modo a atingir as metas desejadas, vamos analisar como isso é feito pela estrutura exposta no diagrama da Figura 20.

A primeira meta a ser analisada é a variável *Estoque Desejado*, ela representa o volume estoque necessário para garantir a *Cobertura de Estoque Desejada* frente à *Expectativa de Demanda* calculada pelo Subsistema de previsões, como exposto pela Equação 4:

$$\text{Estoque Desejado} = \text{Cobertura de Estoque Desejada} \times \text{Expectativa de Demanda}$$

Equação 4: Estoque Desejado

A Cobertura de Estoque Desejada tem como propósito o amortecimento de choques de demanda e é composta por dois componentes, o tempo mínimo necessário para o Subsistema de distribuição expedir um pedido e o estoque de segurança fixado pelo PCP, como exibido pela Equação 5:

$$\text{Cobertura de Estoque Desejada} = \text{Tempo Mínimo de Expedição} + \text{Estoque de Segurança}$$

Equação 5: Cobertura de Estoque Desejada

O *Estoque Desejado* servirá como meta para o estado do nível de estoque presente da empresa, representado pela variável *MTS EPA*, mas a estrutura de controle só é capaz de alterar as variáveis de estoque através da alteração das variáveis de fluxo, portanto o ajuste do estado em direção à meta deve ser expresso por uma taxa, como feito na Equação 6:

$$\text{Ajuste de Estoque} = \frac{(\text{Estoque Desejado} - \text{MTS EPA})}{\text{Tempo de Ajuste de Estoque}}$$

Equação 6: Ajuste de Estoque

O ajuste de estoque poderá assumir tanto valores positivos quanto negativos, isso dependerá se o nível presente de EPA estará acima ou abaixo do nível desejado.

A meta de produção, representada pela variável *Produção Desejada*, será constituída pela reposição de estoque necessária acrescida da demanda futura prevista. Como o ajuste de estoques pode assumir valores negativos, utiliza-se a função *MAX* para capturar apenas os valores positivos da Produção Desejada, tendo em vista que o processo de produção é um processo irreversível. Tal relação é exposta pela Equação 7:

$$\text{Produção Desejada} = \text{MAX}(\text{Expectativa de Demanda} + \text{Ajuste de Estoque}; 0)$$

Equação 7: MTS Produção Desejada

Para se garantir que a taxa de processamento seja mantida no nível desejado, é necessário corrigir o volume de WIP presente do Subsistema. O volume desejado de WIP é expresso pela Equação 8:

$$MTS\ WIP\ Desejado = MTS\ Produção\ Desejada \times MTS\ Tempo\ de\ Ciclo$$

Equação 8: MTS WIP Desejado

A meta de WIP é então comparada com seu nível presente, sendo a diferença convertida em uma taxa através do tempo para correção do WIP, como na Equação 9:

$$MTS\ Ajuste\ de\ WIP = \frac{(MTS\ WIP\ Desejado - MTS\ WIP)}{Tempo\ de\ Ajuste\ para\ Ajuste\ de\ WIP}$$

Equação 9: Ajuste de WIP

As ordens disparadas para a produção serão contituídas pelo acréscimo da produção desejada com o ajuste de WIP necessário:

$$OP's\ Desejadas = MTS\ Produção\ Desejada + MTS\ Ajuste\ de\ WIP$$

Equação 10: MTS OP's Desejadas

Respeitando a regra de priorização do processamento de pedidos MTO, as ordens de produção efetivas serão restrinvidas pela capacidade remanecente do Subsistema MTO, como exibido pela Equação 11:

$$MTS\ OP's = MIN(Capacidade\ Disponível\ para\ MTS; OP's\ Desejadas)$$

Equação 11: MTS OP's Disparadas

Tal estrutura forma o vínculo entre os dois Subsistemas.

3.5.1.3 Análise Qualitativa do Subsistema

O Subsistema de Produção MTS possui dois importantes ciclos recursivos, como pode-se observar pelo diagrama causal na Figura 21:

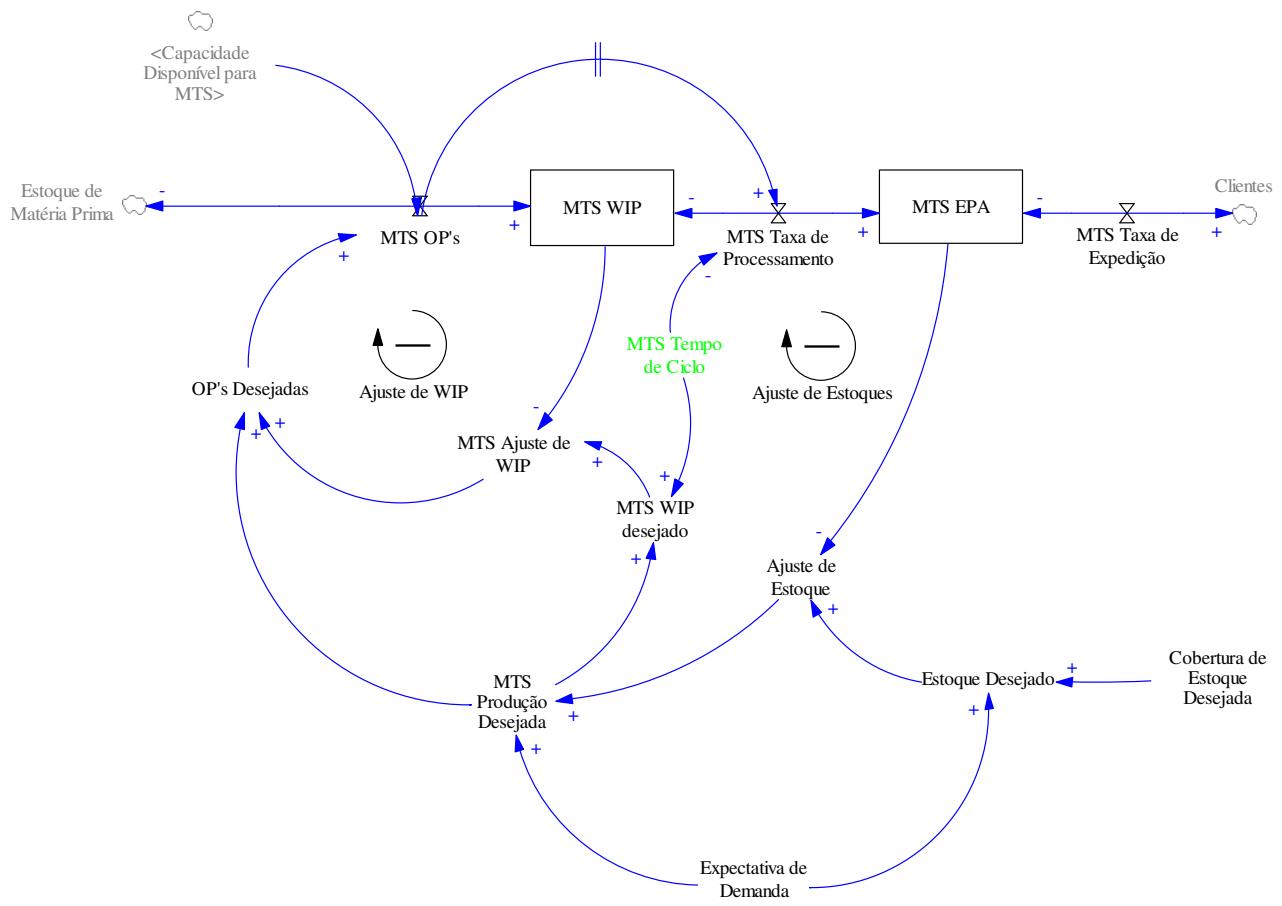


Figura 21: Diagrama de Ciclo Causal - Decisões de Produção MTS

O ciclo mais externo é responsável pela manutenção dos estoques segundo uma meta desejada, como expresso pelo diagrama causal na Figura 22:

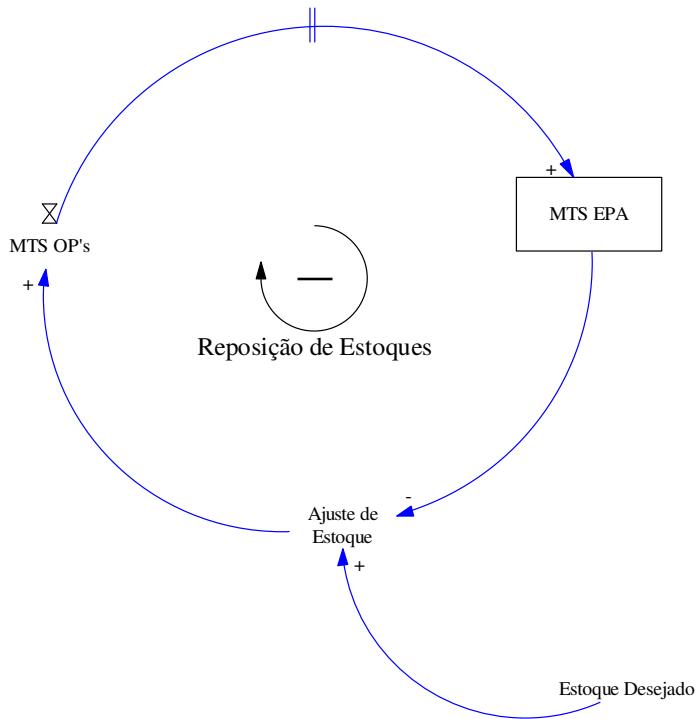


Figura 22: Ciclo Recursivo de Reposição de Estoques

O ciclo recursivo negativo com atraso, como o ciclo recursivo negativo, perseguirá a meta estipulada pela estrutura de controle, entretanto ele usará como referência para a decisão presente um estado passado do sistema. Tal estrutura pode manifestar dois comportamentos, caso o tratamento aos dados passados do sistema seja adequado, o sistema manifestará um comportamento de oscilação com amplitude decrescente, convergindo para a meta, caso o tratamento dos dados do passado não seja adequado, as intervenções no estado presente podem afastar sucessivamente o comportamento da meta, jogando o sistema em ressonância.

No caso da reposição de estoques pode-se considerar que o tratamento dos dados passados é adequado, portanto a expectativa é que o sistema oscile convergindo para a meta de reposição.

O segundo ciclo é o ciclo de ajuste de WIP, também de polaridade negativa, porém sem a estrutura do atraso. Ele apresentará um comportamento mais simples que o ciclo de reposição desempenhado apenas o papel de busca pelo volume de WIP desejado. Sua estrutura é exibida pela Figura 23:

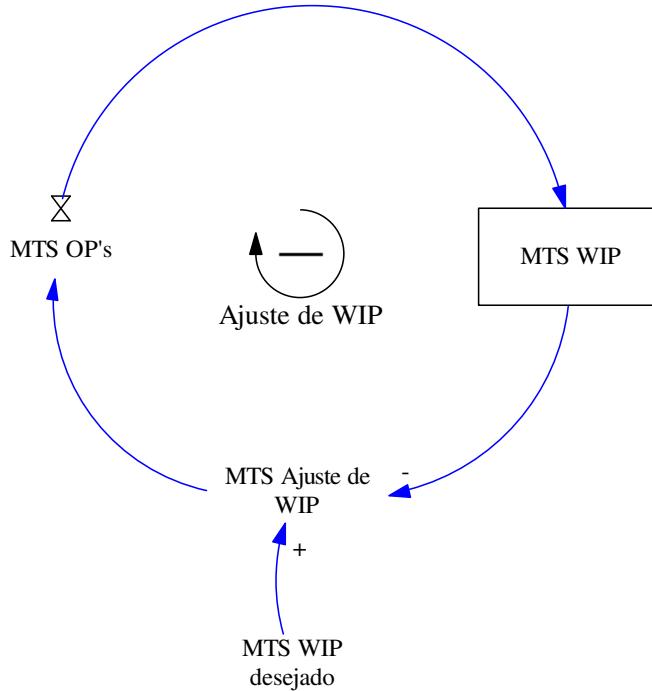


Figura 23: Ciclo Recursivo de Correção de WIP MTS

3.5.1.4 Resumo das Variáveis e Constantes do Subsistema de Produção MTS

Variável	Expressão	Unidade
MTS WIP	$MTS WIP 0 + \int_{t_0}^t (MTS OP's - MTS Taxa de Processamento) dt$	kg
MTS Taxa de Processamento	$ATRASO3(MTS OP's, MTS Tempo de Ciclo)$	kg/dia
Estoque Desejado	Cobertura de Estoque Desejada \times Expectativa de Demanda	dia
Cobertura de Estoque Desejada	Tempo Mínimo de Expedição + Estoque de Segurança	dia
Ajuste de Estoque	$\frac{(Estoque Desejado - MTS EPA)}{Tempo de Ajuste de Estoque}$	kg/dia
Produção Desejada	$MAX(Expectativa de Demanda + Ajuste de Estoque; 0)$	kg/dia
MTS WIP Desejado	$MTS Produção Desejada \times MTS Tempo de Ciclo$	kg
MTS Ajuste de WIP	$\frac{(MTS WIP Desejado - MTS WIP)}{Tempo de Ajuste para Ajuste de WIP}$	kg/dia
OP's Desejadas	$MTS Produção Desejada + MTS Ajuste de WIP$	kg/dia
MTS OP's	$MIN(Capacidade Disponível para MTS; OP's Desejadas)$	kg/dia

Tabela 3: Resumo das Variáveis do Subsistema de Produção MTS

3.5.2 Subsistema de Distribuição

O Subsistema de distribuição é encarregado de enviar os produtos ao cliente final e gerenciar a carteira de pedidos da Bonfio, as duas funções são desempenhadas por estruturas distintas, mas fortemente interligadas como será descrito a seguir.

3.5.2.1 Estrutura de Distribuição de Produtos

A estrutura de distribuição de produtos comporta e gerencia o fluxo físico de produtos até o cliente final, sua estrutura é representada pelo diagrama de estoque e fluxo na Figura 24:

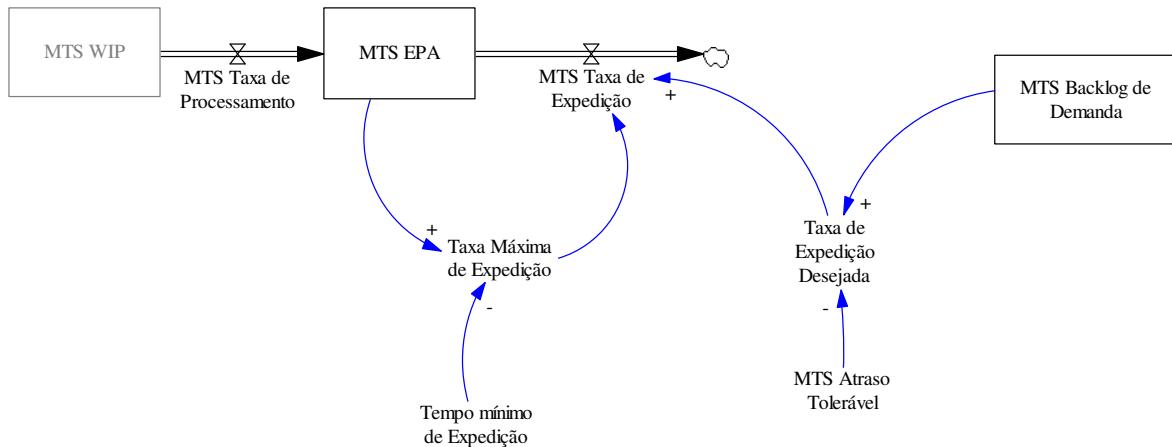


Figura 24: Diagrama de Estoque e Fluxo da Estrutura de Distribuição de Produtos

Nota-se que a principal variável de estoque da estrutura é o estoque de produto acabado, representado pela variável *MTS EPA*. O estoque recebe produtos acabados da produção através da variável *MTS Taxa de Processamento*, enviando-os ao cliente final através da variável *MTS Taxa de Expedição*, constituindo a expressão matemática exibida pela Equação 12:

$$MTS\ EPA = MTS\ EPA\ 0 + \int_{t_0}^t (MTS\ Taxa\ de\ Processamento - MTS\ Taxa\ de\ Expedição) dt$$

Equação 12: Variável de Estoque MTS EPA

A variável de fluxo *MTS Taxa de Processamento* é determinada no Subsistema de produção MTS e pode ser considerada como exógena sob o ponto de vista do Subsistema de distribuição, já a taxa de expedição é determinada pelos elementos de controle da estrutura de distribuição de produtos, segundo a Equação 13:

$$MTS\ Taxa\ de\ Expedição = MIN(Taxa\ Máxima\ de\ Expedição, Taxa\ de\ Expedição\ Desejada)$$

Equação 13: MTS Taxa de Expedição

A *Taxa de Expedição Desejada* é a meta da estrutura de distribuição e é fixada de modo a garantir o prazo de entrega prometido ao cliente, resultando na Equação 14:

$$Taxa\ de\ Expedição\ Desejada = \frac{(MTS\ Backlog\ de\ Demanda\ MTS)}{Tempo\ Mínimo\ de\ Expedição}$$

Equação 14: Taxa de Expedição Desejada

A *Taxa Máxima de Expedição* é determinada pelo volume de estoque de produto acabado e o tempo levado pela equipe de expedição para manipular e expedir os pedidos dos clientes, resultando na Equação 15:

$$\text{Taxa Máxima de Expedição} = \frac{\text{MTS EPA}}{\text{MTS Atraso Tolerável}}$$

Equação 15: Taxa de Máxima de Expedição

É válido observar que a estrutura de expedição carrega uma fraca hipótese simplificatória, a bonfio trabalha com um número substancial de SKU's em seu estoque de produto acabado, a construção da taxa de expedição considera que a empresa só sofrera restrições para entrega caso não possua estoque físico, entretanto, no caso de múltiplos SKU's, apesar de a empresa possuir estoque físico, ela pode ter a expedição de um pedido restrita devido à falta de um SKU específico.

