

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

MARCUS ANTÔNIO BUENO BORGES

**PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE GALVANIZADOS POR IMERSÃO
A QUENTE NA USIMINAS**

IPATINGA-MG

2016

PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE GALVANIZADOS POR IMERSÃO A QUENTE NA USIMINAS

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Otimização de Sistemas do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do grau de Especialista Otimização de Sistemas, área de concentração Gestão Industrial.

Orientador: Prof. Martín Gómez Ravetti

IPATINGA-MG

2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Borges, Marcus Antônio Bueno.

B732p Planejamento de produção diária de galvanizados por
imersão a quente na USIMINAS. / Marcus Antônio Bueno
Borges. – Belo Horizonte, 2016.
xi, 74f. : il.; 29 cm.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de
Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientador: Martín Gómez Ravetti

1. Computação. 2. Aço galvanizado. 3. Controle de
produção. 4. Controle de custo. 5. Otimização combinatória.
I. Orientador. II. Título.

CDU 519.6*61(043)



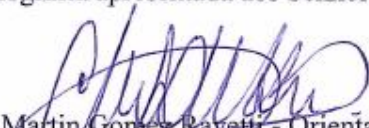
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

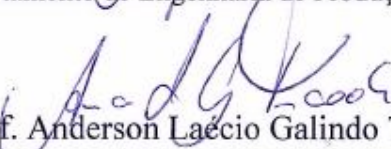
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM OTMIZAÇÃO DE SISTEMAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO INDUSTRIAL

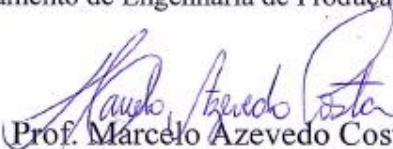
PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE GALVANIZADOS POR IMERSÃO A QUENTE NA USIMINAS

Marcus Antônio Bueno Borges

Monografia apresentada aos Senhores:


Prof. Martin Gomez Ravetti - Orientador
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG


Prof. Anderson Laécio Galindo Trindade
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG


Prof. Marcelo Azevedo Costa
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

Belo Horizonte, 07 de dezembro de 2016

Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por sempre ter me dado força e saúde, permitindo assim, a realização deste trabalho.

Para a realização deste trabalho foi essencial à colaboração dos funcionários da empresa estudada. Gostaria de agradecer aos colegas do PCP e da Gerência Técnica da Unigal que deram apoio total, sendo fundamental para realização do trabalho.

Gostaria também de agradecer ao professor Martín pelo tempo disponibilizado para me orientar, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho e pela confiança que depositou em mim.

Gostaria de agradecer à minha família em especial minha esposa Vanessa por todo apoio, incentivo nas horas difíceis e compreensão não somente durante a elaboração deste trabalho, mas também durante todos os dias que tive que ausentar para assistir as aulas.

Resumo

Neste trabalho é estudado um problema de sequenciamento de produção com setup em máquina simples das linhas de galvanização por imersão a quente com foco em otimizar o sequenciamento da produção em dias. A principal característica desse processo de produção é que as linhas em questão produzem apenas dois tipos de produtos e processam apenas um tipo de produto por vez, porém, o tempo de setup é alto, mas, além disso, o sequenciamento atual da demanda de produção não leva em consideração impactos de custo. Durante as pesquisas de campo, foi possível observar que não existe um sistema de apoio para elaboração da programação da produção, sendo feita por planilhas preenchidas manualmente. O objetivo é disponibilizar para o analista do planejamento e controle da produção uma ferramenta que o auxilie nesta tarefa através de um modelo matemático que capture as características que influenciam nas decisões da programação da produção de forma a realizar um sequenciamento da demanda de produção que minimize o custo e priorize o prazo de entrega. Foi utilizado o AMPL que é uma linguagem de modelagem algébrica combinado com o solver CPLEX como ferramentas auxiliares no desenvolvimento do simulador. Os resultados mostram que o modelo proposto fornece solução ótima em todos os cenários apresentados e que é possível realizar um sequenciamento da demanda de produção cujo objetivo não seja simplesmente distribuir a demanda em dias respeitando as disponibilidades, mas também considere os custos envolvidos no processo.

Palavras-Chaves: sequenciamento de produção, modelo matemático, simulador e custo.

Abstract

In this work a problem regarding the production flow with simple machine set up of hot dip galvanizing line focusing in optimize the production sequences measured in days. The main characteristic of this production process is that both lines can produce only two types of products and only one type at a time, however, the set up time is high, besides the current way of production sequencing does not taking into account cost impacts. During the field surveys, it was possible to observe that there is no support system for the production scheduling, and it is done manually. The objective is to provide the production control planning analyst a tool to assist in this task through a mathematical model that captures the characteristics that influence the decisions of production scheduling in order to carry out a production demand sequencing that minimizes the cost and prioritizes the customer deadline. It was used the AMPL, that is an algebraic modeling language, combined with the CPLEX solver as auxiliary tools to develop the simulator. The results show that the proposed model provides an optimal solution in all the scenarios presented and that it is possible to carry out a production demand sequencing whose objective is not simply to distribute the demand in days respecting the availabilities, but also to consider the costs involved in the process.

Key Words: production flow, mathematical model, simulator and cost.

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxo de produção de galvanizados por imersão a quente	17
Figura 2 – Ilustração dos componentes do pote de zinco	18
Figura 3 – Produto GI saindo do banho de zinco	19
Figura 4 – Fluxo de informações na cadeia hierárquica de três níveis de decisão ...	22

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Família por tipo de revestimento</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2 – Horas gastas para produção de uma tonelada (dados fictícios).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3 – Quadro de planejamento (dados fictícios).....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4 – Demanda em toneladas por produto, família e decêndio (dados fictícios)</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 5 – Custo do atraso (R\$/t) por produto e família (dados fictícios)</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 6 – Custo operacional (R\$/t) por produto e família (dados fictícios).....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 7 – Cenários utilizando o modelo matemático do item 3.3.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 8 – Demanda e capacidade acumulada dos cenários em análise por decêndio.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 9 – Resultado do modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos)</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 10 – Resultado do modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos)</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 11 – Resultado do modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos)</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 12 – Resultado do modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t).....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 13 – Resultado do modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 14 – Resultado do modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 15 – Resultado do novo modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 16 – Resultado do novo modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 17 – Resultado do novo modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 18 – Resultado do novo modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t)</i>	<i>44</i>

<i>Tabela 19 – Resultado do novo modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t).....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 20 – Resultado do novo modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t).....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 21 – Resultado computacional do modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 22 – Resultado computacional do modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 23 – Resultado computacional do modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 24 – Resultado do computacional modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 25 – Resultado do computacional modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t).....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 26 – Resultado do computacional modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t).....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 27 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 28 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 29 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos).....</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 30 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 31 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 32 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t).....</i>	<i>74</i>

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMPL	Ferramenta de modelagem de otimização
BARON	Solver (The Optimization Firm)
BRONER	Software para planejamento de produção avançado
CONOPT	Solver (ARKI Consulting & Development)
CPLEX	Solver (IBM Corporation)
CGL	Linha contínua de galvanização por imersão a quente
GA	<i>Galvannealed</i> – Revestimento com ligas zinco-ferro
GI	<i>Galvanized</i> – Revestimento de zinco puro
GUROBI	Solver (Otimização Gurobi)
HDG	Hot Dip Galvanizing – Aço galvanizado por imersão a quente
KNITRO	Solver (Ziena Optimization)
LGO	Solver (Pintér Consulting)
LOCAL	Solver (Innovation 24)
LOQO	Solver (Universidade de Princeton)
MINOS	Solver (Universidade de Stanford)
OV	Ordem de venda
PCP	Planejamento e controle da produção
SNOPT	Solver (Universidade de Stanford)
XPRESS	Solver (FICO)

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Objetivos	13
1.2. Justificativas e Contribuições	14
1.3. Organização do Texto	15
2. Referencial Bibliográfico.....	16
2.1. Processo de Galvanização por Imersão a Quente.....	16
2.2. Planejamento e Controle da Produção.....	20
2.3. AMPL	22
3. Estudo de Caso.....	24
3.1. Cenário Considerado	24
3.2. Procedimentos Metodológicos	25
3.3. Modelagem Matemática	30
3.4. Análise de Robustez do Modelo Matemático	33
3.5. Inclusão de Restrição.....	41
3.6. Modelo Final.....	47
4. Considerações Finais	48
5. Referencias Bibliográficas	50
Apêndice A – Tabelas dos Resultados Computacionais	52

1. Introdução

Diante do cenário competitivo em que vivemos, onde o foco é na satisfação das necessidades dos clientes que cada vez estão mais exigentes, as empresas buscam cada vez mais o aperfeiçoamento dos seus processos para manterem-se competitivas no mercado. Desta forma, o desenvolvimento de novos produtos e processos de acordo com a demanda tornou-se o desafio das organizações fazendo com que o Planejamento e Controle da Produção sejam uma ferramenta de cunho estratégico de competição, visto que sua gestão eficiente promove a conquista e sustentação de vantagens competitivas desde que bem clara a definição de onde a organização deseja agir (ANTUNES; SEHNEM; LIMA, 2014; NASCIMENTO et al., 2007).