3.5.2.2 Estrutura de Controle da Carteira de Pedidos MTS

A estrutura de controle da carteira de pedidos acomoda e gerencia o fluxo de informações referentes aos pedidos em aberto do Subsistema MTS. A formação da carteira de pedidos decorre do prazo de entrega fixado pela diretoria comercial da Bonfio, durante este período ocorre a acumulação de pedidos em aberto, informação utilizada para se determinar a taxa de entrega da estrutura de expedição.

A Figura 25 exibe o diagrama de estoque e fluxo da estrutura de controle da carteira de pedidos:

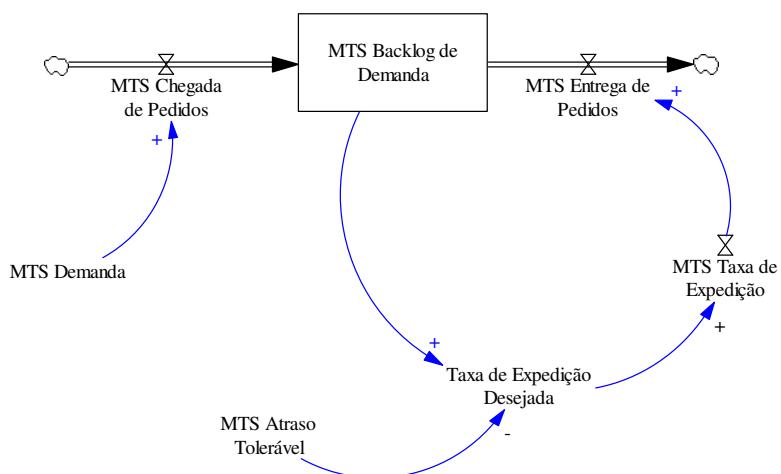


Figura 25: Estrutura de Controle da Carteira de Pedidos MTS

A principal variável de estoque da estrutura é a própria carteira de pedidos, representada pela variável *MTS Backlog de Demanda*. A variável é alimentada pela avriável

de fluxo *MTS Chegada de Pedidos* e exaurida pela variável *MTS Entrega de Pedidos*, como exibido pela Equação 16:

$$MTS\ Backlog\ de\ Demanda = MTS\ Backlog\ de\ Demanda\ 0 + \int_{t_0}^t (MTS\ Chegada\ de\ Pedidos - MTS\ Entrega\ de\ Pedidos) dt$$

Equação 16: Variável de Estoque MTS Backlog de Demanda

A variável de fluxo *MTS Chegada de Pedidos* replica a demanda do Subsistema MTS, representada pela variável exógena *MTS Demanda*, como exibido na Equação 17:

$$MTS\ Chegada\ de\ Pedidos = MTS\ Demanda$$

Equação 17: Variável de Fluxo MTS Chegada de Pedidos

A variável de fluxo *MTS Entrega de Pedidos* replica a taxa de expedição de produtos, representada pela variável de fluxo *MTS Taxa de Expedição*, como exibido pela Equação 18:

$$MTS\ Entrega\ de\ Pedidos = MTS\ Taxa\ de\ Expedição$$

Equação 18: Variável de Fluxo MTS Entrega de Pedidos

Percebe-se que ambas as variáveis de fluxo são réplicas de variáveis do sistema, isso ocorre, pois a tanto a taxa de expedição quanto a demanda representam fluxos físicos que, ao replicados, têm seus valores convertidos em um fluxo de informação.

3.5.2.3 Análise Qualitativa do Subsistema

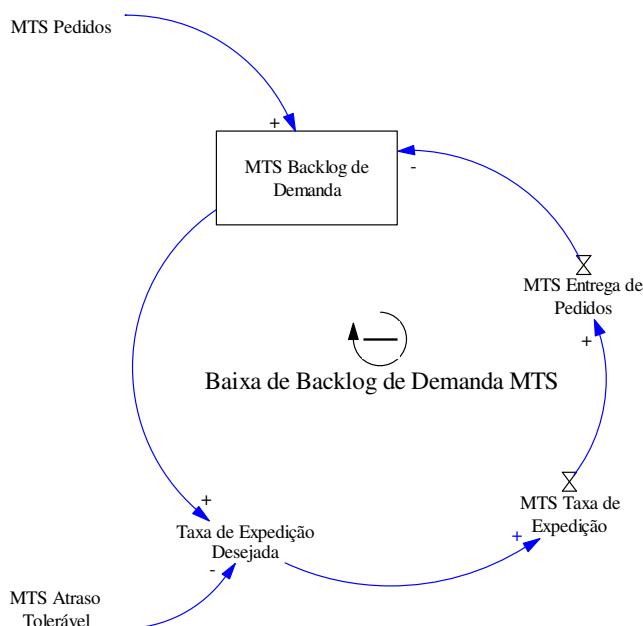


Figura 26: Ciclo Recursivo de Baixa de Backlog MTS

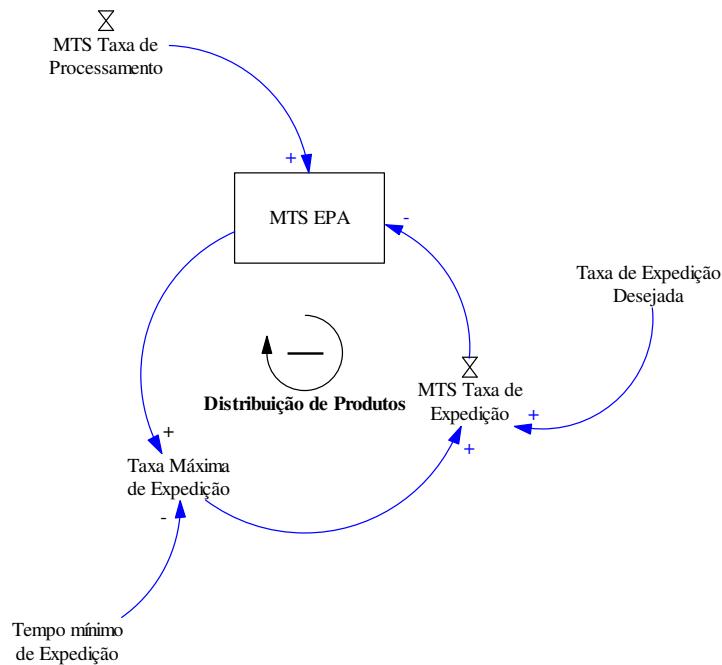


Figura 27: Ciclo Recursivo de Distribuição de Produtos

3.5.2.4 Resumo das Principais Variáveis do Subsistema MTS

Variável	Expressão	Unidade
MTS WIP	$MTS WIP_0 + \int_{t_0}^t (MTS OP's - MTS Taxa de Processamento) dt$	kg
MTS Taxa de Processamento	$ATRASO3(MTS OP's, MTS Tempo de Ciclo)$	kg/dia
Estoque Desejado	$Cobertura de Estoque Desejada \times Expectativa de Demanda$	dia
Cobertura de Estoque Desejada	$Tempo Mínimo de Expedição + Estoque de Segurança$	dia
Ajuste de Estoque	$\frac{(Estoque Desejado - MTS EPA)}{Tempo de Ajuste de Estoque}$	kg/dia
Produção Desejada	$MAX(Expectativa de Demanda + Ajuste de Estoque; 0)$	kg/dia
MTS WIP Desejado	$MTS Produção Desejada \times MTS Tempo de Ciclo$	kg
MTS Ajuste de WIP	$\frac{(MTS WIP Desejado - MTS WIP)}{Tempo de Ajuste para Ajuste de WIP}$	kg/dia
OP's Desejadas	$MTS Produção Desejada + MTS Ajuste de WIP$	kg/dia
MTS OP's	$MIN(Capacidade Disponível para MTS; OP's Desejadas)$	kg/dia
MTS Backlog¹	$Backlog_0 + \int_{t_0}^t (MTS Chegada de Pedidos - MTS Entrega de Pedidos) dt$	kg
MTS Chegada de Pedidos	$MTS Demanda$	kg/dia
MTS Entrega de Pedidos	$MTS Taxa de Expedição$	kg/dia

Tabela 4: Resumo das Variáveis do Subsistema de Distribuição MTS

¹ Abreviação de Backlog de Demanda para Backlog

3.5.3 Subsistema de Previsão

O Subsistema de Previsão tem como objetivo estabelecer as expectativas da demanda futura para a estrutura de controle co Subsistema de Produção MTS, ele representa a atividade de previsão de demanda realizada pela unidade de PCP da conicalagem.

A Figura 28 exibe o diagrama de estoque e fluxo do Subsistema:

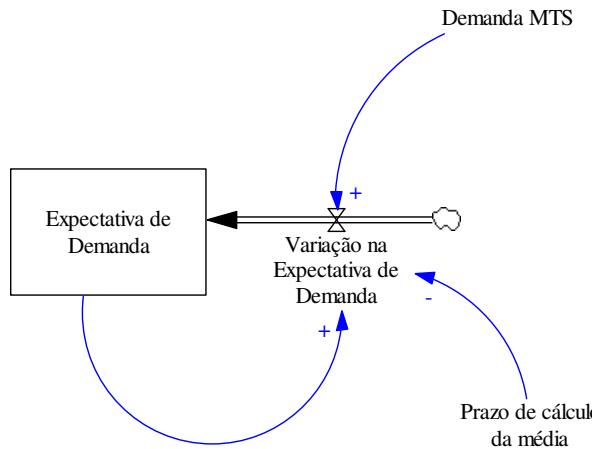


Figura 28: Diagrama de Estoque e Fluxo do Subsistema de Previsão

Pode-se observar que a estrutura do Subsistema é na verdade a estrutura de suavização de dados, bastante conhecida na Dinâmica de Sistemas. A variável de estoque representará a expectativa de demanda, esse valor será alterado apenas pela variável de fluxo Variação na Expectativa de Demanda, que poderá assumir valores positivos ou negativos. A compreensão é facilitada observando-se as expressões matemáticas:

$$\text{Expectativa de Demanda} = \text{Expectativa de Demanda}_0 + \int_{t_0}^t (\text{Variação na Expectativa de Demanda}) dt$$

Equação 19: Variável de Estoque Expectativa de Demanda

A variável de fluxo fará a comparação da expectativa presente com o valor real da demanda, a diferença será utilizada para a correção da previsão após ser amortecida pelo prazo de cálculo, como exibido pela Equação 1Equação 20:

$$\text{Variação na Expectativa de Demanda} = \frac{(\text{Expectativa de Demanda} - \text{Demanda MTS})}{\text{Prazo de Cálculo}}$$

Equação 20: Variação na Expectativa de Demanda

Tal técnica é conhecida na disciplina de PCP como suavização exponencial e é largamente utilizada para previsão de demanda. A Bonfio, entretanto, utiliza o método da média móvel para previsão de demanda, por o modelo dar um tratamento contínuo ao sistema,

o autor optou por não utilizar o método empregado pela empresa e sim a suavização exponencial que é mais refinada.

A Tabela 5 consolida as variáveis do Subsistema de Previsão.

Variável	Expressão	Unidad e
Expectativa de Demanda	$Expectativa\ de\ Demanda\ 0 + \int_{t_0}^t (Variação\ na\ Expectativa\ de\ Demanda)\ dt$	kg/dia
Variação na Expectativa de Demanda	$\frac{(Expectativa\ de\ Demanda - Demanda\ MTS)}{Prazo\ de\ Cálculo}$	kg/dia ²

Tabela 5: Resumo das Variáveis do Subsistema de Previsão

3.5.4 Subsistema de Produção MTO

O Subsistema de Produção MTO é encarregado de gerenciar, produzir e expedir os produtos customizados, fabricados sobre medida para os clientes, diferente do Subsistema de Produção MTS, ele não possui estruturas para controle de estoques ou levantamento de expectativas futuras, o Subsistema é composto por uma estrutura de gerenciamento de carteira de pedidos e uma estrutura de produção para preencher as ordens em aberto.

A Figura 29 exibe o diagrama de estoque e fluxo da estrutura de produção e de seus elementos de controle, pode-se notar que a estrutura que comporta o fluxo físico de produtos MTO é idêntica à estrutura de produção do Subsistema MTS, a diferença entre os dois sistemas encontra-se nos mecanismos de controle como descrito a seguir.

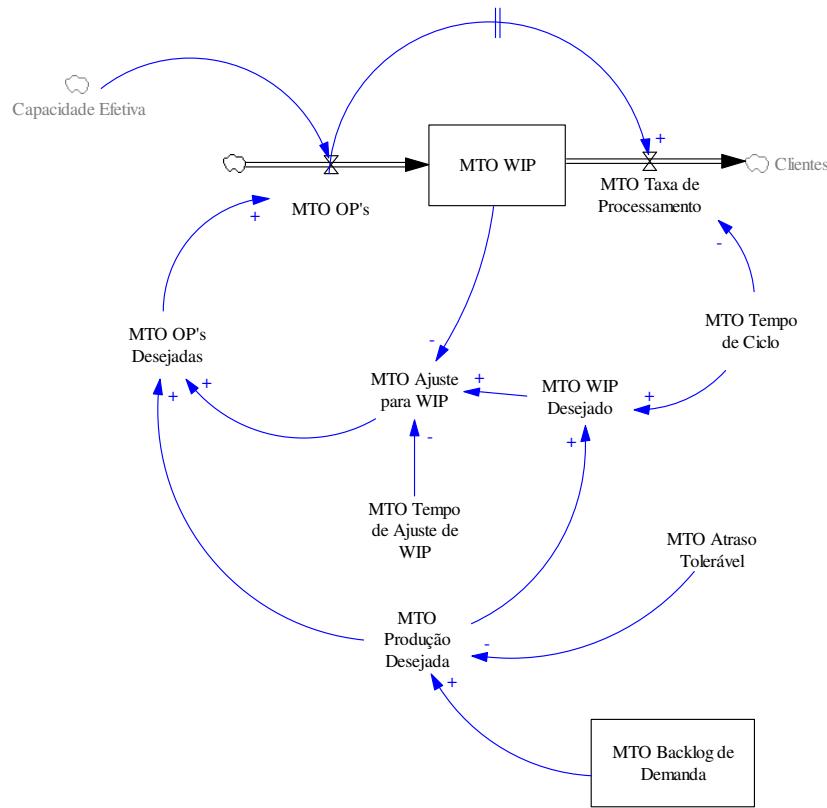


Figura 29: Estrutura de Produção MTO

A estrutura de produção MTO possui apenas uma variável de nível, a variável MTO WIP. De maneira semelhante à estrutura de produção MTS, ela adota a expressão exibida pela Equação 21:

$$MTO WIP = MTO WIP_0 + \int_{t_0}^t (MTO OP's - MTO Taxa de Processamento) dt$$

Equação 21: Variável de Estoque MTO WIP

Onde,

$$MTO Taxa de Processamento = ATRASO3(MTO OP's, MTO Tempo de Ciclo)$$

Equação 22: MTO Taxa de Processamento

Como mencionado no Subsistema MTS, a estrutura da taxa de processamento apresentará o efeito do atraso de terceira ordem, como exibido no Gráfico 2.

Observa-se a ausência da estrutura de estoque e distribuição, em decorrência, os pedidos processados pela estrutura de produção MTO seguem direto para o cliente ao fim do processamento, como verificado pelo sistema original da Bonfio.

Pela Figura 29 observa-se que a meta de produção, representada pela variável *MTO Produção Desejada*, é constituida a partir da combinação do volume de pedidos em carteira com o atraso determinado para o sistema MTO, como exibido pela Equação 23:

$$MTO \text{ Produção Desejada} = \frac{MTO \text{ Backlog de Demanda}}{MTO \text{ Atraso Tolerável}}$$

Equação 23: Variável de Fluxo MTO Produção Desejada

A estrutura de produção desejada visa fixar o ritmo de produção de modo a garantir a entrega dos pedidos em aberto dentro do prazo de entrega fixado pela diretoria comercial.

Como na estrutura de produção MTS, o sistema faz um ajuste no volume de WIP para garantir que a taxa de processamento mantenha o nível desejado. O ajuste parte do volume de produção desejado, como exibido pela Equação 24:

$$MTO \text{ WIP Desejado} = MTO \text{ Produção Desejada} \times MTO \text{ Tempo de Ciclo}$$

Equação 24: MTS WIP Desejado

O volume de WIP desejado é então comparado com o volume de WIP presente do Subsistema, a comparação é convertida em uma taxa a partir do tempo demorado para se ajustar o WIP, como exibido pela Equação 25:

$$MTO \text{ Ajuste de WIP} = \frac{(MTO \text{ WIP Desejado} - MTO \text{ WIP})}{MTO \text{ Tempo de Ajuste para Ajuste de WIP}}$$

Equação 25: MTO Ajuste de WIP

Observa-se que o ajuste poderá assumir valores negativos quando o volume de WIP presente perfizer o volume de WIP desejado.

As ordens de produção desejadas na estrutura são derivadas da combinação do ajuste de WIP acrescido da produção desejada, como na Equação 26:

$$MTO \text{ OP's Desejadas} = MTO \text{ Produção Desejada} + MTO \text{ Ajuste de WIP}$$

Equação 26: MTO OP's Desejadas

As ordens disparadas para a produção são condicionadas apenas à *Capacidade Máxima de Processamento* do sistema, como exibido pela Equação 27

$$MTO \text{ OP's} = \text{MIN}(Capacidade Máxima de Processamento ; OP's Desejadas)$$

Equação 27: Variável de Fluxo MTO OP's Disparadas

Tal estrutura sela o sistema de priorização pela manufatura de pedidos MTO, a estrutura de produção MTO terá toda a capacidade de produção do sistema caso necessite.

O Sub-sisitema de produção MTO também incorpora uma estrutura de gerenciamento de carteira de pedidos, semelhante à do Subsistema de Distribuição MTS. O diagrama de estoque e fluxo da estrutura é exibido na Figura 30:

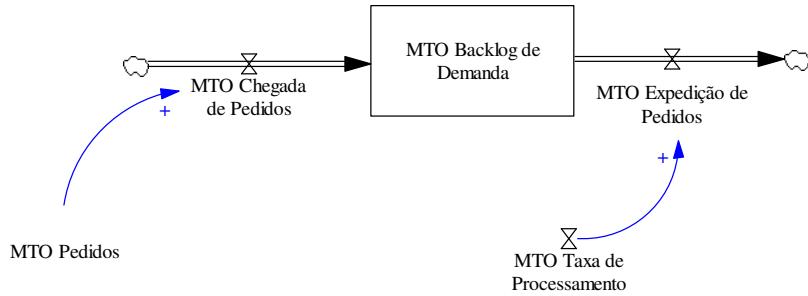


Figura 30: Estrutura de Controle de Backlog de Demanda MTO

Como no Subsistema de distribuição a estrutura de gerenciamento de carteira de pedidos vai converter os valores dos fluxos físicos *MTO Pedidos* e *MTO Expedição de Pedidos* em fluxos de informação, que serão utilizadas pelos elementos de controle na estrutura de produção. As equações que definem a estrutura são semelhantes às do Subsistema de distribuição e serão exibidas em sequência:

$$MTO \text{ Backlog de Demanda} = MTO \text{ Backlog de Demanda} 0 + \int_{t_0}^t (MTO \text{ Chegada de Pedidos} - MTO \text{ Entrega de Pedidos}) dt$$

Equação 28: Variável de Estoque MTO Backlog de Demanda

$$MTO \text{ Chegada de Pedidos} = MTO \text{ Demanda}$$

Equação 29: Variável de Fluxo MTO Chegada de Pedidos

$$MTO \text{ Entrega de Pedidos} = MTO \text{ Taxa de Expedição}$$

Equação 30: Variável de Fluxo MTO Entrega de Pedidos

3.5.4.1 Análies Qualitativa do Subsistema

A Figura 31 exibe o diagrama causal do Subsistema de produção MTO, no diagrama pode-se destacar dois importantes ciclos recursivos do Subsistema, o ciclo de ajuste de WIP e o ciclo de preenchimento das demandas em aberto, ambos descritos a seguir.

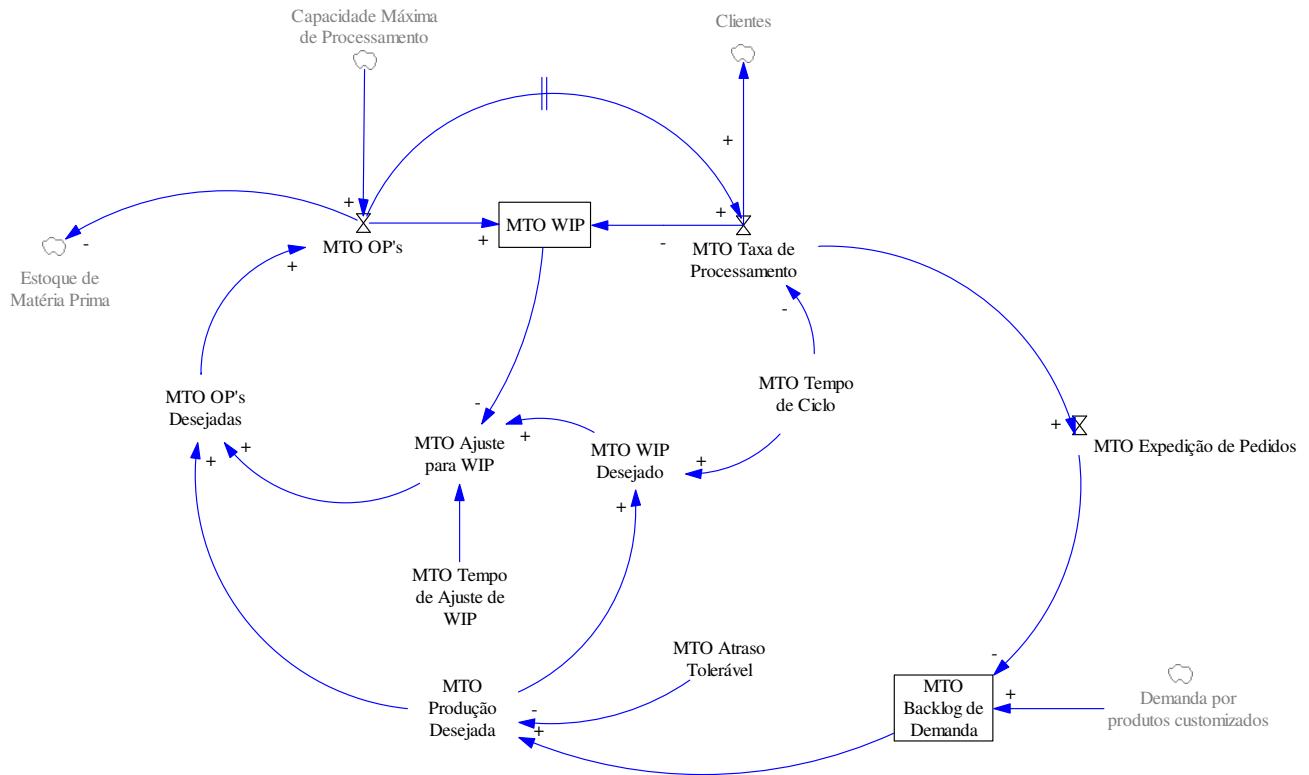


Figura 31: Diagrama de Ciclo Causal do Subsistema de Produção MTO

O ciclo recursivo de ajuste de WIP é semelhante ao da estrutura de produção MTS, ele possui polaridade negativa e perseguirá a meta de WIP desejado, com origem na produção desejada. É de se esperar que o ciclo busque convergir para a meta mantendo o fluxo de produção sempre em linha com a carteira de pedidos e o atraso desejado, como exibido pela Figura 32:

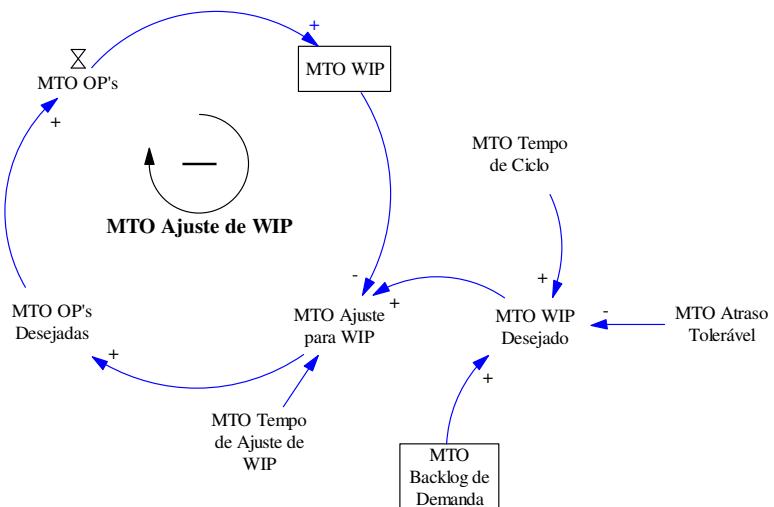


Figura 32: Ciclo Recursivo de Ajuste de WIP MTO

Já o ciclo recursivo para preenchimento das ordens em aberto, exibido pela Figura 33, contém o atraso do processo de produção e possui polaridade negativa.

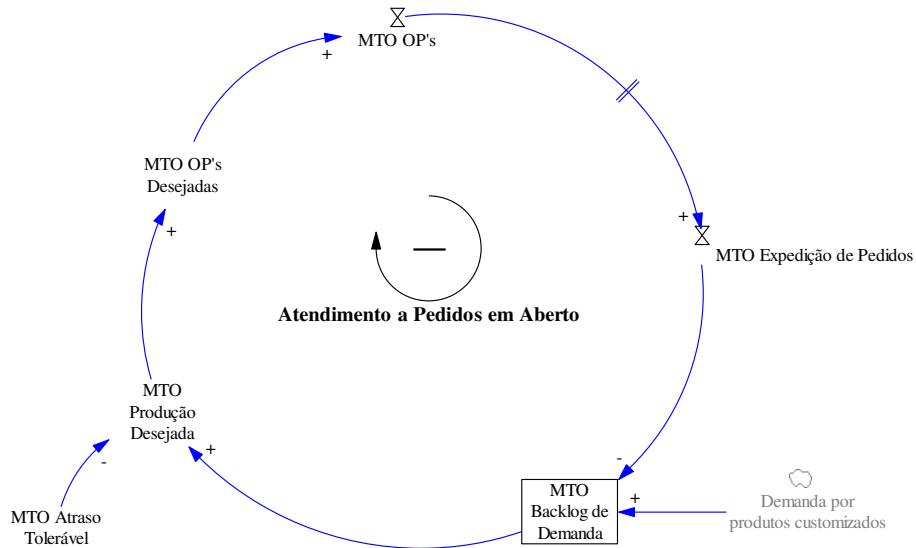


Figura 33: Ciclo Recursivo de Atendimento em Pedidos MTO em Aberto

Diferentemente do ciclo de ajuste de estoque, na estrutura de produção MTS, o ciclo de preenchimento de pedidos em aberto no Subsistema MTO não irá oscilar, ele terá a mesma natureza de um ciclo de polaridade negativa simples. Isso se deve ao fato de a informação atrasada não ser utilizada pelos elementos de controle do sistema.

3.5.4.2 Resumo das Variáveis do Subsistema MTO

Variável	Expressão	Unidade
MTO WIP	$MTO WIPO + \int_{t_0}^t (MTO OP's - MTO Taxa de Processamento) dt$	kg
MTO Taxa de Processamento	$ATRASO3(MTO OP's, MTO Tempo de Ciclo)$	kg/dia
MTO Produção Desejada	$\frac{MTO Backlog de Demanda}{MTO Atraso Tolerável}$	kg/dia
MTO WIP Desejado	$MTO Produção Desejada \times MTO Tempo de Ciclo$	kg
MTO Ajuste de WIP	$\frac{(MTO WIP Desejado - MTO WIP)}{MTO Tempo de Ajuste para Ajuste de WIP}$	kg/dia
MTO OP's Desejadas	$MTO Produção Desejada + MTO Ajuste de WIP$	kg/dia
MTO OP's	$MIN(Capacidade Máxima de Processamento; MTO OP's Desejadas)$	kg/dia
MTO Backlog²	$Backlog 0 + \int_{t_0}^t (MTO Chegada de Pedidos - MTO Entrega de Pedidos) dt$	kg
MTO Chegada de Pedidos	$MTO Demanda$	kg/dia
MTO Entrega de Pedidos	$MTO Taxa de Expedição$	kg/dia

² Abreviação de Backlog de Demanda para Backlog

3.5.5 Constantes e Variáveis Exógenas

Definidas as variáveis auxiliares, de estoque e de fluxo que compõem os Subsistemas, resta serem fixados os valores assumidos pelas variáveis exógenas e as constantes do sistema. Tais variáveis foram definidas através da medida e observação dos aspectos do sistema real, como descrito em sequência.

3.5.5.1 Constantes e Variáveis Exógenas do Subsistema MTO

Capacidade Máxima de Processamento: A capacidade máxima de processamento foi definida como a máxima taxa efetiva de processamento das máquinas de conicalagem. A escolha pela taxa de processamento das máquinas de conicalagem se deve a elas serem, no momento, o gargalo do sistema de produção. Já a opção pela taxa efetiva se deve ao fato da companhia operar a uma taxa de utilização estável adiciado à hipótese de que programas de eficiência ou incrementos não serão implementados.

O valor assumido para a capacidade máxima de processamento foi de 6.800 kg/dia e seu comportamento seguirá uma distribuição de perfil exponencial truncada nos valores de 7000 kg/dia e 5.000 kg/dia. O perfil exponencial representa as rupturas decorrentes de quebras e manutenção.

Demanda MTO: A demanda do Subsistema MTO é constituída pelos produtos customizados vendidos pela Bonfio, o volume de vendas mensal de produtos customizados alcança em média 20% do volume de vendas total da companhia, resultando em uma média diária de 1.200 kg/dia.

A decisão de compra por linhas têxteis é influenciada por uma série de fatores aleatórios, dessa forma será assumido que a demanda MTO é regida por uma distribuição com perfil exponencial.

Tempo de Ciclo MTO: O tempo de ciclo do sistema MTO é mais curto do que o do sistema MTS, sendo estimado em 3 dias. A maior rapidez do sistema MTO se deve a ele trabalhar com lotes menores e possuir priorização em todas as etapas do processo de produção, evitando filas.

É importante lembrar que produtos diferentes apresentarão tempos de ciclos diferentes, a estimativa de 3 dias foi atingida com o suporte de uma planilha, elaborada pelo supervisor de produção, capaz de calcular o tempo de ciclo para cada produto, tais valores ponderados pelo mix de vendas médio resultaram na estimativa assumida.

Tempo de Ajuste de WIP MTO: O tempo para que o volume de produtos em processamento possa ser recomposto pode ser assumido como o tempo de ciclo do sistema de produção.

Atraso Tolerável MTO: O atraso tolerável para o sistema MTO é definido pela diretoria comercial, atualmente esse valor está em 6 dias.

3.5.5.2 Constantes e Variáveis Exógenas do Subsistema MTS

Capacidade Disponível para MTS: A capacidade disponível para o sistema MTS é, na verdade, uma variável auxiliar dependente de uma variável exógena, a capacidade máxima de processamento. Ela é quem estabelece o vínculo entre os sistemas MTS e MTO, sendo determinada pela diferença entre a capacidade máxima de processamento e a capacidade utilizada pelo sistema MTS.

Demandas MTS: A demanda MTS representa os pedidos recebidos pela companhia por produtos padronizados, mantidos em estoque. As vendas de produtos padronizados representam 80% das vendas médias mensais da companhia, sendo assumido o valor diário de 4.800 kg/dia. A demanda por produtos padronizados é mais estável que a demanda por produtos customizados, assim será assumido um perfil normal para sua distribuição.

Tempo de Ciclo MTS: O tempo de ciclo do sistema MTS é mais longo do que o do sistema MTO, isso se deve ao fato da produção para estoque ser realizada com lotes maiores e ser frequentemente interrompida pelo fluxo prioritário de produtos customizados, dessa forma o valor assumido é de 6 dias.

Tempo de Ajuste de WIP MTS: O tempo de ajuste de WIP do sistema MTS também será estimado como sendo igual ao tempo de ciclo do sistema MTS.

Tempo de Ajuste de Estoque: Como para o tempo de ajuste de WIP, o ajuste de estoque será regido pelo tempo de ciclo do sistema MTS de 6 dias.

Estoque de Segurança: A Bonfio define seu estoque de segurança de forma empírica, ajustando-o conforme a necessidade de proteção às oscilações do sistema, o modelo assumirá inicialmente um estoque de segurança de 2 dias, porém esse parâmetro será alterado durante as simulações.

Tempo de Mínimo de Expedição: O tempo mínimo de expedição representa o tempo demandado para a equipe de distribuição manipular e expedir pedidos dos clientes, o valor estimado junto à equipe de expedição foi de 1 dia.

Atraso Tolerável MTS: O atraso tolerável para o Subsistema MTS é uma métrica fixada pela diretoria comercial e representa o prazo de entrega prometido ao cliente, esse valor está em 2 dias atualmente.

Prazo de Cálculo: O prazo de cálculo da previsão de demanda representa o intervalo de tempo de acumulação dos dados de demanda MTS, para que seja formada uma previsão futura de demanda, o valor utilizado pelo PCP da Bonfio é de 15 dias.

3.5.5.3 Resumo das Constantes e Variáveis Exógenas

Variável	Expressão	Unidade
Capacidade Máxima de Processamento	6.800 (<i>Distribuição Exponencial</i>)	kg/dia
Demandra MTO	1200 (<i>Distribuição Exponencial</i>)	kg/dia
Tempo de Ciclo MTO	3	dia
Tempo de Ajuste de WIP MTO	3	dia
Atraso Tolerável MTO	6	dia
Capacidade Disponível para MTS	<i>Capacidade Máxima de Processamento</i> – <i>MTO OP's</i>	kg/dia
Demandra MTS	4.800 (<i>Distribuição Normal</i>)	kg/dia
Tempo de Ciclo MTS	6	dia
Tempo de Ajuste de WIP MTS	6	dia
Tempo de Ajuste de Estoque	6	dia
Estoque de Segurança	2	dia
Tempo Mínimo de Expedição	1	dia
Atraso Tolerável MTS	2	dia
Prazo de Cálculo	15	dia

Tabela 6: Resumo das Variáveis Exógenas e Constantes

3.6 SIMULAÇÃO

A simulação do modelo construído se dá através do cálculo das variáveis de estoque do sistema para cada intervalo mínimo de tempo, esse cálculo é equivalente à solução numérica das integrais que definem as variáveis de estoque. Antes de realizar a simulação deve-se optar por um método de integração que executará o cálculo das variáveis de estoque, os dois métodos mais empregados na dinâmica de sistemas são o método de Euler e o método de Runge-Kutta.

O método empregado no presente trabalho foi o de Runge-Kutta com intervalo de integração definido, a escolha deve-se ao fato de não terem sido utilizadas variáveis discretas

no modelo e por ele apresentar características oscilatórias, ambiente em que o método de Euler não possui um bom desempenho.

3.7 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Nessa sessão será verificada a consistência da estrutura do modelo e validada a aderência de seu comportamento à realidade, para isso o modelo será submetido a condições em que seu comportamento possa ser facilmente intuído. É importante destacar que as variáveis estocásticas receberão tratamento determinístico o que, para os propósitos de verificação e validação, não traz prejuízos aos resultados.