Para se manter no mercado, produzir de forma otimizada visando redução de custos é essencial para qualquer empresa se manter no mercado, sobretudo em épocas de crise financeira como a que enfrentamos no momento. Desta forma, um desafio para essas empresas é utilizar programas de produção efetivos. Isto porque estes programas são muitas vezes estabelecidos manualmente e dependem de um profissional que possui um modelo matemático empírico para fazer o planejamento da produção baseado em sua experiência. Porém, é necessário um programa que leve em consideração a produção de diversas famílias, tipos de produtos, estoques, prazos e custos, ou seja, um modelo matemático que leve tudo isso em consideração permitindo de forma rápida a melhor solução possível.

Desta forma, para este trabalho, foram selecionadas duas linhas contínuas de produção de galvanização por imersão a quente, Galvanização nº 1 (CGL1) e Galvanização nº 2 (CGL2) com foco em otimizar a programação de produção.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é distribuir em dias a demanda planejada de uma linha de produção o que retrata um problema de sequenciamento de produção com setup em máquina simples das linhas de galvanização por imersão a quente, proporcionando uma ferramenta para auxiliar o planejamento de produção

com menor custo. Para alcançar esse objetivo as atividades a serem desenvolvidas são:

- Estudar o processo de produção de galvanizados por imersão a quente através de visita técnica para poder conhecer na prática como funciona o processo produtivo das duas linhas de produção selecionadas (CGL1 e CGL2).

- Conhecer os métodos atuais que o PCP utiliza para sequenciar em dias o plano de produção das CGLs através de reuniões.

- Propor um simulador para o analista do Planejamento e Controle da Produção (PCP) através de um modelo matemático que resolva o problema de sequenciamento de produção com setup em máquina simples das linhas de galvanização por imersão a quente e que capture as características que influenciam nas decisões da programação da produção de forma a realizar um sequenciamento que minimize o custo e priorize o atendimento do prazo de produto acabado que é a data limite para o produto ser finalizado dentro da empresa.

1.2. Justificativas e Contribuições

Dado o cenário atual do mercado de produção de aço, onde a exigência dos clientes está cada vez mais alta, realizar o planejamento de produção visando redução de custos e priorizando o prazo desejado do cliente tornará a Usiminas uma empresa mais competitiva no mercado siderúrgico.

Nas reuniões realizadas com o analista do PCP foi possível observar que não existe um sistema de apoio para elaboração da programação da produção. Essa programação é realizada manualmente em planilhas eletrônicas, com base na experiência do tomador de decisão e sem o auxílio de nenhum sistema de otimização.

O modelo matemático aqui proposto poderá colaborar na otimização dos custos envolvidos na produção, agilizar e sistematizar a programação da produção e ainda permitir análises de cenários e simulações com diferentes conjuntos de dados (previsões de demandas, limitações de capacidade, disponibilidade da linha, etc.), para que o tomador de decisão possa avaliar melhor as decisões a serem tomadas, minimizando os custos no sequenciamento da produção.

1.3. Organização do Texto

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre como funciona o processo de Galvanização por Imersão a Quente, algumas características desse processo e o delineamento do problema aqui estudado. Ainda neste capítulo, é apresentada a importância que tem o Planejamento e Controle da Produção no atual mercado que está cada vez mais exigente. No capítulo 3 é apresentado o cenário considerado e os procedimentos metodológicos para criação do modelo matemático. Ainda neste capítulo, é apresentada análise de cenários utilizando o modelo matemático. No capítulo 4 são apresentadas as conclusões do trabalho e os próximos passos.

2. Referencial Bibliográfico

2.1. Processo de Galvanização por Imersão a Quente

Este tópico descreve o processo de galvanizados por imersão a quente da Usiminas. A Galvanização é o processo pelo qual o aço laminado a frio ganha uma cobertura de zinco, ou de liga contendo zinco, realizado em torno de 450 °C (BATISTA, 2013; PARANHOS, 2002), cujo princípio é a proteção do aço contra a corrosão. Suas principais vantagens são alta resistência à corrosão atmosférica, boa aderência à pintura e adequado ao processo de soldagem (USIMINAS, 2016).

Dentre os principais segmentos dos materiais galvanizados por imersão a quente estão os setores automotivos, construção civil, distribuição, linha branca (eletrodomésticos) e tubos. Os aços HDG, devido às suas características superficiais, são utilizados em vários segmentos industriais como visto acima, mas se destaca na indústria automotiva. Esses produtos são usados em aplicações que exigem elevado grau de estampagem, facilidade de soldagem e de tratamento superficial antes da pintura (USIMINAS, 2016).

A indústria automobilística tem buscado cada vez mais os aços com revestimentos metálicos visando o aumento da resistência à corrosão atmosférica de seus produtos. O zinco demonstra ser suficientemente impermeável, dificultando a penetração de vapor de água e oxigênio e a chegada destes na superfície do metal. É exatamente por isso que o zinco se tornou um dos mais importantes revestimentos usados para proteger o aço da corrosão atmosférica, pois possui alta resistência à corrosão em diferentes ambientes, facilidade de ligação metalúrgica ao aço e a capacidade de proteger galvanicamente o aço (BATISTA, 2013; PARANHOS, 2010).

Os aços galvanizados por imersão a quente, conhecidos também como aços HDG, são produzidos em parceria com a Unigal Usiminas, uma joint venture criada em 1999 entre a Usiminas e a siderúrgica japonesa Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation (USIMINAS, 2016). O fluxo de produção de galvanizados por imersão a quente é visto na Figura 1.