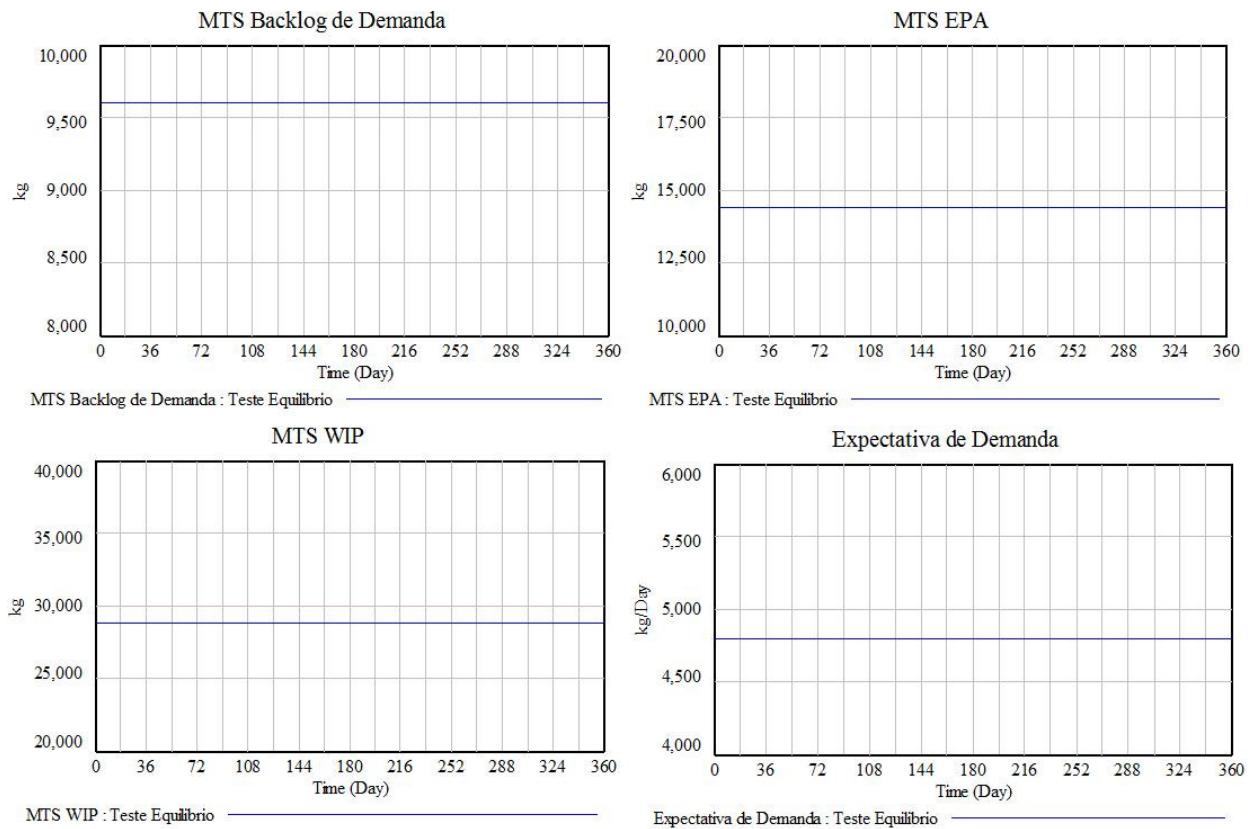
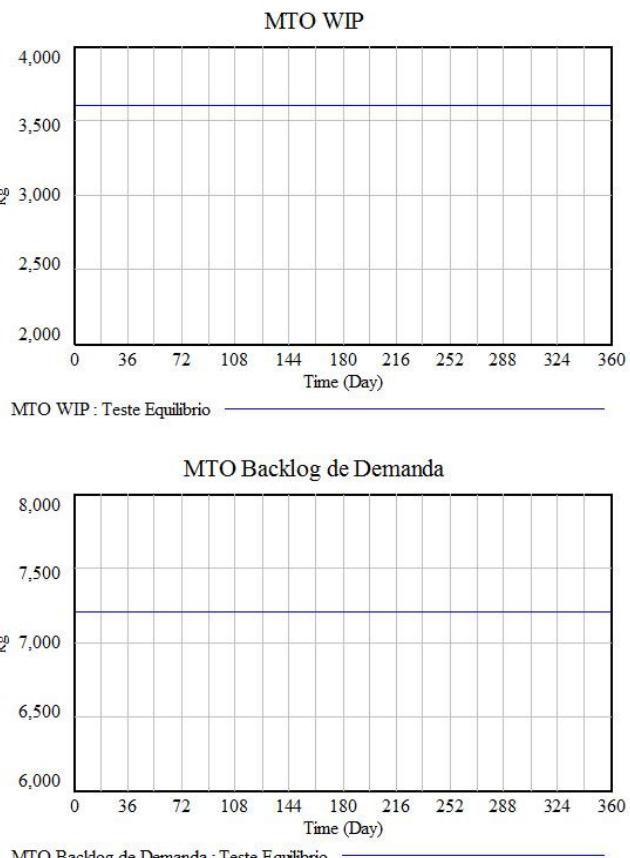
As duas etapas foram realizadas em conjunto no presente trabalho pois a validação será feita conferindo-se a compatibilidade do comportamento do modelo com a intuição desenvolvida pela análise qualitativa dos Subsistemas. É recomendável complementar a validação verificando-se a compatibilidade com o comportamento histórico do sistema, o que foi restringido pela indisponibilidade de dados.

3.7.1 Equilíbrio

Como observado na análise qualitativa dos Subsistemas, todos os ciclos recursivos identificados no sistema têm polaridade negativa, o que permite afirmar que o sistema deve entrar em equilíbrio em condições específicas.

No estado de equilíbrio as variáveis de estoque do sistema não devem variar, implicando que as variáveis de fluxo de entrada e de saída sejam idênticas em todos os instantes. Como foi visto os ciclos negativos perseguirão suas metas até que sejam atingidas, como o objetivo aqui é impedir a perseguição, as condições iniciais do estado do sistema devem ser idênticas às metas do sistema, dispensando qualquer alteração.

Inicializando o sistema em seu estado “desejado” obtém-se os resultados exibidos pelo Gráfico 4 e pelo Gráfico 5:

**Gráfico 4: Variáveis de Estoque do Sistema MTS em Equilíbrio****Gráfico 5: Variáveis de Estoque do Sistema MTO em Equilíbrio**

Observa-se que ambos os Subsistemas encontram-se em equilíbrio, com suas variáveis de nível apresentando um comportamento constante ao longo da simulação, indicando também que as demais variáveis se comportam da mesma forma.

O primeiro teste aprova a estrutura do modelo quanto à capacidade de entrar em equilíbrio, um comportamento esperado pela análise qualitativa, em sequência será investigado como o modelo se comportará quando submetido à condições extremas.

3.7.2 Explosão de Demanda

Nessa sessão serão testados os limites do modelo, normalmente o comportamento de um sistema pode ser intuitivo quando ocorrem situações extremas, para o modelo da Bonfio esse teste consistirá na elevação da demanda, uma variável exógena, a níveis muito acima dos normais. Como o modelo possui duas categorias de demanda, foi realizado um teste para cada uma delas. O resultado consolidado para cada um dos Subsistemas pode ser observado pelo Gráfico 6 e pelo Gráfico 8:

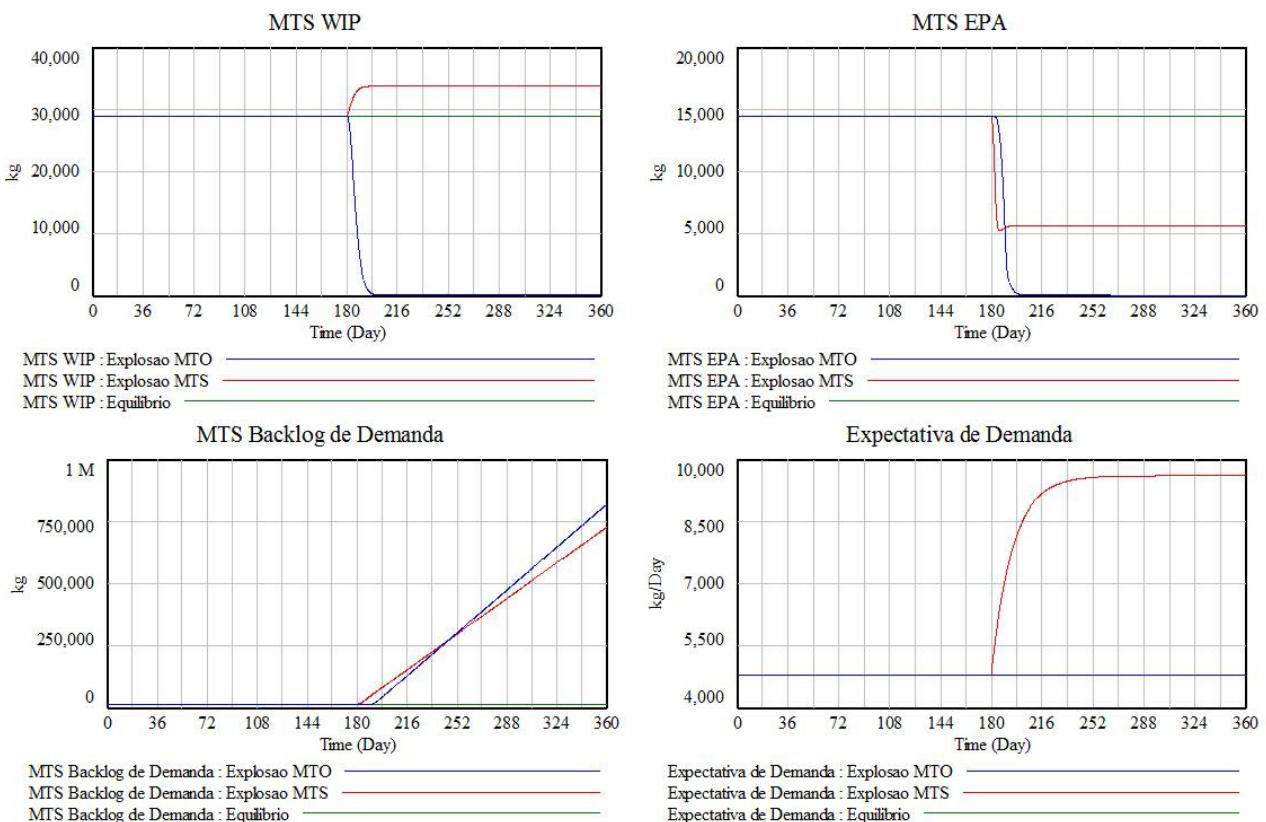


Gráfico 6: Variáveis de Estoque MTS em Explosão de Demanda

Observando-se o Gráfico 6 consegue-se que o Subsistema MTS manifesta reações distintas quando submetido aos extremos de demanda MTO e MTS, o que merece investigação mais profunda.

Analisando a reação do sistema á explosão de demanda MTS, observa-se uma elevação do MTS WIP até um patamar fixo, o decréscimo do EPA até um patamar fixo e o crescimento indefinido do Backlog de demanda. Esse comportamento ocorre pois o limite da capacidade de processamento dísponível para o sistema MTS é atingido e mostra-se insuficiente para atender à elevação da demanda reajustada, dessa forma EPA e WIP aumentarão até os valores delimitados pela capacidade máxima e os pedidos não atendidos se acumulam indefinidamente na carteira.

Já na explosão de demanda MTO ambos MTS WIP e MTS EPA vão a zero e o Backlog se acumula indefinidamente, enquanto a previsão de demanda confirma a estabilidade da demanda MTS. Tal comportamento decorre da priorização de processamento de produtos MTO, como pode ser observado pelo Gráfico 7:

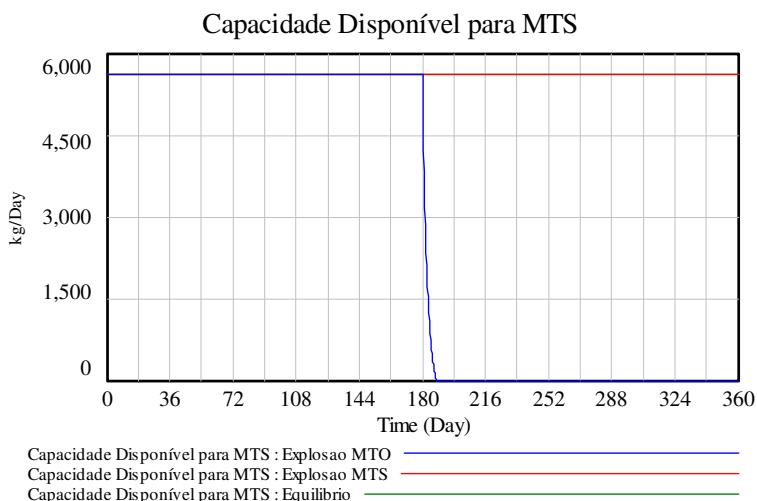


Gráfico 7: Capacidade Disponível para MTS

Com a explosão da demanda MTO todas as máquinas são ocupadas por pedidos MTO, secndo o fluxo de produtos MTS no sistema, enquanto na explosão de demanda MTS o fluxo de produtos é perene, porém limitado pela capacidade máxima de processamento.

O comportamento do Subsistema MTO só será alterado durante a explosão de demanda MTO, comportamento derivado da estrutura de priorização de pedidos MTO, independente da dimensão da demanda por produtos MTS o Subsistema MTO sempre terá seus produtos processados com prioridade, não tendo seu estado abalado.

Já na situação de explosão de demanda MTO o Subsistema “roubará” toda a capacidade do sistema de produção até atingir seu limite, como exibido pela variável WIP no Gráfico 8. Como consequênci a carteira de pedidos MTO se acumula indefinidamente com pedidos que, provavelmente, nunca serão atendidos.

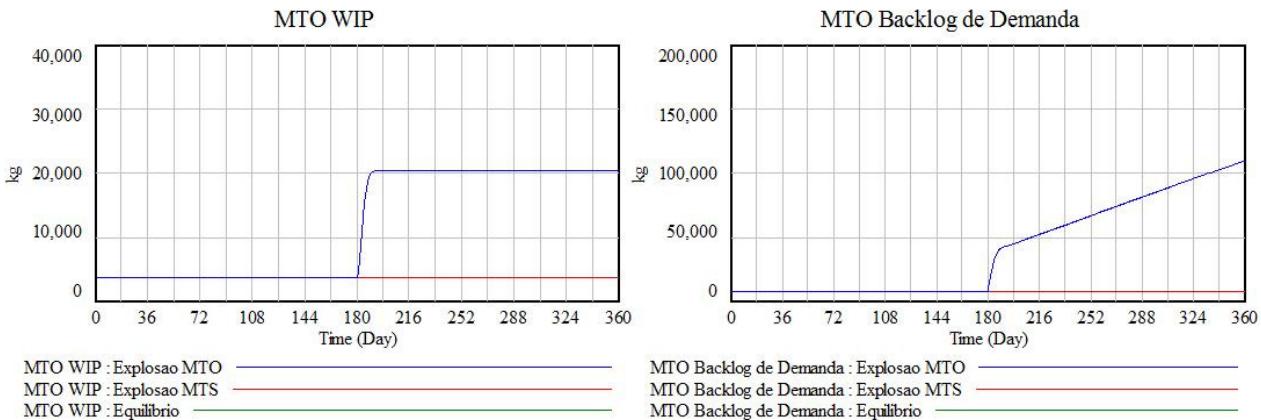


Gráfico 8: Variáveis de Estoque MTO em Explosão de Demanda

O comportamento manifestado pelo sistema na explosão de demanda pode parecer surreal ao compararmos com o sistema original, porém está em linha com a estrutura construída para o modelo, garantindo mais uma aprovação.

3.7.3 Colapso de Capacidade

Outra condição extrema que pode-se submeter o sistema é a simulação do colapso da capacidade, como exibido pelo Gráfico 9:

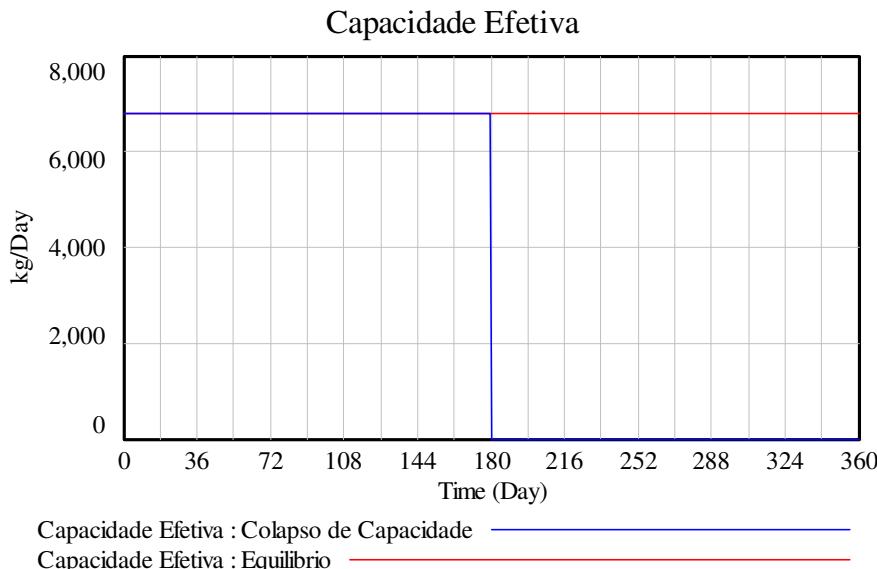


Gráfico 9: Comportamento do Capacidade Efetiva em Colapso

A implicação dessa circunstância sobre o comportamento do sistema é trivial, com o colapso da estrutura produtiva o sistema não é capaz de processar produtos o que se manifestará através do decréscimo das variáveis de nível associadas à produção.

O Gráfico 10 exibe a reação do Subsistema MTS ao colapso de capacidade, pode-se observar as variáveis de estoque MTS WIP e MTS EPA decaindo abruptamente até zero,

indicando que o fluxo de produtos MTS secou no Subsistema. Como consequência o Backlog de demanda cresce indefinidamente, pois, como indicado pela expectativa de demanda, a companhia continua recebendo os pedidos de clientes.

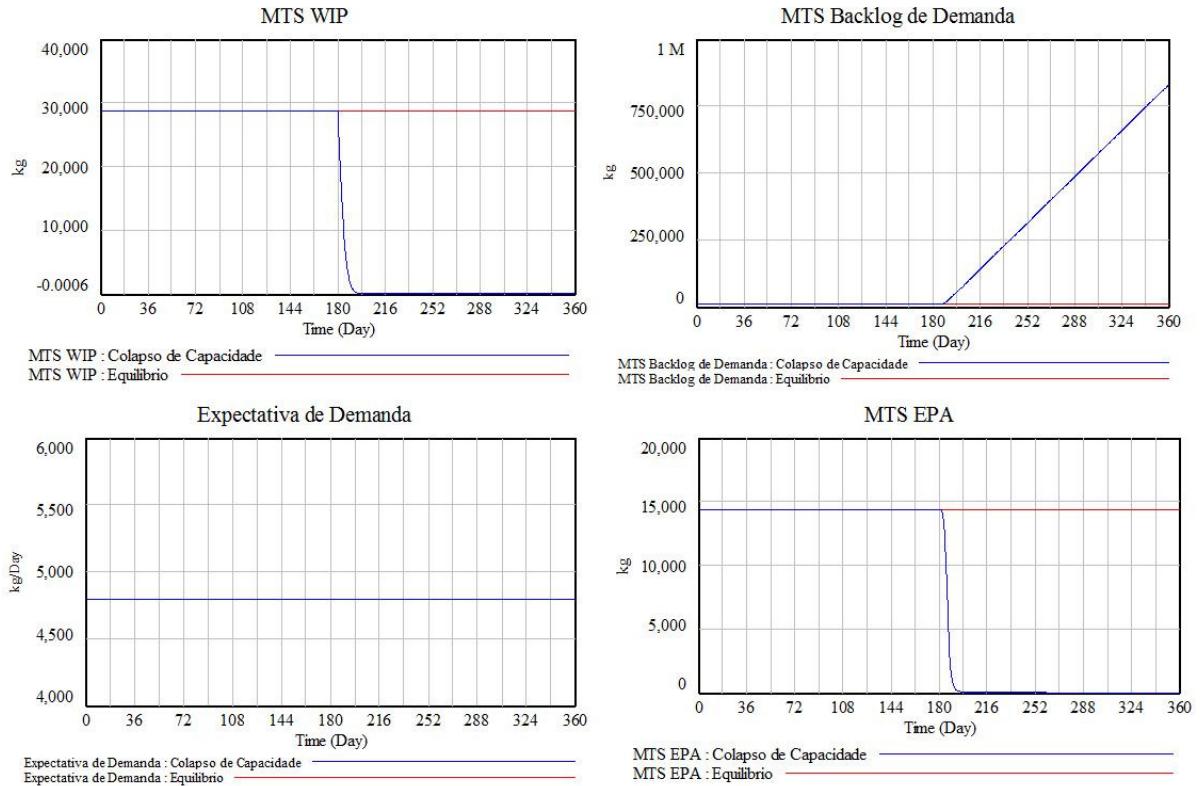


Gráfico 10: Variáveis de Nível MTS em Colapso de Capacidade

A mesma reação pode ser observada no Subsistema MTO, como exibe o Gráfico 11:

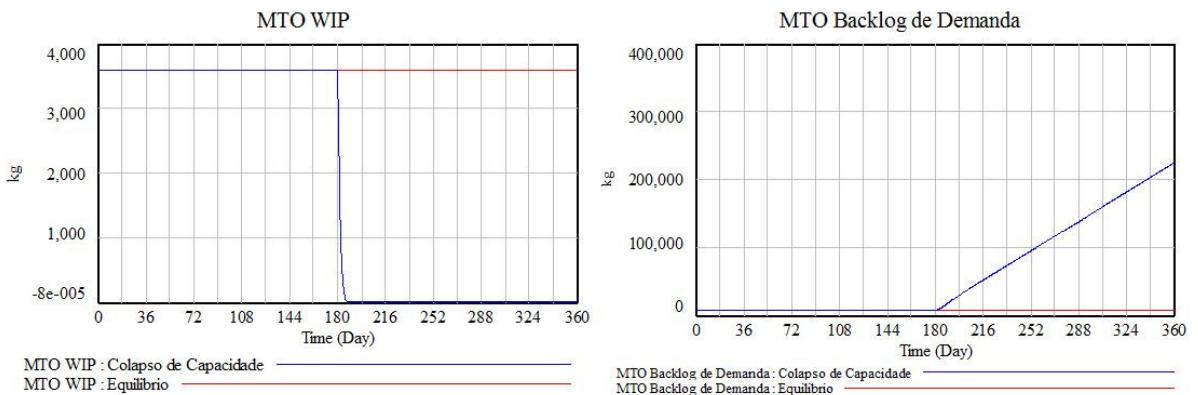


Gráfico 11: Variáveis de Estoque MTO em Colapso de Capacidade

Novamente o fluxo de produtos seca no Subsistema, como manifestado pelo MTO WIP, fazendo com que a carteira de pedidos se acumule indefinidamente.

Apesar de o cenário de colapso total de capacidade ser distante da realidade do sistema, ele foi útil para comprovar que a estrutura do modelo está em linha com o comportamento esperado caso a capacidade seja limitada, trazendo mais uma aprovação.

3.7.4 Pulso De Demanda

Após ter sido aprovado nos testes em casos extremos, resta ainda ao modelo ser comprovado em uma situação típica do contexto operacional do sistema, para isso ele será submetido a um pulso de demanda para cada um dos Subsistemas, como o expresso pelo Gráfico 12:

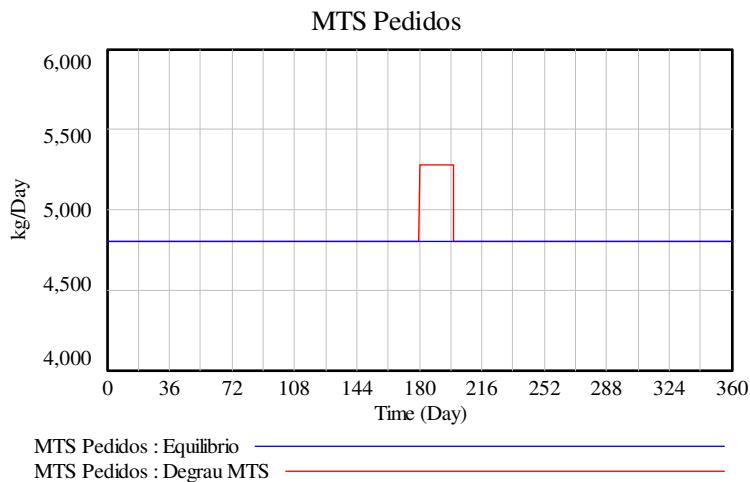


Gráfico 12: Pulso de Demanda MTS

Inicialmente é analisado o pulso na demanda MTS, através da reação do sistema MTS ao pulso, exibida pelo Gráfico 13

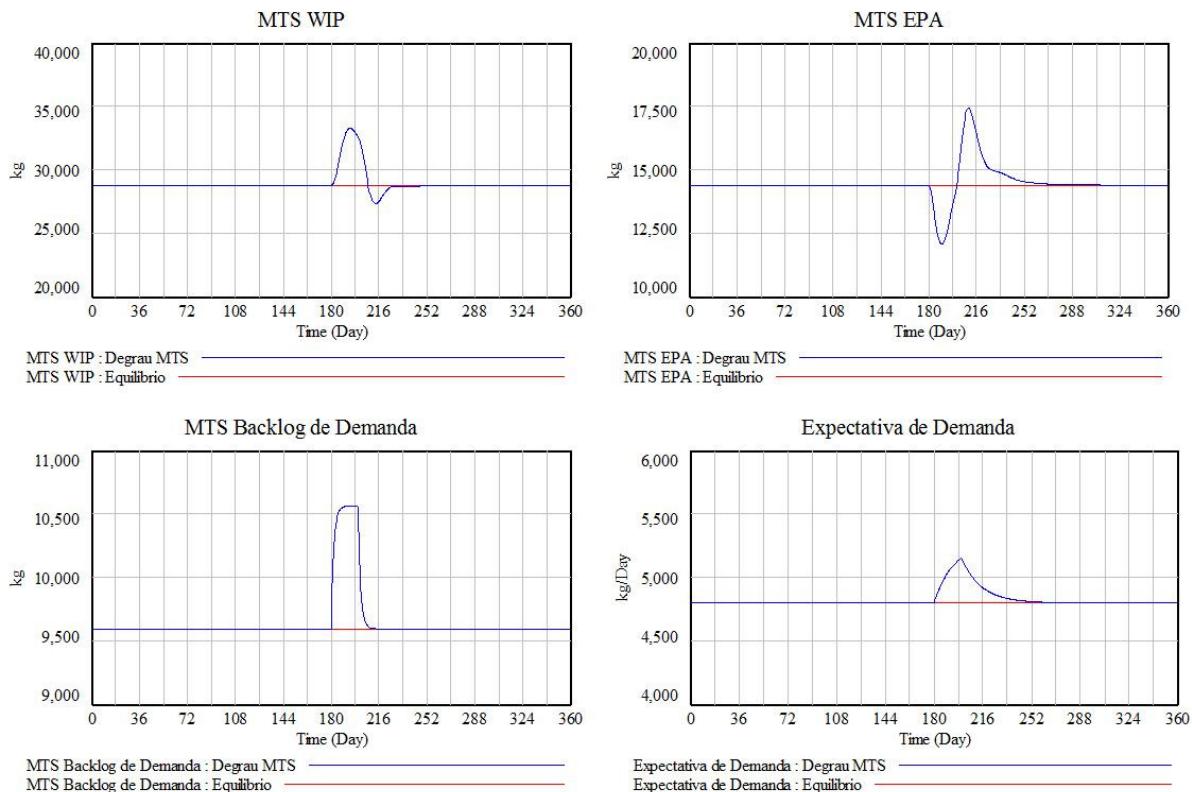


Gráfico 13: Variáveis de Estoque MTS em Pulso de Demanda

As variáveis MTS WIP e MTS EPA reagem ao aumento de demanda apresentando uma curta oscilação e, prontamente, retornando ao estado de equilíbrio. Nesse comportamento é possível observar o efeito do ciclo recursivo negativo com atraso, a oscilação é uma consequência do atraso contido na estrutura de produção, no entanto, a polaridade do ciclo faz o estado do sistema convergir para a meta, ou o estado de equilíbrio com o fim do pulso.

Já o Subsistema MTO não é afetado pelo pulso de demanda MTS, como pode ser visto pelo Gráfico 14, devido ao regime de priorização descrito teste de explosão de demandas.

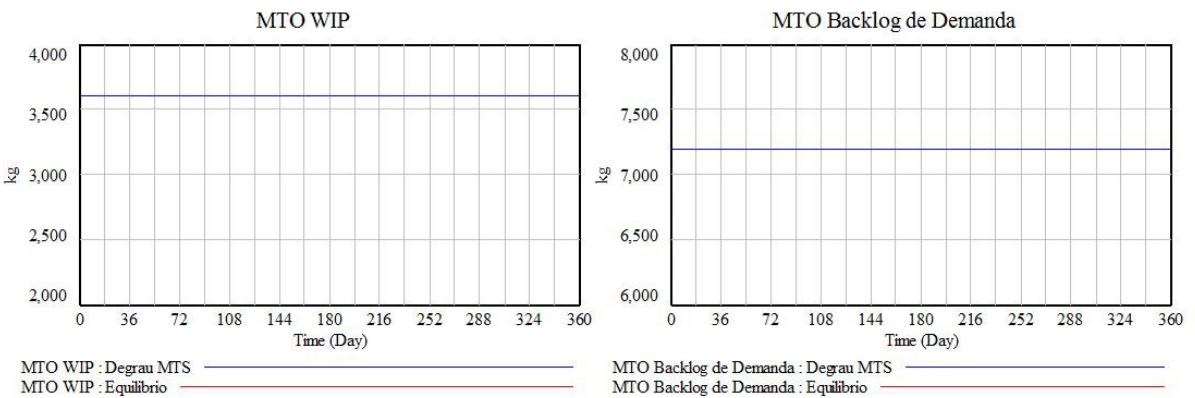


Gráfico 14: Variáveis de Estoque MTO em Pulso de Demanda MTS

Quando Submetido a um pulso de demanda MTO, o Subsistema MTO reage prontamente através da elevação de seu WIP, como mostra o Gráfico 15:

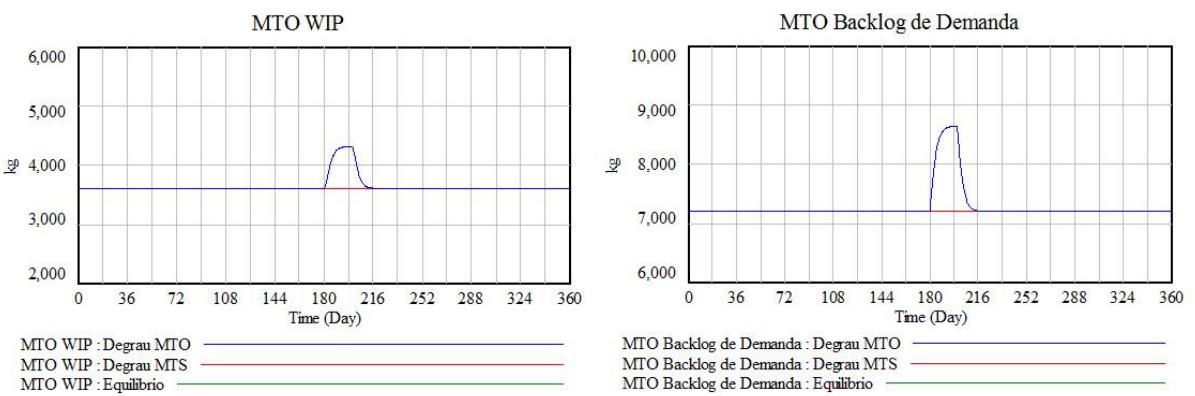


Gráfico 15: Variáveis de Estoque MTO em Pulso de demanda MTO

Submetido à estrutura do ciclo recursivo de polaridade negativa, o Subsistema MTO alinhará seu volume de produção com a meta do sistema, o atendimento da demanda MTO, o que pode ser observado pelo comportamento da variável WIP que acompanha o pulso de demanda.

O comportamento do modelo confirma o efeito dos ciclos recursivos, identificados durante a análise qualitativa dos Subsistemas, o que traz segurança o suficiente para que seja dada procedência ao uso do modelo.

3.8 USO DO MODELO

A sessão de teste e validação trouxe segurança e familiaridade com o modelo, agora pode ser dado início ao uso do modelo, para isso, vale resgatar o propósito do modelo de analisar os efeitos da política comercial da empresa sobre sistema de produção da conicalagem, que consistirá nas diretrizes das simulações subsequentes.

3.8.1 Análise Do Caso Base

Antes de caminharmos em direção ao propósito do modelo é válido observar o comportamento que ele exibirá no estado de equilíbrio, agora dando o tratamento devido às variáveis estocásticas. Este será o caso base da simulação e será utilizado como referência nos próximos ensaios.

Pelo Gráfico 16 pode-se observar o comportamento do sistema no estado de equilíbrio, é nítido o efeito das variáveis estocásticas quando comparado com o equilíbrio atingido durante a sessão de teste.

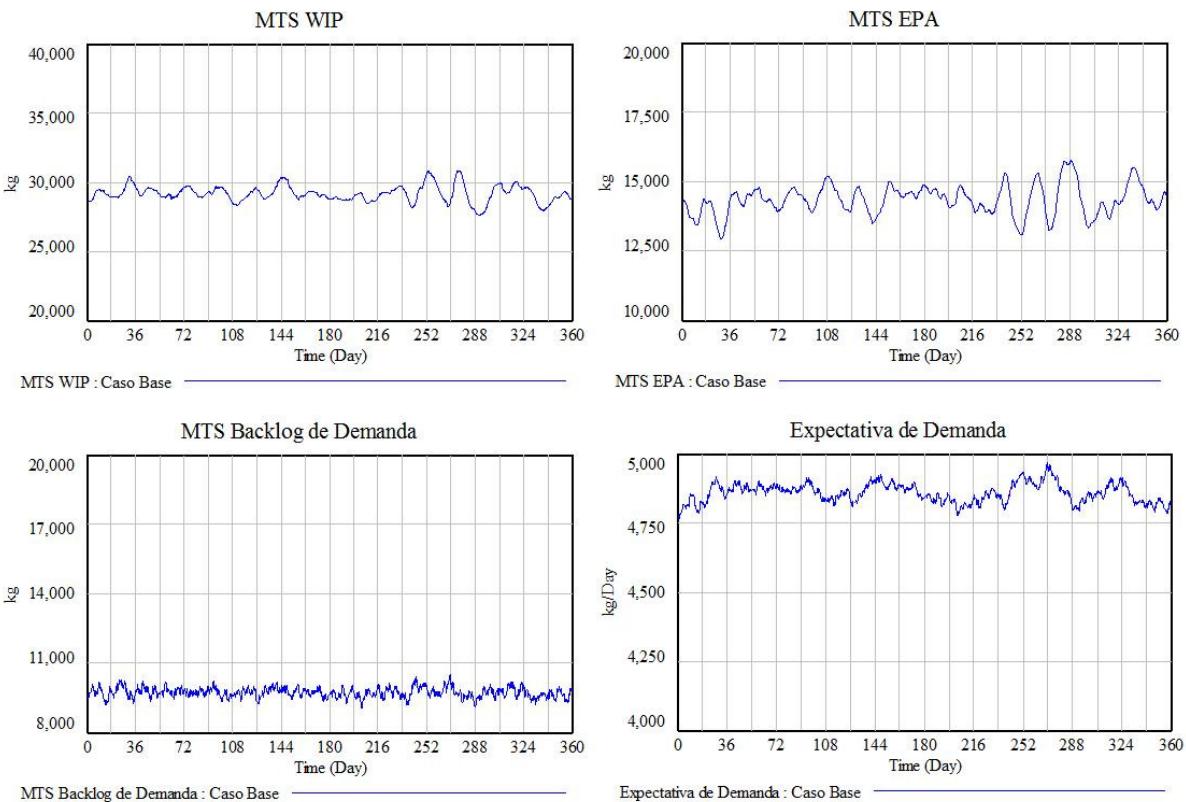


Gráfico 16: Variáveis de Estoque MTS no Caso Base

Apesar das tripidações no comportamento das variáveis de estado do Subsistema MTS, pode-se observar que o comportamento, observado de forma ampla, é estável. Uma das

fontes de variação do sistema será a demanda do sistema cujo perfil é exibido pelo Gráfico 17:

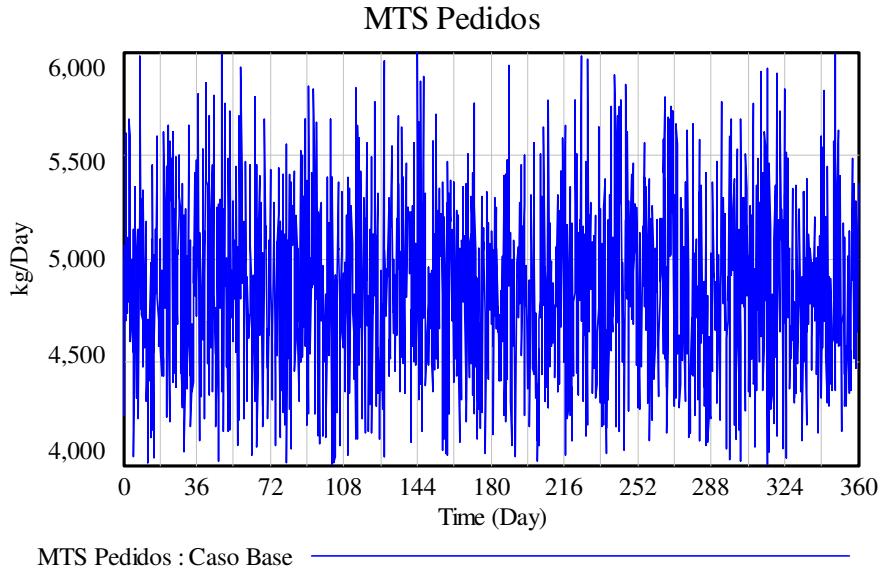


Gráfico 17: Perfil da Demanda MTS no Caso Base

Para o sistema MTO, como apresentado pelo Gráfico 18, pode-se notar que a variação é mais intensa, isso se deve ao fato de a estrutura de produção do sistema estar diretamente vinculada à demanda, uma das fontes de tripidação. No caso do sistema MTS o estoque de produto acabado e a previsão de demanda atuam como amortecedores do ruído estocástico, fazendo com que seu comportamento tenha uma variação mais tenua.