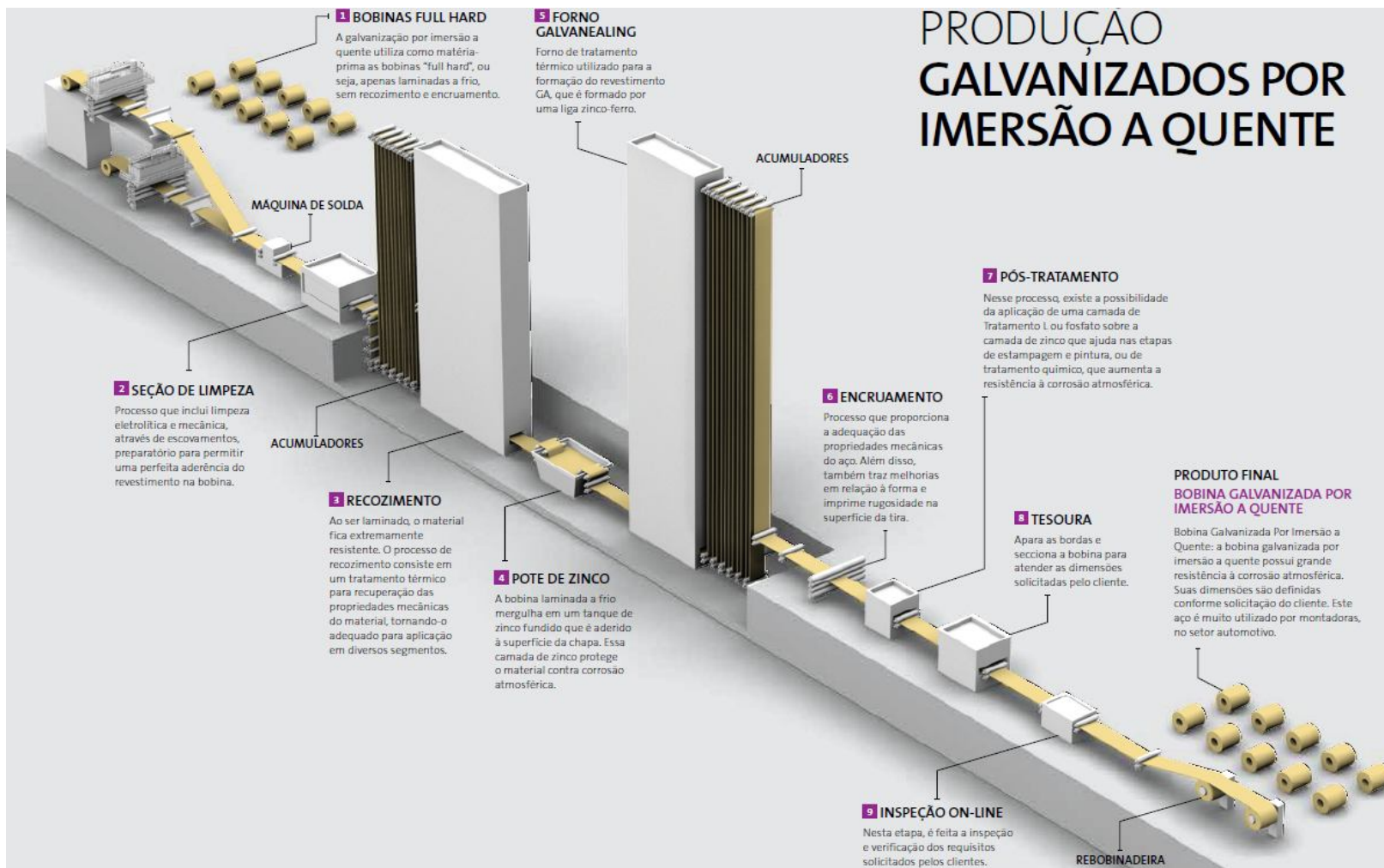


Figura 1 – Fluxo de produção de galvanizados por imersão a quente

Fonte: USIMINAS

O revestimento contempla na imersão da bobina em uma solução contendo zinco que contém alumínio para conferir aderência ao revestimento. O pote de zinco, item 4 da Figura 1, é visto com mais detalhes na Figura 2, onde é ilustrado os componentes do pote de zinco. Os componentes ilustrados são: 1) tira de aço, 2) rolo submerso, 3) rolo corretor, 4) rolo estabilizador, 5) controlador de revestimento e redutor de temperatura (USIMINAS, 2016).

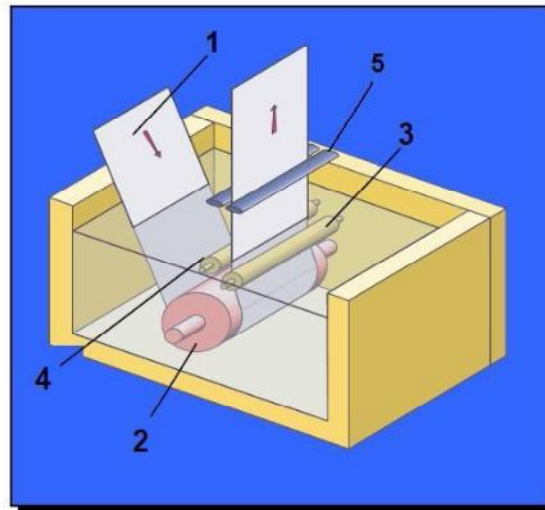


Figura 2 – Ilustração dos componentes do pote de zinco

Fonte: USIMINAS

A deposição do Zn pode formar dois tipos de revestimentos que são amplamente utilizados, o revestimento GI (*Galvanized* - Revestimento de zinco puro) e o revestimento GA (*Galvannealed* - Revestimento com ligas zinco-ferro). Os aços GI podem ser fornecidos com massa de revestimento metálico, soma das duas faces, variando de 80 g/m² a 600 g/m² e não possui tratamento térmico da camada de zinco. Os aços GA podem ser fornecidos com massa de revestimento metálico, soma das duas faces, variando de 60 g/m² a 140 g/m² e possuem tratamento térmico da camada de zinco (USIMINAS, 2016).

A porcentagem de ferro diminui nas camadas do revestimento, do substrato até a superfície, onde se tem zinco quase puro. Quando o material é retirado da caldeira e resfriado rapidamente ao ar ou a água, dependendo do tamanho, uma fina camada de zinco permanece sobre as ligas, atribuindo as características de brilho e

luminosidade do acabamento galvanizado. A Figura 3 mostra um produto GI saindo do banho de zinco. A espessura da camada de zinco varia com a velocidade de retirada do banho. (BATISTA, 2013; NEVISON, 1992; STRAVOS, 1987).



Figura 3 – Produto GI saindo do banho de zinco

Fonte: USIMINAS

A produção de GI ou GA é feita em lote, ou seja, a linha precisa ser configurada para produzir determinado produto e ao final de série ocorre substituição de alguns componentes como, por exemplo, o rolo submerso. Os materiais HDG são comercializados com espessura do produto variando entre 0,40 mm e 3,00 mm e largura entre 750 mm e 1.830 mm (USIMINAS, 2016).

2.2. Planejamento e Controle da Produção

Ao definir as metas e estratégias em um sistema produtivo, faz-se necessário formular planos para atingi-las, administrar os recursos humanos e físicos com base nesses planos, direcionar a ação dos recursos humanos sobre os físicos e acompanhar esta ação, permitindo a correção de prováveis desvios, sendo essas atividades desenvolvidas pelo planejamento e controle da produção (MUNHOZ, 2009; TUBINO, 2000). As atividades de planejamento e controle proporcionam os sistemas, procedimentos e decisões que conciliam os recursos da operação, os quais têm a capacidade de fornecer ao consumidor os produtos e serviços da operação. O planejamento e controle da produção devem garantir que os processos de produção sejam eficazes e que produzam os pedidos conforme requeridos pelo cliente, respeitando todos os prazos.

Em um momento de incerteza econômica, os principais desafios para as empresas de metais são a redução da demanda, fluxo de caixa e custos, o que colocou as empresas sob imensa pressão. Desta forma, o planejamento e controle da produção são fundamentais para que qualquer empresa possa continuar a entregar um serviço de alta qualidade para seus clientes e ao mesmo tempo reduzindo custos, respeitando o prazo do cliente, reduzindo o estoque, aumentando a produtividade e maximizando a receita (BRONER, 2016).

As decisões envolvidas no processo de planejamento foram classificadas em três categorias: planejamento estratégico, planejamento tático e controle operacional (MUNHOZ, 2009; ANTHONY, 1965).

No planejamento estratégico as decisões são tomadas nos níveis mais altos da administração, envolvem alto nível de investimento, têm implicações de longo prazo e são afetadas por informações internas e externas. As decisões são mais relacionadas ao estabelecimento de políticas de gestão e desenvolvimento de recursos para satisfazer os requisitos externos de forma consistente com os objetivos da organização. Essas decisões são muito importantes, pois define a posição competitiva da empresa no mercado, sua taxa de crescimento e podem determinar seu sucesso ou fracasso. Desta forma, um modelo para apoiar as decisões estratégicas, deve ter um amplo escopo, com horizonte de planejamento de longo prazo e reconhecer o risco e o impacto das incertezas das decisões.

No planejamento tático o processo de utilização dos recursos é o foco principal e possuem um horizonte de planejamento de médio prazo e a agregação de itens em famílias de produtos. As decisões mais comuns são de disponibilidade de mão de obra em horário normal ou hora extra, alocação de capacidade para famílias de produtos, formação de estoques sazonais, definição dos canais de distribuição e seleção de alternativas de transporte. Assim, os modelos que apoiam as decisões táticas são classificados como modelos de planejamento agregado.

No controle operacional as decisões possuem um horizonte de planejamento de curto prazo e são relativas aos problemas diários de operação e programação, requerendo assim, uma completa desagregação das informações geradas pelos níveis superiores. As decisões mais comuns são o próprio sequenciamento da produção, definição do tamanho de lote no nível de itens, atribuição de pedidos de clientes às máquinas, atividades de controle de estoque, expedição e processamento de pedidos. O principal problema de programação da produção é determinar quando, onde e quanto produzir.

A fim de ilustrar o exposto acima, a Figura 4 mostra as principais interações existentes entre os níveis estratégico, tático e operacional do esquema clássico hierárquico de tomada de decisão, proposto por (MUNHOZ, 2009; ANTHONY, 1965). Percebe-se que essas interações sugerem uma contínua e multidirecional troca de informações entre cada um dos níveis hierárquicos, permitindo que as decisões tomadas em um dado período de tempo, possam ser revisadas ou ajustadas, sempre que inconsistências na aplicação do plano de produção à sua realidade sejam detectadas.

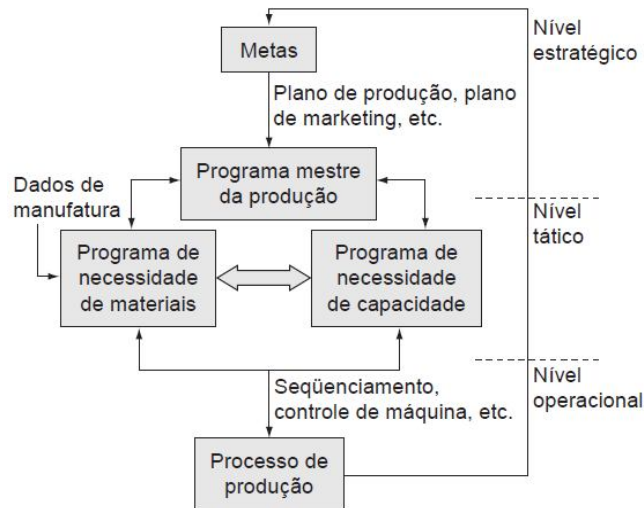


Figura 4 – Fluxo de informações na cadeia hierárquica de três níveis de decisão

Fonte: FILHO; CEZARINO, 2007

O mapeamento de itens ou produtos em famílias, clientes em mercados e fornecedores em grupos é um passo importante na implementação de um modelo de cadeia de suprimento para o planejamento estratégico e tático (MUNHOZ, 2009; SHAPIRO, 2001).

O Planejamento Agregado da Produção busca o dimensionamento dos recursos produtivos (mão de obra, equipamentos e materiais básicos), a fim de garantir que estes estarão disponíveis em quantidades adequadas e nos momentos adequados (ASSI, 2009; LUSTOSA; NANJI, 2008, p.103). Envolve a estruturação de um plano agregado que responda à previsão de demanda através de uma combinação de força de trabalho e níveis de estoques (ASSI, 2009; MENIPAZ, 1984, p.234). Em geral, o horizonte de planejamento varia de três meses a um ano (ASSI, 2009; NARASIMHAN; McLEAVEY; BILLINGTON, 1995, p.256).

2.3. AMPL

O sistema AMPL é uma sofisticada ferramenta de modelagem que suporta todo o ciclo de vida de modelagem de otimização: desenvolvimento, teste, implantação e manutenção. Usando uma representação de alto nível que represente modelos de otimização da mesma maneira que as pessoas pensam sobre eles, a

AMPL promove um rápido desenvolvimento e resultados confiáveis. A AMPL integra as seguintes linguagens:

- Uma linguagem de modelagem para descrever dados de otimização, variáveis, objetivos e restrições;
- Uma linguagem de comando para navegar modelos e analisar resultados;
- E uma linguagem de script para coletar e manipular dados e para implementar esquemas de otimização iterativos.

Todos usam os mesmos conceitos e sintaxe para simplificar a criação de aplicativos.

A AMPL não incorpora solvers, mas fornece interfaces para todos os melhores produtos de desenvolvedores de solvers concorrentes. Os solvers são classificados lineares clássicos, não-lineares clássicos ou alternativos que combinam várias abordagens.

Solucionadores lineares lidam com problemas de otimização quadrática e convexa quadrática em variáveis contínuas e inteiras. Os solvers disponíveis são: CPLEX (IBM Corporation), Gurobi (Otimização Gurobi) e Xpress (FICO).

Solucionadores não-lineares fornecem a maneira mais eficaz de encontrar soluções localmente, são ótimas para problemas que envolvem funções não lineares suaves (incluindo relações, polinômios, exponenciais e logaritmos e formas trigonométricas). Os solvers disponíveis são: CONOPT (ARKI Consulting & Development), KNITRO (Ziena Optimization), LOQO (Universidade de Princeton), MINOS (Universidade de Stanford) e SNOPT (Universidade de Stanford).

Solucionadores alternativos combinam uma variedade de abordagens para lidar com problemas de otimização que são difíceis devido a múltiplas soluções localmente ótimas, funções não lisas e discretas e / ou restrições altamente combinatórias ou lógicas. Os solvers disponíveis são: BARON (The Optimization Firm), LGO (Pintér Consulting) e LocalSolver (Innovation 24).

Para este trabalho, o CPLEX foi o solver selecionado, pois ele é o mais bem conhecido e mais amplamente utilizado solver em larga escala. Sua eficiência e robustez foram demonstradas ao longo de duas décadas em milhares de instalações comerciais em todo o mundo. O CPLEX suporta os problemas de otimização linear e quadrática em variáveis contínuas e inteiras.

3. Estudo de Caso

3.1. Cenário Considerado

No cenário atual, a distribuição da demanda mensal por dia é uma tarefa muito manual e depende muito da experiência do analista do PCP, pois ele precisa analisar diversos parâmetros como, por exemplo, o estoque, planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação, capacidade da linha, dentre outros, porém, o custo não é considerado em momento algum para realização desta distribuição. Além disso, após realização da primeira versão da distribuição do planejamento de produção diário, alguns cenários mudam, com isso, o analista do PCP precisa refazer tudo de novo e rápido, porém, essa tarefa é manual.

Desde Julho/2006 a Usiminas adotou a solução da Broner Metals que é líder mundial no fornecimento de Planejamento de Produção Avançado, Programação, Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos e Sistemas de Execução da Manufatura que são desenvolvidos especificamente para gerenciar as complexidades da produção de aço e alumínio (BRONER, 2016).

Atualmente, após analisar todos os parâmetros de entrada planejados, material em estoque ou em processo (Material aguardando CGL), as Ordens de Vendas (OV) em carteira e a previsão de vendas, a solução Broner informa a demanda prevista para o mês. Os materiais em estoque ou em processo já estão em fluxo de produção aguardando processo nas CGLs. As OVs em carteira são as ordens de venda que já possuem planejamento de produção e estão no fluxo de produção ou não, porém, já possuem rota prevista nas CGLs incluindo o prazo de produto acabado, que é a data limite para o produto ser finalizado dentro da Usiminas. Por fim, a previsão de vendas é um volume histórico que pode ser acrescentado no planejamento de produção.

De posse do planejamento mensal fornecido pela solução Broner, o analista do PCP distribui esse planejamento mensal em dias, baseando-se na capacidade do equipamento, planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação, limites de estoques intermediários e sua experiência para distribuir o plano manualmente. Foi possível observar que não existe nenhuma outra ferramenta para

esta atividade além de planilhas do Excel e os custos de operação ou custos de atraso não são considerados.

Desta forma, torna-se necessário a criação de uma ferramenta que realize a distribuição da demanda mensal em dias de forma automática e que considere todos os parâmetros envolvidos, visando agilidade na definição dos planos, mesmos que algum parâmetro sofra alteração no decorrer do mês. Esta ferramenta poderá ser utilizada para simulação de diversos cenários, visando produtividade ou redução de custos.

3.2. Procedimentos Metodológicos

Como o intuito é disponibilizar para o analista do PCP uma ferramenta que auxilie na distribuição da demanda mensal de produção em dias, foi necessário acompanhar como essa atividade é realizada. O presente trabalho atuou com todas as informações reais, porém, para fins acadêmicos, os dados a seguir são fictícios.

Foi observado que a demanda planejada pode ser estratificada em quatro famílias e dois produtos conforme apresentado na *Tabela 1*.

Tabela 1 – Família por tipo de revestimento

Produto	Família
GI	A
	B
	C
	D
GA	A
	B
	C
	D

Fonte: Autor do trabalho

Cada produto associado a uma família possui um ritmo de produção diferente, uns produzem com velocidade mais alta, outros com velocidade reduzida, desta forma, foi preciso consultar a produtividade padrão (toneladas / hora) de cada produto/família para conhecer o ritmo de cada material. De posse desses dados, foi

consultado o volume médio de saída em toneladas, juntamente com o tempo médio de operação de cada produto/família para obter a quantidade de horas que cada uma gasta para produzir uma tonelada (*Tabela 2*).

Tabela 2 – Horas gastas para produção de uma tonelada (dados fictícios)

Produto	Família	Horas Gastas para Produção de uma tonelada
GI	A	0,0200
	B	0,0160
	C	0,0160
	D	0,0260
GA	A	0,0190
	B	0,0190
	C	0,0170
	D	0,0300

Fonte: Autor do trabalho

Baseado nas horas gastas para produção de uma tonelada de cada produto/família, o modelo matemático consegue distribuir a demanda em dias, porém, é preciso respeitar o tempo disponível de cada dia. O tempo disponível é calculado baseado no tempo calendário subtraindo o planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação da linha. Na *Tabela 3*, pode ser observado os planejamentos de paradas em horas dia a dia e no exemplo em questão, percebe-se que o mês possui 744 horas em seu tempo calendário, 74 horas de planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação sobrando assim, 670 horas disponíveis para operar.