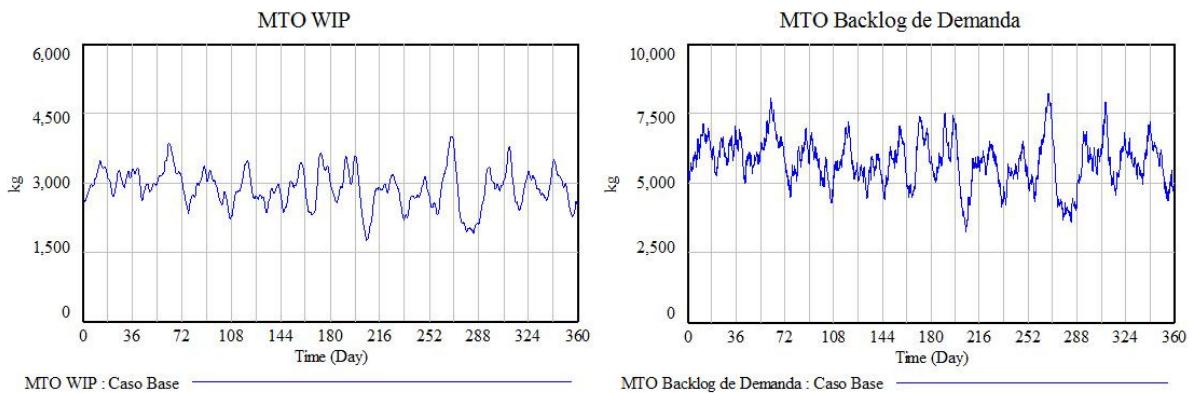


Gráfico 18: Variáveis de Estoque MTO no Caso Base

O Gráfico 19 exibe o perfil da demanda por produtos customizados do sistema MTO, a ampla oscilação se deve à distribuição geradora da demanda, a distribuição exponencial.

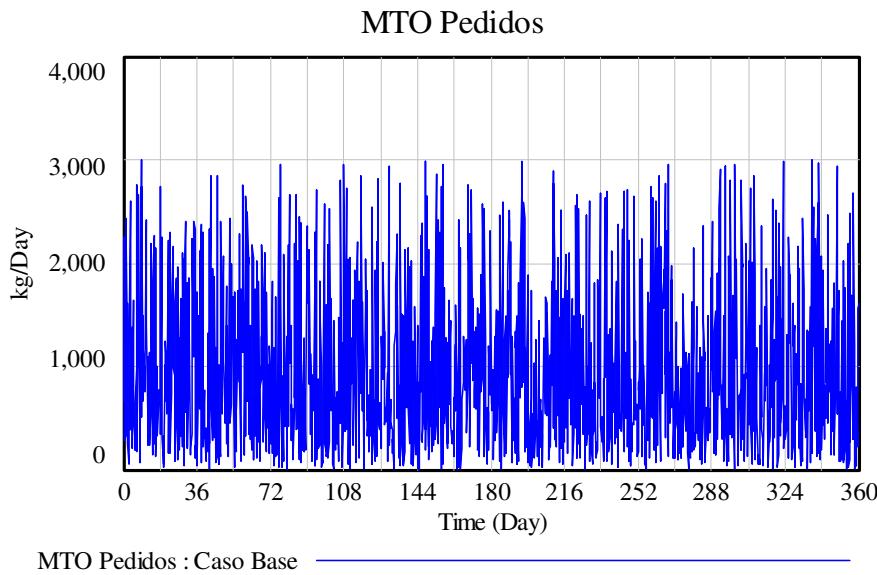


Gráfico 19: Perfil da Demanda MTO no Caso Base

3.8.2 Interação MTO – MTS

A venda de produtos customizados é um dos artifícios utilizados pela diretoria comercial para se aproximar de clientes, a diretoria observa o recebimento de pedidos customizados com bons olhos, visando fidelizar os clientes através do alto nível de serviço.

Para analisar os efeitos desta prática o modelo construído foi utilizado para simular um contexto onde a diretoria se exalta e eleva o volume de pedidos customizados aceites em 65%. Os efeitos da atitude da diretoria comercial sobre o Subsistema MTS podem ser observados pelo Gráfico 20:

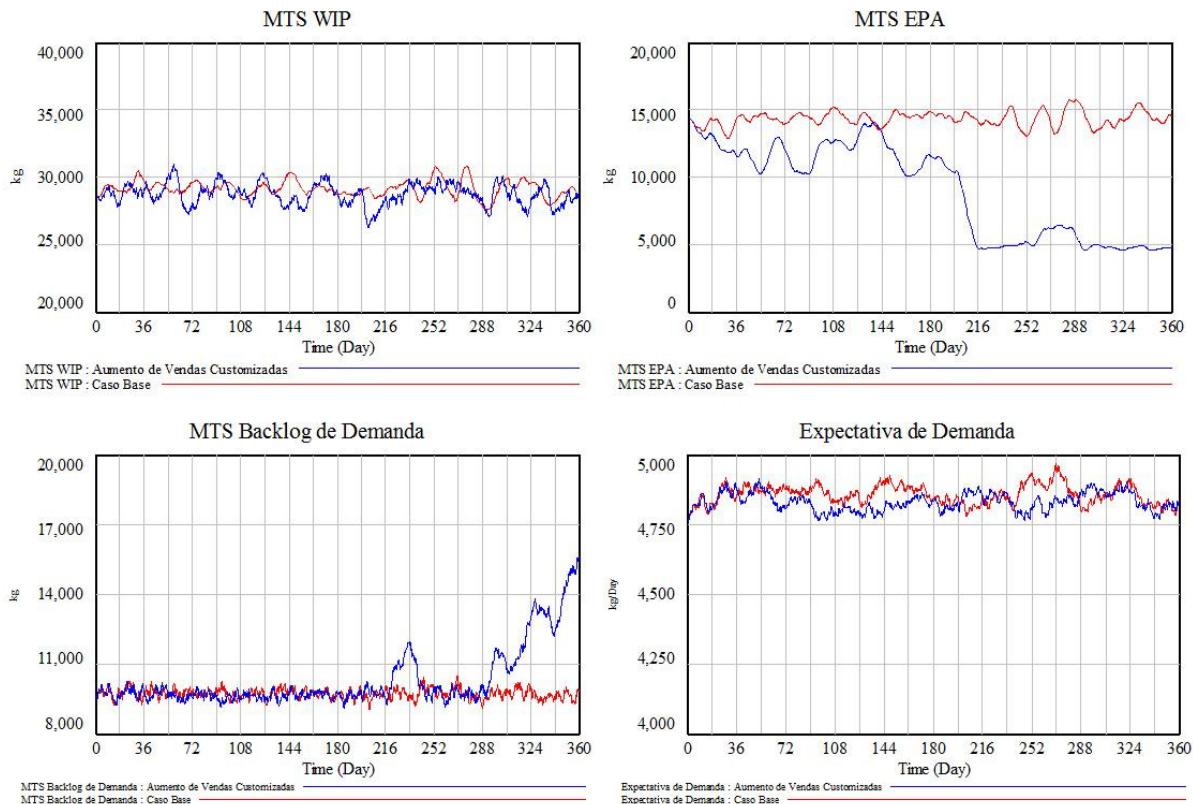


Gráfico 20: Variáveis de Estoque MTS em Aumento de Vendas MTO

A reação da variável de nível MTS fica bem próxima ao caso base, indicando que o processo de transformação fora pouco afetado pela mudança, entretanto, ao se observar o comportamento do MTS EPA, verifica-se uma queda ascendente do volume estocado até o final da simulação.

Os efeitos do baixo nível de estoque logo contaminam a carteira de pedidos, que passa a sofrer salto ao final da simulação. A expectativa de demanda indica que a demanda MTS ficou estável em relação ao caso base e não está relacionada com as anomalias observadas.

O Gráfico 21 exibe os elementos de decisão do Subsistema MTS, observa-se que o ajuste de estoque determinado cresce ascendudamente em relação ao caso base, deslocando também o valor de OP's desejadas. Esse comportamento indica que a estrutura de controle do Subsistema está exigindo um maior nível de produção para que o nível decrescente de estoques seja reposto, o sistema, entretanto, não responde às exigências da estrutura de controle, pois está limitado pela capacidade disponível.

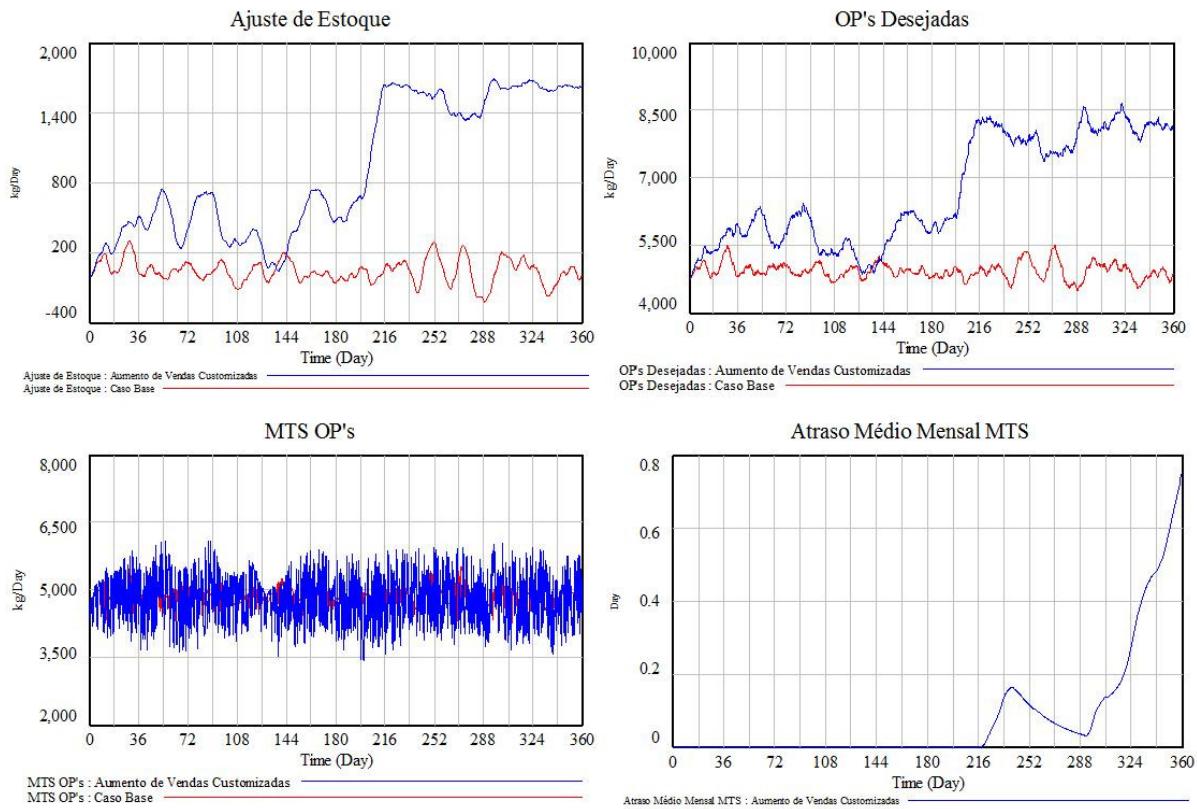


Gráfico 21: Reação do Subsistema MTS ao Aumento de Vendas MTO

Os efeitos danosos da política comercial podem ser observados pelo crescimento do atraso médio mensal do sistema MTS, ele indica que o prazo promedito não será cumprido, desgastando a relação com os clientes que demandam produtos padronizados.

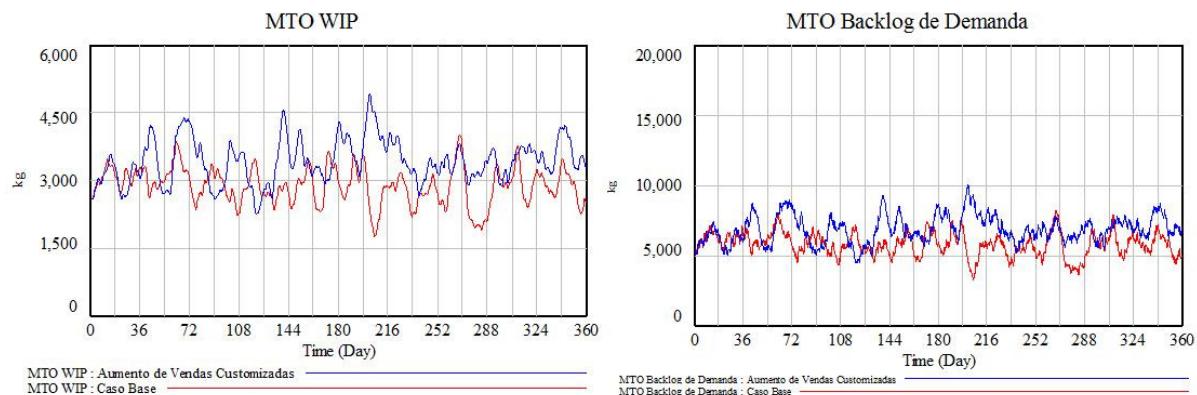


Gráfico 22: Variáveis de Estado MTO em Aumento de Vendas MTO

Já o comportamento do Subsistema MTO apresenta apenas um deslocamento para cima, decorrente do acréscimo nos pedidos customizados. Observa-se pelo Gráfico 22 que os fundamentos do comportamento do Subsistema MTO não apresentam mudanças.

O Gráfico 23 exibe o atraso médio mensal do Subsistema MTO, pode-se perceber que o comportamento do atraso é bem próximo do caso base, indicando que o Subsistema MTO não teve sua performance prejudicada.

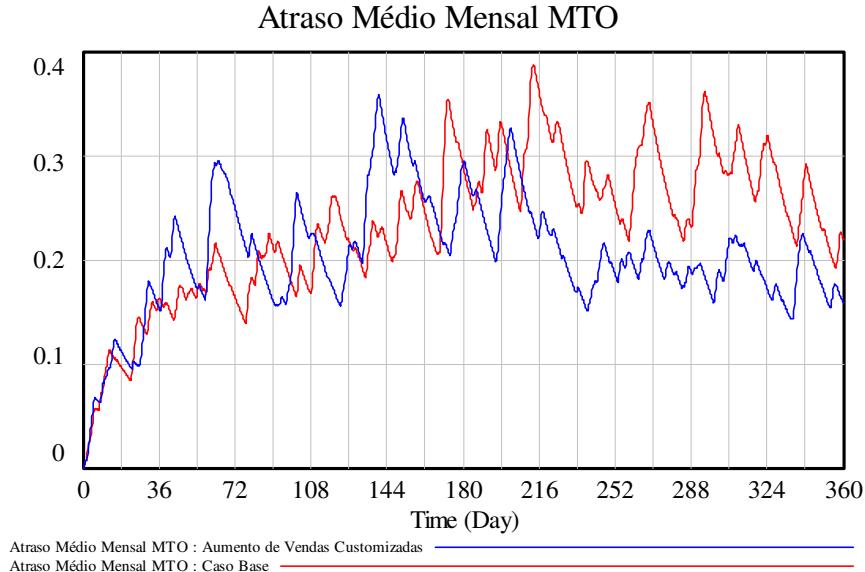


Gráfico 23: Consequência do Aumento de Vendas MTO ao Atraso Médio MTO

A análise indica que o movimento da diretoria comercial acaba prejudicando o Subsistema MTS, fazendo com que seu volume estocado diminua substancialmente, implicando acumulos na carteira de pedidos e incidência de atrasos, concomitantemente a estrutura de produção preserva o comportamento do caso base, apesar da pressão dos elementos de controle pelo aumento da produção.