Outro item a ser considerado no planejamento que também pode ser observado na *Tabela 3* é a configuração da linha, pois como dito anteriormente, a produção de GI ou GA é feita em lote, ou seja, a linha precisa ser configurada para produzir determinado produto e esse setup gasta em média quatro horas. Para efeitos didáticos, foi adotado o valor de R\$30.000,00 para cada setup realizado, levando em consideração as trocas de rolos e o custo da hora parada. Como esse tempo é longo e sistêmico, na maioria das vezes, as paradas programadas da manutenção são realizadas em conjunto com esse setup da linha.

Tabela 3 – Quadro de planejamento (dados fictícios)

Dia	Tempo Calendário (h)	Planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação (h)	Tempo Disponível (h)	Configuração da Linha		Setup
				GI	GA	
1	24	24	0	1	0	0
2	24	24	0	1	0	0
3	24	0	24,00	0	1	1
4	24	0	24,00	0	1	0
5	24	0	24,00	0	1	0
6	24	0	24,00	0	1	0
7	24	4	20,00	1	1	1
8	24	0	24,00	1	0	0
9	24	0	24,00	1	0	0
10	24	0	24,00	1	0	0
11	24	0	24,00	1	0	0
12	24	0	24,00	1	0	0
13	24	0	24,00	1	0	0
14	24	0	24,00	1	0	0
15	24	3	21,00	1	0	0
16	24	0	24,00	1	0	0
17	24	0	24,00	1	0	0
18	24	0	24,00	1	0	0
19	24	0	24,00	1	0	0
20	24	0	24,00	1	0	0
21	24	12	12,00	1	1	1
22	24	0	24,00	0	1	0
23	24	0	24,00	0	1	0
24	24	0	24,00	0	1	0
25	24	0	24,00	0	1	0
26	24	0	24,00	0	1	0
27	24	4	20,00	1	1	1
28	24	0	24,00	1	0	0
29	24	0	24,00	1	0	0
30	24	3	21,00	1	0	0
31	24	0	24,00	1	0	0
Total	744	74	670,00			

Fonte: Autor do trabalho

Referente à demanda, atualmente é separada somente por produto e família. O presente trabalho propõe adicionar mais uma quebra que é o decêndio (dez dias). Para isso, é analisar todas as OV's que já estão em carteira para descobrir o prazo de produto acabado de cada uma e alocá-las a um decêndio. O objetivo disso é o de configurar o modelo matemático para que a demanda seja distribuída respeitando o decêndio para o qual está previsto, desta forma, o atendimento ao cliente será respeitado e conseqüentemente reduzindo o custo do atraso. Nesta etapa de separar a demanda em decêndios vale a pena ressaltar que o material em estoque ou em processo (Material aguardando CGL) naturalmente é alocado no primeiro decêndio. Já o volume que ainda não está em carteira, ou seja, previsão de vendas será alocada no 3º decêndio. A *Tabela 4* mostra a demanda em toneladas por produto, família e decêndio onde o exemplo em questão possui uma demanda mensal de 38.000 toneladas para ser distribuída em dias. Outro comentário importante sobre a *Tabela 4* é que atualmente, o analista do PCP trabalha somente com a coluna "Total", a demanda por decêndio é proposta do presente trabalho.

Tabela 4 – Demanda em toneladas por produto, família e decêndio (dados fictícios)

Produto	Família	Demanda			Total
		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	
GI	A	0	3.300	1.200	4.500
	B	2.500	4.000	2.600	9.100
	C	4.300	4.000	2.100	10.400
	D	100	400	100	600
GA	A	4.700	0	4.600	9.300
	B	500	0	1.500	2.000
	C	500	100	1.500	2.100
	D	0	0	0	0
Total		12.600	11.800	13.600	38.000

Fonte: Autor do trabalho

O objetivo principal de separar a demanda em decêndios como dita acima é o de prover para o analista de PCP a possibilidade de realizar simulações com foco na redução do custo por atraso. Por mais que não seja aplicada uma multa por atraso, o mesmo gera um desconforto muito grande entre o cliente e a empresa, quebrando assim a confiança, acarretando insatisfação, enfraquecimento ou até mesmo

rompimento do relacionamento de compra e venda (CARVALHO, 2008). Pensando nisso, foi inserido no modelo uma tabela informando o custo do atraso por produto e família para que o analista do PCP possa realizar a priorização. A *Tabela 5* demonstra o custo do atraso (R\$/t) por produto e família que neste momento está fixo em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos.

Tabela 5 – Custo do atraso (R\$/t) por produto e família (dados fictícios)

Produto	Família			
	A	B	C	D
GI	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00
GA	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00

Fonte: Autor do trabalho

Outro custo a ser considerado é o custo operacional por toneladas de cada produto e família. Para isso, realiza-se o produto do custo de uma hora de produção da linha (R\$/h), pelas horas gastas para produção de uma tonelada de cada produto/família informado na *Tabela 2*. Para realização de simulação, estas informações serão úteis para o analista do PCP, pois todo o planejamento que ele realiza atualmente é baseado na capacidade, estoques intermediários, planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação, mas a parte de custos ainda não é analisada. A *Tabela 6* mostra o custo operacional (R\$/t).

Tabela 6 – Custo operacional (R\$/t) por produto e família (dados fictícios)

Produto	Família	Horas Gastas para Produção de 1 tonelada	Custo Operacional (R\$/t)
GI	A	0,0200	130
	B	0,0160	150
	C	0,0160	100
	D	0,0260	90
GA	A	0,0190	120
	B	0,0190	80
	C	0,0170	100
	D	0,0300	110

Fonte: Autor do trabalho

3.3. Modelagem Matemática

Neste capítulo é apresentado o Modelo Matemático para o problema de sequenciamento de produção com setup em máquina simples das linhas de galvanização por imersão a quente. Foi utilizado o AMPL que é uma linguagem de modelagem algébrica combinado com o solver CPLEX como ferramentas auxiliares no desenvolvimento do simulador. Considere a seguir os conjuntos, parâmetros e variáveis utilizados no modelo.

Conjuntos:

T	conjunto de dias do planejamento a ser considerado ($t \in T$)
J	conjunto de famílias (A, B, C ou D) ($j \in J$)
I	conjunto de produtos (GI ou GA) da família j ($i \in I_j$)
N	conjunto de decêndios (1, 2, 3) ($n \in N$)

Parâmetros:

p_t	somatório de horas de manutenção e horas de operação programadas no período t
r_{ti}	valor binário que indica o planejamento de produção do produto i a ser produzido no período t
w_t	valor binário que indica quando ocorre configuração para produção de outro produto no período t
h_{ji}	horas necessárias para produção de 1 tonelada da família j do produto i
d_i^{jn}	demanda em toneladas da família j no decêndio n de cada produto i
c_{ji}	custo operacional por tonelada (R\$/t) da família j do produto i
k_{ji}	custo de atraso de uma tonelada da família j do produto i
S	custo quando ocorre Setup

Variáveis:

$x_t^{ji} \geq 0$	produção em toneladas da família j do produto i no período t
$a_n^{ji} \geq 0$	atraso em toneladas da família j do produto i no decêndio n

Função Objetivo:

A função objetivo (3.3.1) minimiza os custos de produção $\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{t=1}^T (x_t^{ji} c^{ji})$, custo de atraso $\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{n=1}^N (a_n^{ji} k^{ji})$ com foco em atender o prazo desejado do cliente e o custo de setup $\sum_{t=1}^T w_t S$ que ocorre quando a linha é configurada para produzir outro tipo de produto.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{t=1}^T (x_t^{ji} c^{ji}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{n=1}^N (a_n^{ji} k^{ji}) + \sum_{t=1}^T w_t S \quad (3.3.1)$$

Restrições:

Capacidade de Produção: A capacidade é garantida através da restrição (3.3.2) que ao multiplicar a produção em toneladas da família j do produto i no período t pelas horas necessárias para produção de 1 tonelada da família j do produto i , encontra-se a quantidade de horas necessárias para produção em toneladas da família j do produto i no período t $\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} (x_t^{ji} h^{ji})$. As horas necessárias não podem ultrapassar o tempo disponível do dia ($24 - p_t$) que é obtido através da subtração das 24 horas do dia pelo somatório de horas de manutenção e horas de operação programadas no período t .

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} (x_t^{ji} h^{ji}) \leq 24 - p_t, \quad \forall t \quad (3.3.2)$$

Sequenciamento da Produção: As demandas são dadas por decêndio. A restrição (3.3.3) sequencia a demanda programada do primeiro decêndio ($n = 1$) nos primeiros 10 dias do mês ($t = \{1, \dots, 10\}$). A restrição (3.3.4) sequencia a demanda programada do 2º decêndio ($n = 2$) mais o atraso gerado no primeiro decêndio entre os dias 11 e 20 do mês ($t = \{11, \dots, 20\}$). A restrição (3.3.5) sequencia a demanda programada do 3º decêndio ($n = 3$) mais o atraso gerado no segundo decêndio entre os dias 21 e 31 do mês ($t = \{21, \dots, 31\}$).

$$\sum_{t=1}^{10} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 1 \quad (3.3.3)$$

$$\sum_{t=11}^{20} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn} + a_{n-1}^{ji}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 2 \quad (3.3.4)$$

$$\sum_{t=21}^{31} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn} + a_{n-1}^{ji}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 3 \quad (3.3.5)$$

Conservação de Fluxo: A restrição (3.3.6) garante que o sequenciamento de produção respeite o planejamento de produção do produto i a ser produzido no período t , pois só vai alocar valor em toneladas para o x_t^{ji} quando este for menor ou igual que o resultado em toneladas encontrado pela expressão $\frac{(24-p_t)}{h^{ji}} r_t^i$.

$$x_t^{ji} \leq \frac{(24 - p_t)}{h^{ji}} r_t^i, \quad \forall j, i \in I_j, \forall t \quad (3.3.6)$$

3.4. Análise de Robustez do Modelo Matemático

Com objetivo de analisar a robustez do modelo proposto no item 3.3. foram gerados seis cenários fixando quatro famílias, dois produtos e quatro ocorrências de setup, com variação somente no custo de atraso k_{ji} , que é o principal propósito do presente trabalho. Os cenários são apresentados na *Tabela 7*.

Tabela 7 – Cenários utilizando o modelo matemático do item 3.3

Parâmetros	Cenários					
	1	2	3	4	5	6
T	31 Dias					
J	4 Famílias (A, B, C ou D)					
I	2 Produtos (GI ou GA)					
N	3 Decêndios (1, 2 e 3)					
p_t	Horas de manutenção e horas de operação programadas (<i>Tabela 3</i>)					
r_{ti}	Valor binário que indica o planejamento de produção do produto i a ser produzido (<i>Tabela 3</i>)					
w_t	Valor binário que indica quando ocorre configuração para produção de outro produto no período t (<i>Tabela 3</i>)					
h_{ji}	Horas necessárias para produção de 1 tonelada da família j do produto i (<i>Tabela 2</i>)					
d_i^{jn}	Demanda em toneladas da família j no decêndio n de cada produto i (<i>Tabela 4</i>)					
c_{ji}	Custo operacional por tonelada (R\$/t) da família j do produto i (<i>Tabela 6</i>)					
S	Custo quando ocorre Setup = R\$30.000,00					
k_{ji}	R\$200,00/t para todas as famílias e produtos	R\$100,00/t para todas as famílias e produtos	R\$0,00/t para todas as famílias e produtos	Família A e B = R\$200,00/t Família C e D = R\$0,00/t	Produto GI = R\$0,00/t Produto GA = R\$200,00/t	Produto GI = R\$200,00/t Produto GA = R\$0,00/t

Fonte: Autor do trabalho

Antes de analisar os efeitos das variações do parâmetro de custo do atraso, vale a pena fazer algumas observações com relação à demanda total planejada e a

capacidade de produção do período analisado. A *Tabela 8* é comum para todos os seis cenários. Observa-se que o período acumulado do período *T* possui uma demanda de 38.000 toneladas e ao descontar do tempo calendário o planejamento de paradas por parte da manutenção e da operação encontra-se o tempo disponível para produção.

Como pode ser observado na *Tabela 4*, a demanda é estratificada por decêndio, com isso, é possível calcular quantas horas de produção são necessárias para produzir a demanda planejada, de posse desta informação, percebe-se que o primeiro decêndio possui 188 horas disponíveis para produção, porém, a demanda alocada ao 1º decêndio necessita de 218,70 horas, ou seja, falta 30,70 horas de produção no 1º decêndio.

Tabela 8 – Demanda e capacidade acumulada dos cenários em análise por decêndio

Dados	1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
Tempo calendário (h)	240,00	240,00	264,00	744,00
Horas de manutenção e horas de operação programadas (h)	52,00	3,00	19,00	74,00
Tempo disponível (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
Horas necessárias conforme a demanda planejada (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
Diferença entre o tempo disponível e o planejado (h)	- 30,70	30,90	1,80	2,00

Fonte: Autor do trabalho

Diante deste cenário apresentado, acredita-se que dificilmente seria possível planejar as 38.000 toneladas previstas no mês devido a falta de capacidade apresentada no 1º decêndio, pois neste decêndio a demanda planejada é de 12.600 t e são necessárias 218,70 horas de produção sendo que o tempo disponível deste decêndio é de 188 horas, porém, a falta de capacidade apresentada no 1º decêndio é compensada no 2º decêndio.

Com base nestas informações, o modelo matemático deve ser capaz de decidir qual família e produto deixará de ser produzido no 1º decêndio e ser produzido no 2º decêndio gerando atraso. Vale ressaltar que o cenário apresentado na *Tabela 8* possui 2 horas de ociosidade no mês, portanto, o modelo deve

conseguir distribuir as 38.000 toneladas planejadas. As tabelas a seguir apresentam os resultados gerados do modelo matemático de cada cenário.

No Cenário 1, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, todos possuem o mesmo grau de prioridade para produção. O objetivo deste cenário é de que nenhum produto pode atrasar, todos são importantes. Por isso, o valor de R\$200,00/t foi adotado por ser maior que o maior valor de custo operacional que foi apresentado na *Tabela 6*.

Tabela 9 – Resultado do modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.743,76	13.556,25	13.699,99	38.000,00
	Desvio (t)	-1.856,24	1.756,25	99,99	0,00
	Atraso Modelo (t)	1.856,25	100,00	0,00	1.956,25
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	188,00	235,10	244,90	668,00
	Desvio do TD (h)	0,00	1,90	0,10	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.195.563,22	1.737.437,50	1.596.999,10	4.529.999,82
	Custo do Atraso (R\$)	371.250,00	20.000,00	0,00	391.250,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.626.813,22	1.757.437,50	1.656.999,10	5.041.249,82

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 9* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. 1.856,25 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 1º decêndio gerando um atraso que custou R\$371.250,00, esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*). Mesmo assim, 100 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso que custou R\$20.000,00, esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

No Cenário 2, o custo de atraso foi de R\$100,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, todos possuem o mesmo grau de prioridade para produção, mas apesar disso, o custo deste cenário é menor que o custo operacional em alguns

casos, diferentemente do cenário 1. Assim, alguns produtos se tornam mais prioritários que os outros no cenário 2.

Tabela 10 – Resultado do modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.743,75	13.556,25	4.324,26	28.624,27
	Desvio (t)	-1.856,25	1.756,25	-9.275,74	-9.375,73
	Atraso (t)	1.856,25	100,00	9.375,74	11.331,99
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	188,00	235,10	76,10	499,20
	Desvio do TD (h)	0,00	1,90	168,90	170,80
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.195.562,98	1.737.437,50	401.426,16	3.334.426,64
	Custo do Atraso (R\$)	185.625,00	10.000,00	937.573,50	1.133.198,50
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total (R\$)	1.441.187,98	1.747.437,50	1.398.999,66	4.587.625,14

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 10* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima, porém, não realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Somente 28.624,27 toneladas foram sequenciadas, faltou sequenciar 9.375,73 toneladas. Vendo isso, foi possível perceber que o custo do atraso se tornou prioritário, pois em algumas famílias ele é maior que o custo operacional. A resposta do modelo não atende.

Analisando o resultado do cenário 2, percebe-se a necessidade de uma restrição adicional que será mencionada mais adiante. O problema percebido no cenário 2, também é percebido nos próximos cenários, mesmo assim, serão exibidos para fim de comparação.

No Cenário 3, o custo de atraso foi de R\$0,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, se ocorrer atraso, não existe custo.

Tabela 11 – Resultado do modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Desvio (t)	-12.600,00	-11.800,00	-13.600,00	-38.000,00
	Atraso Modelo (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Desvio do TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo do Setup (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo Total Modelo (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 11* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima, porém, como o custo de atraso neste cenário é de R\$0,00/t, o modelo decidiu não realizar o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. A resposta do modelo não atende.

No Cenário 4, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para as famílias A e B e R\$0,00/t para as famílias C e D, ou seja, as famílias A e B são prioridade para produção.