O cenário analisado encaixa-se em um caso típico de problema sistêmico, a intervenção da diretoria comercial sobre o Subsistema MTO tem como objetivo elevar o nível de serviço aos clientes, entretanto a relação sistêmica entre os Subsistemas MTO e MTS faz com que tal intervenção prejudique o Subsistema MTS, reduzindo o nível de serviço do Subsistema responsável pelo atendimento de 80% da demanda da companhia.

3.8.3 Sazonalidade na Demanda MTS

Outro caso interessante para investigação é a oscilação na demanda MTS, a indústria de linhas possui dois picos de demanda no ano, o primeiro na passagem do primeiro para o segundo trimestre do ano, decorrente do aumento de fabricação de malhas para o inverno, e o segundo na passagem do terceiro para o quarto trimestre, decorrente do aquecimento de consumo no final do ano.

Para representar a sazonalidade à média da distribuição receberá um tratamento periódico, que pode ser facilmente obtido com o auxílio de funções trigonométricas. O Gráfico 24 exibe a demanda sazonal frente à demanda estável do caso base.

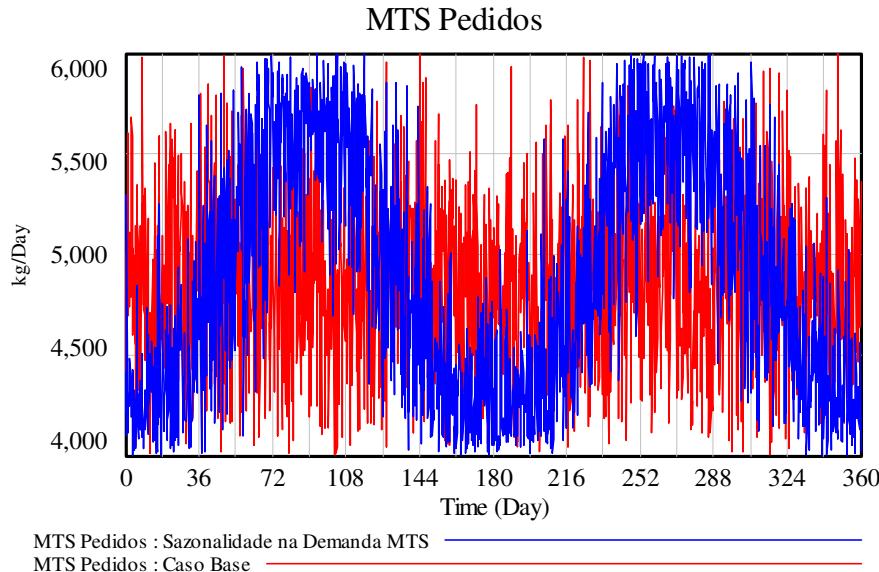


Gráfico 24: Perfil da Demanda Sazonal MTS

Inicialmente será analisada a reação do Subsistema MTS à oscilação de demanda, com o auxílio das variáveis de estado exibidas no Gráfico 25:

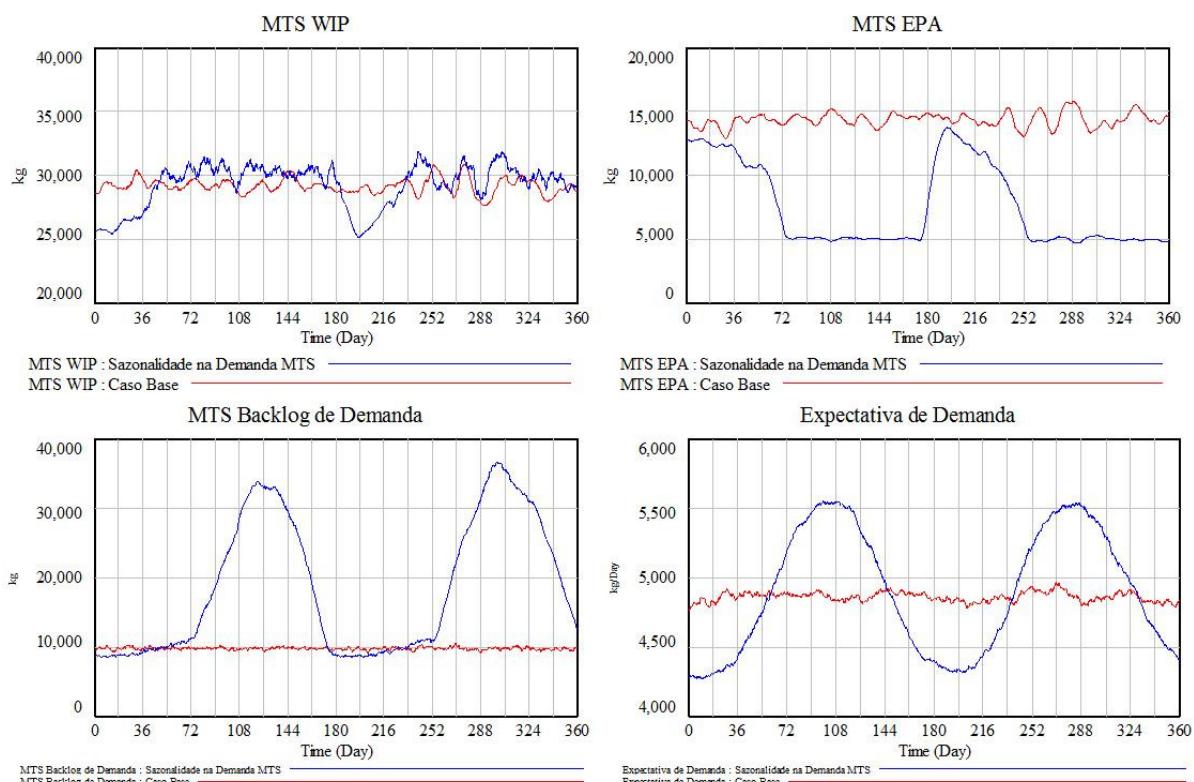


Gráfico 25: Variáveis de Estoque MTS em Demanda Sazonal MTS

Pelo nível de WIP pode-se ver o sistema se ajustando nos vales de demanda e voltando ao nível do caso base nos picos, de maneira defasada o nível de estoques tem seus vales durante os picos de demanda, se reajustando ao caso base nos vales de demanda, ao passo que os pedidos em aberto se acumulam nos picos de demanda e voltam à normalidade nos vales.

O efeito da sazonalidade sobre a performance do sistema fica nítido ao se observar o atraso médio mensal do Subsistema MTS, o Subsistema perderá os prazos de entrega nos picos de demanda, mantendo a puntualidade apenas nos vales.

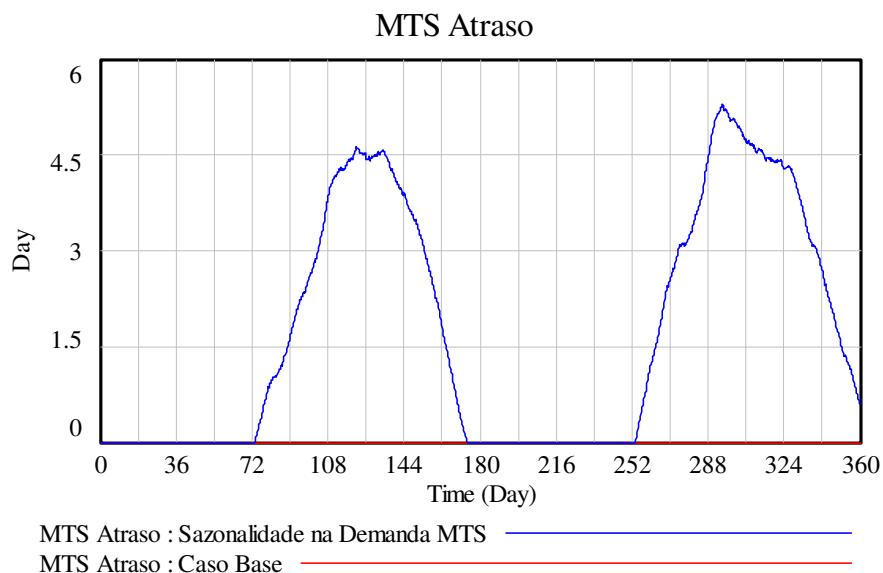


Gráfico 26: Consequências da Demanda Sazonal MTS

Novamente o Subsistema MTS sofre das limitações de sua estrutura produtiva, ficando incapacitado manter um desempenho satisfatório.

3.8.3.1 Combatendo a Sazonalidade com Estoques

Apesar de o modelo indicar que o Subsistema MTS terá seu desempenho prejudicado em ambos os casos analisados, a prática operacional da Bonfio indica o contrário, o Subsistema MTS real é capaz de atender à demanda mesmo em casos de oscilação, contrariando o comportamento do modelo.

Na verdade o fato contraditório ocorre, pois o sistema real opera em condições distintas das empregadas nas simulações anteriores. Para se proteger de choques de demanda e rupturas de capacidade a Bonfio vem acumulando um alto nível de estoque de produto acabado, produzido tanto em hora-extra quanto em períodos de baixa demanda. Nessa prática está a fonte do sintoma observado pelo autor durante o levantamento do problema, e foi uma das motivações para o desenvolvimento do trabalho.

Para recuperar a credibilidade do modelo será rodada uma simulação representando a prática da Bonfio, a constante de estoque de segurança do Subsistema MTS fora multiplicada por quatro vezes, formando-se um amortecedor mais robusto. Os resultados do comportamento do Subsistema podem ser observados no Gráfico 27:

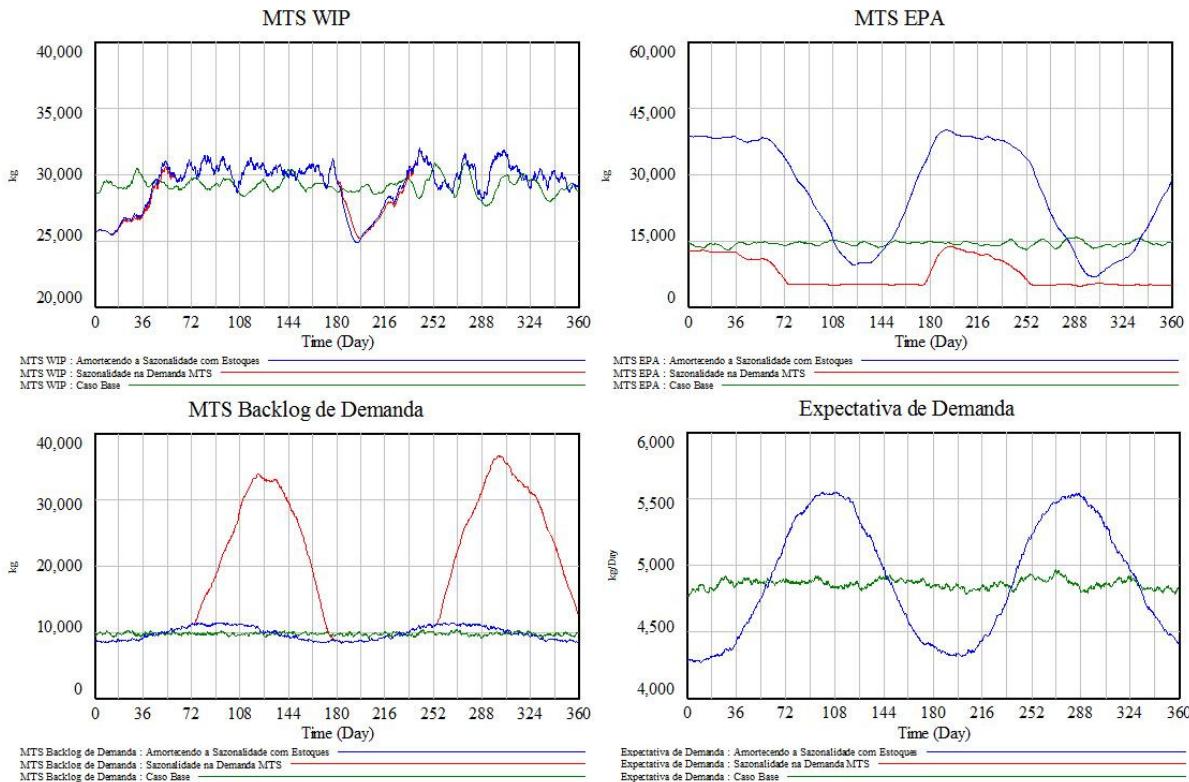


Gráfico 27: Variáveis de Estado MTS com Amortecimento da Sazonalidade por Estoques

O comportamento do nível de WIP não se altera, indicando que o efeito da limitação de capacidade permanece, já o nível de estoques sofre um forte deslocamento para cima, se aproximando do caso base apenas nos picos de demanda.

O resultado do amortecimento pelos estoques é eficaz, observa-se que os pedidos em aberto ficam próximos do caso base, bem distantes do cenário sem amortecimento, o que é refletido pelo indicador de performance atraso médio mensal do sistema MTS, exibido pelo Gráfico 28.

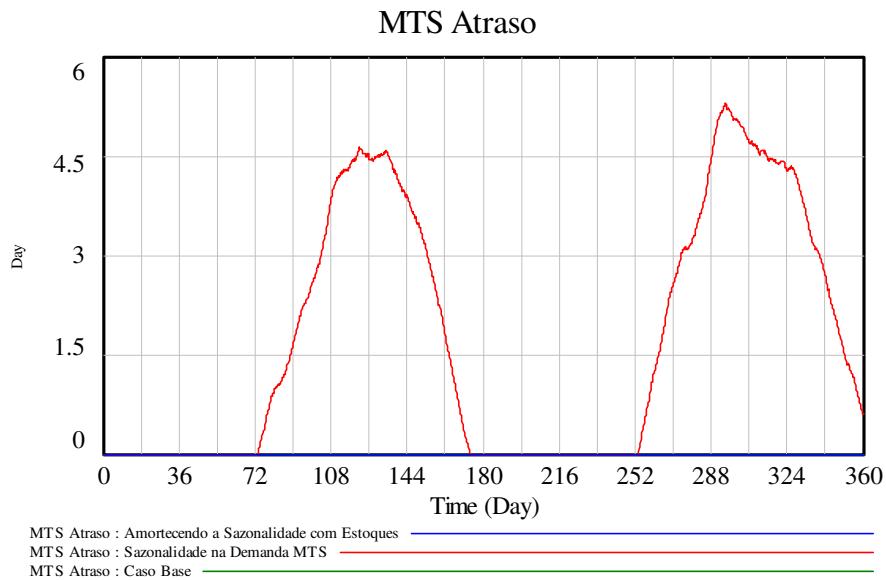


Gráfico 28: Consequência do Amortecimento por Estoques

3.8.3.2 Amortecimento da Sazonalidade por Capacidade

Compreendido o estado do sistema real da Bonfio, é válido investigar soluções alternativas para a mesma questão. Agora o amortecedor de estoques é removido voltando ao nível do caso base, entretanto são liberadas as amarras da estrutura de produção, através do aumento da capacidade máxima de processamento do sistema em 30%.

Os resultados são exibidos pelo Gráfico 29:

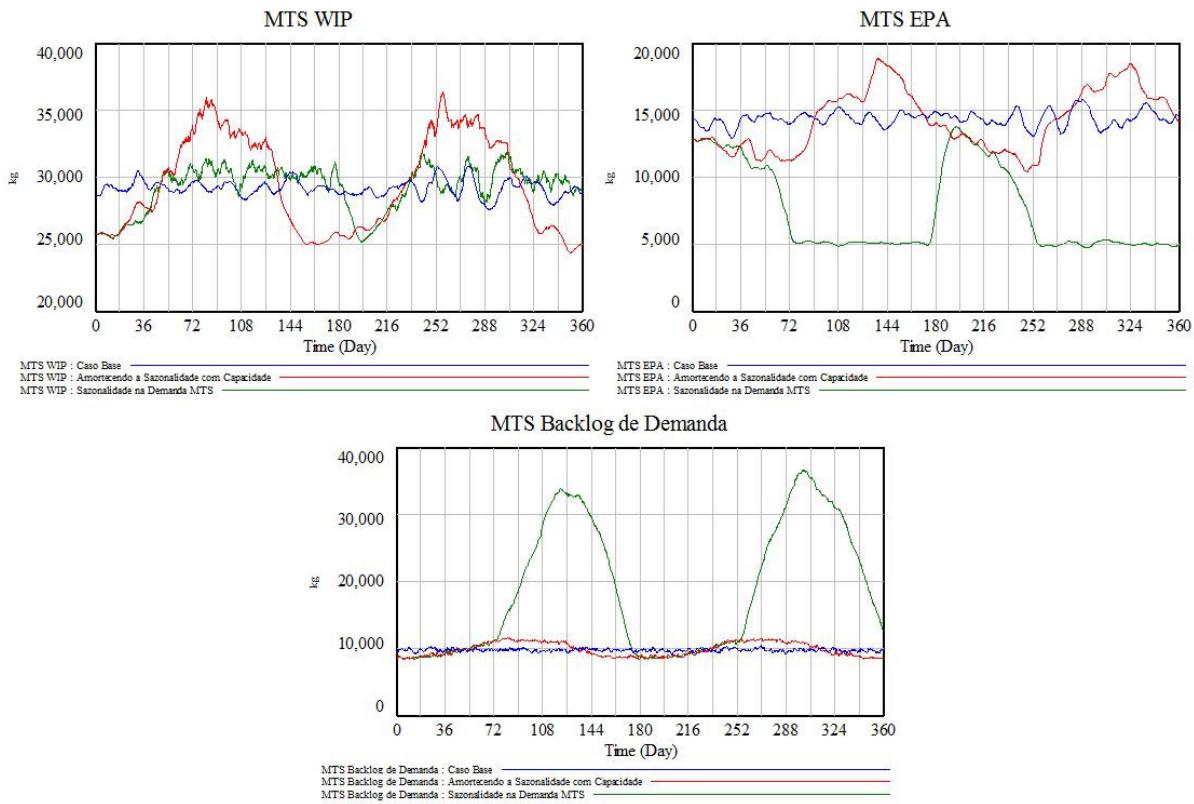


Gráfico 29: Variáveis de Estoque MTS com Amortecimento de Sazonalidade por Capacidade

Observa-se que agora o nível de WIP “descola” do comportamento no caso base, acompanhando a oscilação da demanda. O nível de estoques oscila ao redor do comportamento do caso base, mantendo o mesmo nível apresentado no caso base.

Os pedidos em aberto ficam bem próximos ao caso base replicando o efeito do amortecimento por estoques, o que fica vizível também pela puntualidade do sistema, apresentada pelo Gráfico 30.

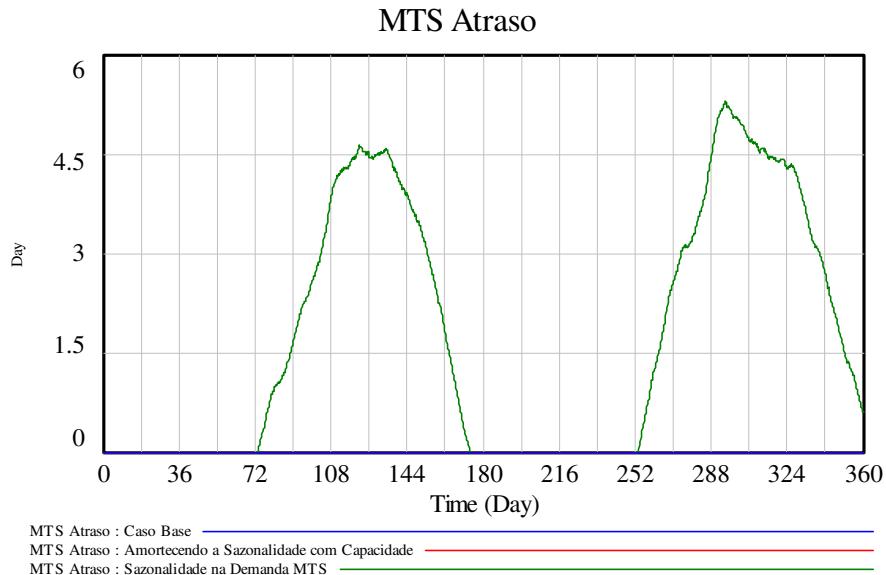


Gráfico 30: Consequências do Amortecimento por Capacidade

Como o estoque, a capacidade se mostrou também um eficaz recurso para combater as oscilações de mercado, podendo ser uma política alternativa à empregada pela companhia no presente.

3.8.4 Análise dos Prazos de Entrega

O prazo de entrega é outro parâmetro utilizado pela diretoria comercial para elevar o nível de serviço aos clientes, seus efeitos sobre o sistema de produção são mensurados pela análise a seguir.

Para a análise foram extendidos os prazos de entrega em ambos os Subsistemas, o prazo MTS foi dobrado, de dois para quatro dias, e o prazo MTO passou de seis para dez dias. O Gráfico 31 exibe os resultados do Subsistema MTS:

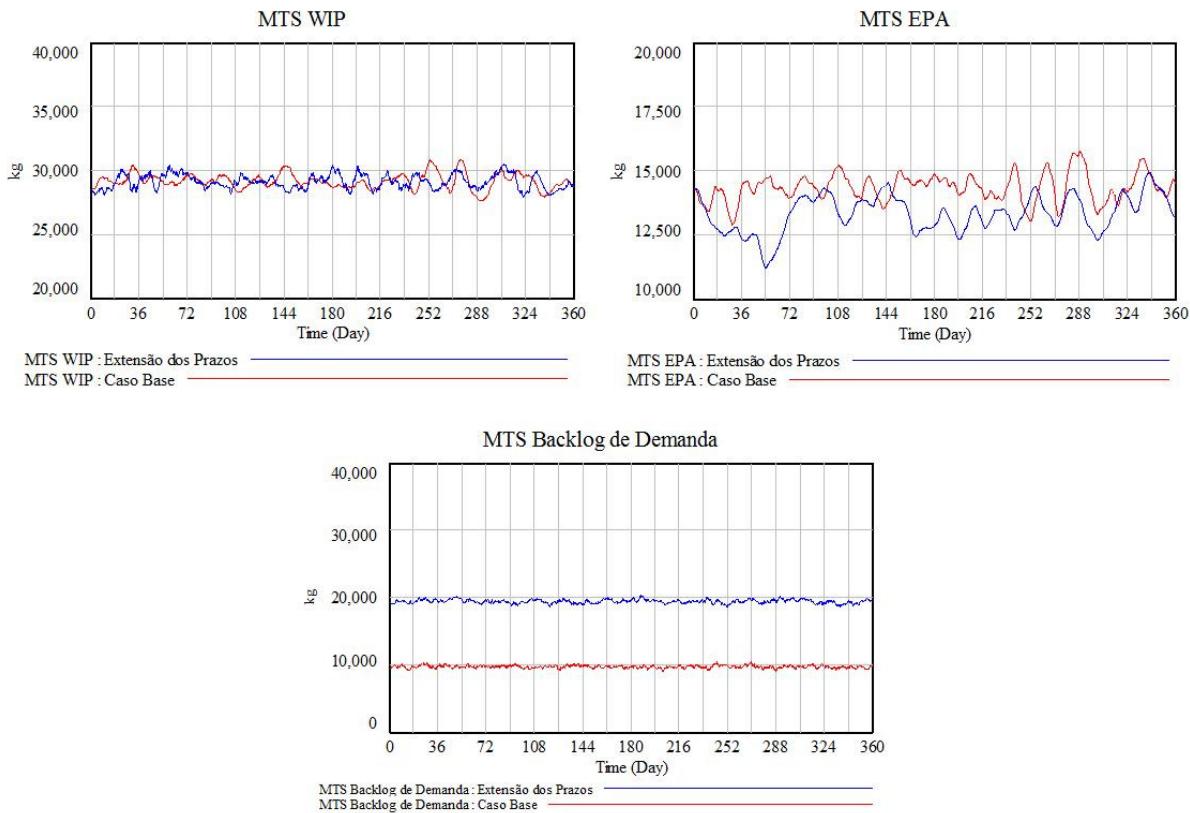


Gráfico 31: Variáveis de Estoque MTS com Extensão dos Prazos de Entrega

A mudança no nível de WIP é pouco vizível, indicando que não ocorrem benefícios na estrutura de manufatura, já os estoques têm um deslocamento para baixo indicando um ganho de desempenho com a nova política.

Mas é na carteira de pedidos que se localiza o maior impacto, pode-se observar que a empresa dobra o volume de pedidos em carteira sem que sejam necessários incrementos na estrutura de produção. Essa constatação sugere que, caso a empresa mantenha o mesmo volume de pedidos, seu sistema de produção poderá trabalhar com uma vazão menor de produtos, exigindo um menor nível de capacidade de processamento.

A mesma constatação é válida para o Subsistema MTO, como exibido do Gráfico 32:

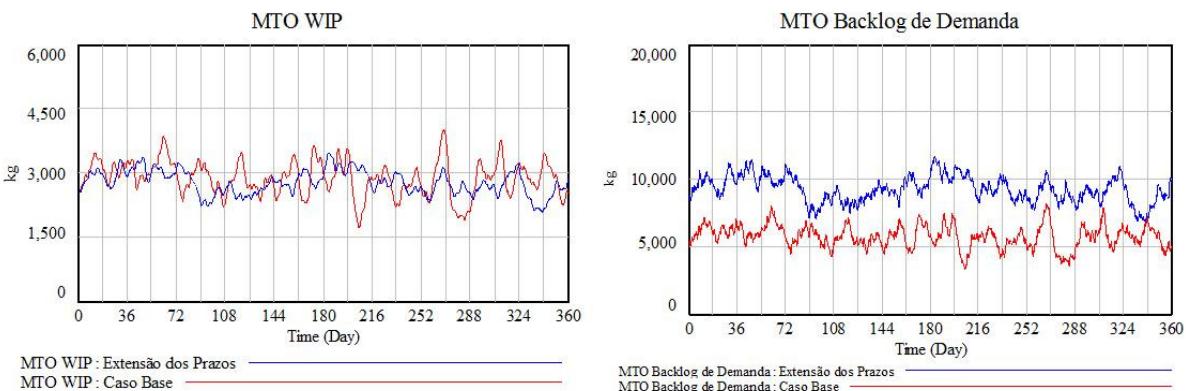


Gráfico 32: Variáveis de Estado MTO com Extensão de Prazos de Entrega

3.8.5 Eficiência Operacional

Um recurso importante para aliviar as pressões das políticas comerciais sobre o sistema de produção são as políticas de eficiência operacional, é interessante analisar sobre o sistema através de simulação. Para isso, os tempos de ciclo foram reduzidos pela metade nos dois Subsistemas, representando possíveis ganhos com redução de tempos de set-up, lead-times e tamanho de lotes. Os resultados podem ser observados pelo Gráfico 33 e pelo Gráfico 34:

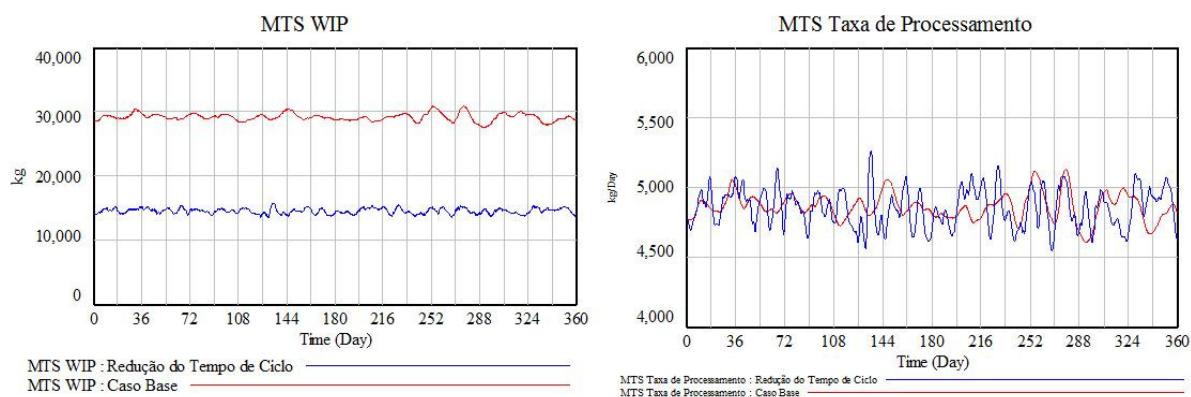


Gráfico 33: Efeitos da Eficiência Operacional no Subsistema MTS

Observa-se o efeito da nova política, pode-se constatar que o nível de WIP cai pela metade, apesar do sistema preservar a mesma taxa de processamento, o que indica que a mesmo desempenho pode ser mantido empregando-se a metade dos recursos.

O mesmo pode ser observado para o sistema MTO, que apresenta um ganho adicional, o sistema consegue trabalhar com um nível mais estável de WIP o que geraria um grande benefício para a gestão operacional, facilitando a atividade de planejamento e a implementação de novos programas de eficiência.

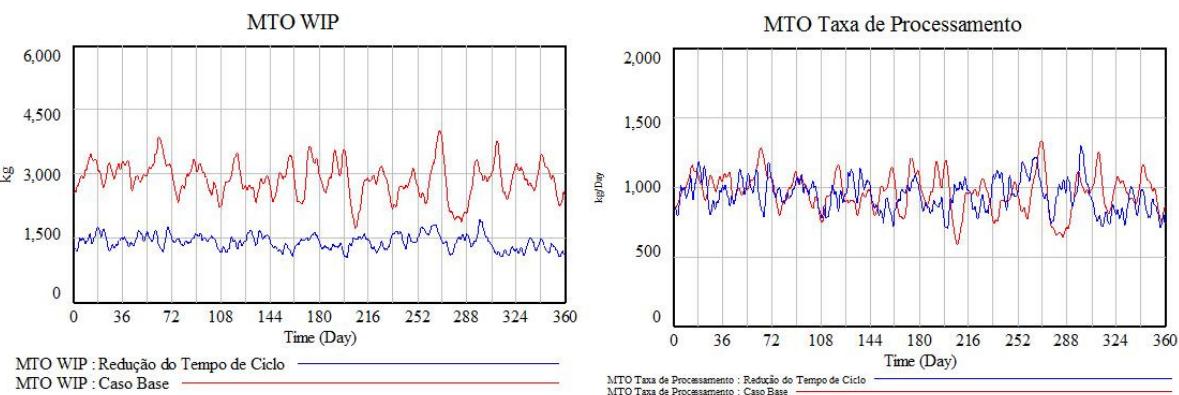


Gráfico 34: Efeitos da Eficiência Operacional Sobre o Subsistema MTO

3.9 CONCLUSÃO

O processo de construção do modelo torna evidentes os meios de interferência das políticas comerciais sobre o sistema de produção, a arquitetura com duas estratégias de manufatura, MTO e MTS, e os parâmetros de decisão utilizados pelo PCP.

Com o uso do modelo os efeitos de uma política comercial agressiva ficam claros, o sistema de produção no caso base já trabalha próximo de sua capacidade máxima de processamento, circunstância que ao adicionada à busca por um maior nível de serviço e às oscilações de mercado, acaba gerando uma sobrecarga sobre o sistema de produção.

Para equilibrar essa sobrecarga sofrida pelo sistema, a empresa antecipa o processamento de produtos gerando um volume expressivo de estoques, fato que pode ser verificado durante as visitas técnicas e simulado através do uso do modelo. Tal análise permite a conclusão de que o baixo desempenho do sistema é na verdade o preço a ser pago pelas rígidas condições a que ele é submetido.

O modelo também permitiu que soluções alternativas fossem ensaiadas, abrindo a possibilidade de estoque de capacidade através de outros mecanismos além do estoque de produto acabado. Foi então demonstrado que a adição de capacidade, o relaxamento de prazos de entrega e a implementação de políticas de eficiência operacional podem ser recursos úteis para a expansão da capacidade do sistema, atuando como soluções alternativas ao estoque excessivo.

A construção dessa estrutura conceitual sólida esclarece os fundamentos dos problemas vividos pela empresa e funciona como um mapa para que os donos do problema possam observar os possíveis caminhos para construir um sistema que sustente as exigências externas que está sendo submetido.

Os colaboradores da conicalagem têm agora uma ótima oportunidade para levantar, junto à diretoria comercial e a presidência executiva, uma discussão sobre novas políticas de produção, se apoiando sobre o modelo para projetar um sistema de produção capaz de atender às necessidades estratégicas da empresa, sem ter seu desempenho prejudicado.

3.10 SUGESTÕES

O processo de modelagem por Dinâmica de Sistemas é um processo cíclico, as primeiras iniciativas de busca de conhecimento sempre apontam a novas perguntas e podem ser mais refinadas, assim o trabalho é encerrado com a indicação do que seriam os “próximos passos” para o processo de modelagem e para a bordagem dos problemas da Bonfio.

O modelo consolida a família de produtos da Bonfio em apenas dois produtos, essa hipótese afeta negativamente o desempenho do modelo e formas de refinar o modelo para a representação dos efeitos da ampla família de produtos seriam bem-vindas.

Outra potencial melhoria seria a expansão das fronteiras do modelo para que as variáveis exógenas sejam tratadas como endógenas. Uma das alternativas seria internalizar as decisões comerciais, impostas externamente por esse trabalho, que passariam a ter seu comportamento determinado internamente.

As variáveis estocásticas empregadas no modelo tiveram seu perfil levantado com base no relato qualitativo dos funcionários da empresa, uma mensuração quantitativa do perfil das variáveis pode trazer maior precisão ao modelo, além disso, variáveis que estão sendo tratadas de forma determinística, como os tempos de ciclo, podem possuir caráter estocástico cujo efeito sobre o comportamento do sistema seja significativo, dessa forma essas variáveis devem ser tratadas como estocásticas.

Um dos problemas apontados pelo trabalho é a dicotomia capacidade – estoques, para esse problema e outros problemas específicos apontados pelo modelo de DS é útil o emprego de outros métodos de modelagem, como modelagem discreta ou baseada em agentes, para atingir soluções específicas.

A fragmentação das bases de dados da companhia dificultou o próprio desenvolvimento do modelo e a compreensão do comportamento do sistema real, recomenda-se que a produção passe a coletar dados em nível mais agregado para possuírem uma visão holística do sistema de produção, a coleta de dados fragmentados é útil para as decisões cotidianas, porém inibe o aprendizado sobre o comportamento do sistema.

4 BIBLIOGRAFIA

ACKOFF, R. **Systems Thinking and Thinking Systems.** Systems Dynamics Review 10(2-3) 175-188, 1994.

ARNOLD, J.R. Tony **Administração de materiais: uma introdução;** tradução Celso Rimoli, Lenita R. Esteves. – 1. Ed. – 6. Reimpr. – São Paulo: Atlas, 2006.

CLAUSEWITZ, C. Von. **On War.** Princeton, NJ: Princeton University Press, 1989.

DRUCKER, P. F. **The Emerging Theory of Manufacturing.** Harvard Business Review, May-June:94-102.

FORRESTER, J. **Principle of Systems.** Cambridge, MA: Wright-Allen Press, Inc., 1968.

FORRESTER, J. **Industrial Dynamics.** Cambridge, MA: MIT Press, 1961.

HOPP, W.J.; SPEARMAN, M.L. **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management.** Boston: Irwin/Mcgraw-Hill, 2001.

PRUYT, E.; DAALEN, C. VAN. **Continuous System Modelling.** Delft: Delft University of Technology Press.

STERMAN, J. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for aComplex World.** Boston: Irwin/Mcgraw-Hill, 2000.

APÊNDICE

Os arquivos do modelo utilizado para as simulações encontram-se em anexo no CD.