Tabela 12 – Resultado do modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total	
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00	
	Gerada pelo Modelo (t)	7.700,00	7.300,00	9.900,00	24.900,00	
	Desvio (t)	-4.900,00	-4.500,00	-3.700,00	-13.100,00	
	Atraso Modelo (t)	4.900,00	4.500,00	3.700,00	13.100,00	
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00	
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00	
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00	
	Horas Utilizadas Modelo (h)	138,80	130,00	181,50	450,30	
	Desvio do TD (h)	49,20	107,00	63,50	219,70	
Custo	Custo Operacional (R\$)	979.000,00	1.029.000,00	1.218.000,16	3.226.000,16	
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00	
	Custo Total Modelo (R\$)	1.039.000,00	1.029.000,00	1.278.000,16	3.346.000,16	
Produção por Família e Produto Gerada pelo Modelo (t)						
Produto	Decêndio	A	B	C	D	Total
GA	1º Decêndio	4.700	500	0	0	5.200
	2º Decêndio	0	0	0	0	0
	3º Decêndio	4.600	1.500	0	0	6.100
	Total	9.300	2.000	0	0	11.300
GI	1º Decêndio	0	2.500	0	0	2.500
	2º Decêndio	3.300	4.000	0	0	7.300
	3º Decêndio	1.200	2.600	0	0	3.800
	Total	4.500	9.100	0	0	13.600

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 12* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima, porém, não realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Somente 24.900,00 toneladas foram sequenciadas, faltou sequenciar 13.100,00 toneladas que é justamente a demanda total das famílias C e D. Com isso, foi possível perceber que o custo do atraso se tornou prioritário, pois a demanda das famílias C e D não foram sequenciadas. A resposta do modelo não atende.

No Cenário 5, o custo de atraso foi de R\$0,00/t para o produto GI e R\$200,00/t para o produto GA, ou seja, o produto GA é prioridade para produção.

Tabela 13 – Resultado do modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total	
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00	
	Gerada pelo Modelo (t)	5.700,00	0,00	7.700,00	13.400,00	
	Desvio (t)	-6.900,00	-11.800,00	-5.900,00	-24.600,00	
	Atraso Modelo (t)	6.900,00	11.800,00	5.900,00	24.600,00	
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00	
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00	
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00	
	Horas Utilizadas Modelo (h)	107,30	0,00	143,10	250,40	
	Desvio do TD (h)	80,70	237,00	101,90	419,60	
Custo	Custo Operacional (R\$)	654.000,24	0,00	832.000,00	1.486.000,24	
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	20.000,00	0,00	20.000,00	
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00	
	Custo Total Modelo (R\$)	714.000,24	20.000,00	892.000,00	1.626.000,24	
Produção por Família e Produto Gerada pelo Modelo (t)						
Produto	Decêndio	A	B	C	D	Total
GA	1º Decêndio	4.700	500	500	0	5.700
	2º Decêndio	0	0	0	0	0
	3º Decêndio	4.600	1.500	1.600	0	7.700
	Total	9.300	2.000	2.100	0	13.400
GI	1º Decêndio	0	0	0	0	0
	2º Decêndio	0	0	0	0	0
	3º Decêndio	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 13* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima, porém, não realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Somente 13.400,00 toneladas foram sequenciadas, faltou sequenciar 24.600,00 toneladas que é justamente a demanda total do produto GI. Vendo este cenário, foi possível perceber que o custo do atraso se tornou prioritário, pois a demanda do produto GI não foi sequenciada. A resposta do modelo não atende.

No Cenário 6, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para o produto GI e R\$0,00/t para o produto GA, ou seja, o produto GI é prioridade para produção.

Tabela 14 – Resultado do modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total	
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00	
	Gerada pelo Modelo (t)	5.750,00	12.850,00	6.000,00	24.600,00	
	Desvio (t)	-6.850,00	1.050,00	-7.600,00	-13.400,00	
	Atraso Modelo (t)	6.850,00	-1.050,00	7.600,00	13.400,00	
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00	
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00	
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00	
	Horas Utilizadas Modelo (h)	92,00	223,80	101,80	417,60	
	Desvio do TD (h)	96,00	13,20	143,20	252,40	
Custo	Custo Operacional (R\$)	700.000,00	1.579.000,00	765.000,00	3.044.000,00	
	Custo do Atraso (R\$)	230.000,00	0,00	0,00	230.000,00	
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00	
	Custo Total Modelo (R\$)	990.000,00	1.579.000,00	825.000,00	3.394.000,00	
Produção por Família e Produto Gerada pelo Modelo (t)						
Produto	Decêndio	A	B	C	D	Total
GA	1º Decêndio	0	0	0	0	0
	2º Decêndio	0	0	0	0	0
	3º Decêndio	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0
GI	1º Decêndio	0	2.500	3.250	0	5.750
	2º Decêndio	3.300	4.000	5.050	500	12.850
	3º Decêndio	1.200	2.600	2.100	100	6.000
	Total	4.500	9.100	10.400	600	24.600

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 14* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima, porém, não realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Somente 24.600,00 toneladas foram sequenciadas, faltou sequenciar 13.400,00 toneladas que é justamente a demanda total do produto GA. Vendo este cenário, foi possível perceber que o custo do atraso se tornou prioritário, pois a demanda do produto GA não foi sequenciada. A resposta do modelo não atende.

Até este momento do trabalho, o modelo matemático priorizou a redução dos custos. Analisando os resultados dos seis cenários apresentados na *Tabela 9* até a *Tabela 14*, foi possível perceber que a demanda total de 38.000 toneladas foi

inteiramente distribuída somente no cenário 1, os demais cenários deixaram de sequenciar algum volume da demanda planejada. Quando o custo de atraso foi totalmente zerado no cenário 3, o modelo disse que não deveria produzir nada, ou seja, o modelo proposto até o momento prioriza redução de custo, porém, o objetivo do trabalho é distribuir completamente em dias a demanda informada para o mês e não parcialmente, com isso, a medida que o custo de atraso fica menor que o custo operacional, o modelo retorna que é viável atrasar e esta resposta não é a esperada.

Atualmente o analista do PCP não analisa os custos para distribuir o planejamento mensal em dias, porém, a proposta do presente trabalho é fornecer para ele um modelo matemático que faça esta tarefa que atualmente é manual considerando todos os parâmetros que ele já utiliza, porém, com foco em redução de custos. Distribuir inteiramente a demanda planejada para o mês é uma premissa do presente trabalho e neste ponto até aqui, o modelo se tornou eficiente somente no primeiro cenário, ou seja, ainda não atende.

3.5. Inclusão de Restrição

Para se tornar uma ferramenta útil, e realmente ser utilizado como um simulador, o modelo matemático deve distribuir toda a demanda planejada para o mês em dias respeitando todas as restrições e com menor custo possível, para isso, foi necessário adicionar uma restrição que garanta que toda a demanda seja distribuída. A restrição (3.3.7) foi adicionada no modelo com o propósito de garantir que o resultado total de $\sum_{t=1}^T x_t^{ji}$ seja igual à demanda total $\sum_{n=1}^N d_i^{jn}$.

$$\sum_{t=1}^T x_t^{ji} = \sum_{n=1}^N d_i^{jn}, \quad \forall j, i \in I_j \quad (3.3.7)$$

Com esta nova restrição adicionada ao modelo, os seis cenários foram regeados mantendo as mesmas características apresentadas na *Tabela 7*.

No Cenário 1, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, todos possuem o mesmo grau de prioridade para produção. O objetivo deste cenário é de que nenhum produto pode atrasar, todos são

importantes. Por isso, o valor de R\$200,00/t foi adotado por ser maior que o maior valor de custo operacional que foi apresentado na *Tabela 6*.

Tabela 15 – Resultado do novo modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.743,75	13.556,25	13.700,01	38.000,01
	Desvio (t)	-1.856,25	1.756,25	100,00	0,01
	Atraso Modelo (t)	1.856,25	100,00	0,00	1.956,25
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	188,00	235,10	244,90	668,00
	Desvio do TD (h)	0,00	1,90	0,10	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.195.562,98	1.737.437,50	1.597.000,62	4.530.001,10
	Custo do Atraso (R\$)	371.250,00	20.000,00	0,00	391.250,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.626.812,98	1.757.437,50	1.657.000,62	5.041.251,10

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 15* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. 1.856,25 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 1º decêndio gerando um atraso que custou R\$371.250,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*), mesmo assim, 100 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso que custou R\$20.000,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

No Cenário 2, o custo de atraso foi de R\$100,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, todos possuem o mesmo grau de prioridade para produção. Mas apesar disso, o custo deste cenário é menor que o custo operacional em alguns casos, diferentemente do cenário 1, assim, alguns produtos se tornam mais prioritários que os outros.

Tabela 16 – Resultado do novo modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.743,75	13.556,25	13.700,01	38.000,01
	Desvio (t)	-1.856,25	1.756,25	100,00	0,01
	Atraso Modelo (t)	1.856,25	100,00	0,00	1.956,25
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	188,00	235,10	244,90	668,00
	Desvio do TD (h)	0,00	1,90	0,10	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.195.562,98	1.737.437,50	1.597.000,62	4.530.001,10
	Custo do Atraso (R\$)	185.625,00	10.000,00	0,00	195.625,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.441.187,98	1.747.437,50	1.657.000,62	4.845.626,10

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 16* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. O custo de atraso é menor em comparação com o primeiro cenário, mas mesmo baixando o custo de atraso de R\$200,00/t para R\$100,00/t, este não gerou impacto no modelo, pois ele se comportou da mesma maneira que o cenário anterior. No Cenário 3, o custo de atraso foi de R\$0,00/t para todas as famílias e produtos, ou seja, se ocorrer atraso, não existe custo.

Tabela 17 – Resultado do novo modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.556,26	13.737,50	13.706,25	38.000,01
	Desvio (t)	-2.043,74	1.937,50	106,25	0,01
	Atraso Modelo (t)	2.043,75	106,25	0,00	2.150,00
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	186,00	237,00	245,00	668,00
	Desvio do TD (h)	2,00	0,00	0,00	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.252.375,70	1.680.000,00	1.597.625,34	4.530.001,04
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.312.375,70	1.680.000,00	1.657.625,34	4.650.001,04

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 17* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Como neste cenário o custo de atraso é R\$0,00/t, a tendência é de aumentar a possibilidade de atraso. 2.043,75 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 1º decêndio gerando um atraso que não teve custo devido o mesmo ser R\$0,00/t. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*), mesmo assim, 106,25 toneladas deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

No Cenário 4, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para as famílias A e B e R\$0,00/t para as famílias C e D, ou seja, as famílias A e B são prioridade para produção.

Tabela 18 – Resultado do novo modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.600,00	13.700,00	13.700,00	38.000,00
	Desvio (t)	-2.000,00	1.900,00	100,00	0,00
	Atraso Modelo (t)	2.000,00	100,00	0,00	2.100,00
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	186,70	236,40	244,90	668,00
	Desvio do TD (h)	1,30	0,60	0,10	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.268.000,48	1.665.000,00	1.596.999,66	4.530.000,14
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.328.000,48	1.665.000,00	1.656.999,66	4.650.000,14

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 18* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Como neste cenário o custo de atraso das famílias A e B é de R\$200,00/t e das famílias C e D é R\$0,00t, o modelo decidiu aumentar o atraso. 2.000,00 toneladas da família C deixaram de ser sequenciadas no 1º decêndio gerando um atraso que custou R\$0,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*), mesmo

assim, 100 toneladas da família C deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso que custou R\$0,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

No Cenário 5, o custo de atraso foi de R\$0,00/t para o produto GI e R\$200,00/t para o produto GA, ou seja, o produto GA é prioridade para produção.

Tabela 19 – Resultado do novo modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.556,26	13.737,50	13.706,25	38.000,01
	Desvio (t)	-2.043,74	1.937,50	106,25	0,01
	Atraso Modelo (t)	2.043,75	106,25	0,00	2.150,00
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	186,00	237,00	245,00	668,00
	Desvio do TD (h)	2,00	0,00	0,00	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.186.750,72	1.745.625,00	1.597.625,10	4.530.000,82
	Custo do Atraso (R\$)	0,00	20.000,00	0,00	20.000,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.246.750,72	1.765.625,00	1.657.625,10	4.670.000,82

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 19* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Como neste cenário o custo de atraso do produto GA é de R\$200,00/t e o produto GI é de R\$0,00/t, o modelo decide atrasar o produto GI. 2.043,75 toneladas do produto GI deixaram de ser sequenciados no 1º decêndio gerando um atraso que custou R\$0,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*), mesmo assim, 100 toneladas do produto GA deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso que custou R\$20.000,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

No Cenário 6, o custo de atraso foi de R\$200,00/t para o produto GI e R\$0,00/t para o produto GA, ou seja, o produto GI é prioridade para produção.

Tabela 20 – Resultado do novo modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t)

		1º Decêndio	2º Decêndio	3º Decêndio	Total
Demanda	Planejada (t)	12.600,00	11.800,00	13.600,00	38.000,00
	Gerada pelo Modelo (t)	10.744,74	13.550,00	13.705,27	38.000,01
	Desvio (t)	-1.855,26	1.750,00	105,26	0,01
	Atraso Modelo (t)	1.855,26	105,26	0,00	1.960,53
Capacidade	Tempo Disponível - TD (h)	188,00	237,00	245,00	670,00
	Horas Necessárias (h)	218,70	206,10	243,20	668,00
	Desvio do TD (h)	-30,70	30,90	1,80	2,00
	Horas Utilizadas Modelo (h)	188,00	235,00	245,00	668,00
	Desvio do TD (h)	0,00	2,00	0,00	2,00
Custo	Custo Operacional (R\$)	1.220.868,92	1.711.500,00	1.597.631,94	4.530.000,86
	Custo do Atraso (R\$)	370.000,00	0,00	0,00	370.000,00
	Custo do Setup (R\$)	60.000,00	0,00	60.000,00	120.000,00
	Custo Total Modelo (R\$)	1.650.868,92	1.711.500,00	1.657.631,94	5.020.000,86

Fonte: Autor do trabalho

O resultado apresentado na *Tabela 20* mostra que o modelo apresentou uma solução ótima e realizou o sequenciamento das 38.000 toneladas previstas para o mês. Como neste cenário o custo de atraso do produto GA é de R\$0,00/t e o produto GI é de R\$200,00/t, o modelo decide atrasar o produto GA, porém, como tem muito mais demanda do produto GI do que do produto GA, inevitavelmente, o produto GI acaba sofrendo atraso. 1.855,26 toneladas deixaram de ser sequenciados no 1º decêndio gerando um atraso que custou R\$370.000,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 2º decêndio, pois o mesmo apresentava uma folga de 30,90 horas (*Tabela 8*), mesmo assim, 105,26 toneladas do produto GA deixaram de ser sequenciadas no 2º decêndio gerando um atraso que custou R\$0,00. Esse volume em atraso conseguiu ser sequenciado no 3º decêndio.

Após inclusão da restrição (3.3.7) os seis cenários apresentaram solução ótima e a demanda total planejada de 38.000t foi distribuída, ou seja, o modelo realizou o sequenciamento da demanda mensal em dias respeitando todos os parâmetros que o analista do PCP utiliza, porém, levando em consideração o menor custo. Como o custo de atraso foi o único parâmetro que variou entre os seis cenários, ele não pode ser utilizado para comparar se determinado cenário é melhor que o outro, porém, o objetivo de distribuir toda a demanda com o menor custo possível foi alcançado em todos os cenários.

Vale a pena comentar que com a restrição (3.3.7) no modelo se a demanda for maior que a capacidade de produção da linha, o modelo retorna que o problema é inviável, pois esta restrição visa garantir que toda a demanda seja distribuída. Para questões de simulação com intuito de saber a resposta do modelo em relação aos produtos que ele iria priorizar, esta restrição pode ser retirada, desde que o custo de atraso seja maior que o custo operacional.

3.6. Modelo Final

O modelo final é apresentado abaixo:

Função Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{t=1}^T (x_t^{ji} c^{ji}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{n=1}^N (a_n^{ji} k^{ji}) + \sum_{t=1}^T w_t S \quad (3.3.1)$$

Restrições:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} (x_t^{ji} h^{ji}) \leq 24 - p_t, \quad \forall t \quad (3.3.2)$$

$$\sum_{t=1}^{10} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 1 \quad (3.3.3)$$

$$\sum_{t=11}^{20} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn} + a_{n-1}^{ji}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 2 \quad (3.3.4)$$

$$\sum_{t=21}^{31} (x_t^{ji}) + a_n^{ji} = d_i^{jn} + a_{n-1}^{ji}, \quad \forall j, i \in I_j, n = 3 \quad (3.3.5)$$

$$x_t^{ji} \leq \frac{(24 - p_t)}{h^{ji}} r_t^i, \quad \forall j, i \in I_j, \forall t \quad (3.3.6)$$

$$\sum_{t=1}^T x_t^{ji} = \sum_{n=1}^N d_i^{jn}, \quad \forall j, i \in I_j \quad (3.3.7)$$

4. Considerações Finais

Neste trabalho é estudado um problema de sequenciamento de produção com setup em máquina simples das linhas de galvanização por imersão a quente com foco em otimizar o sequenciamento da produção em dias. Em se tratando de que o analista do PCP utiliza de sua experiência para realizar o sequenciamento do planejamento de produção em dias de forma manual, o modelo matemático gerado aqui neste trabalho pode ser utilizado como ferramenta de simulação que pode ser utilizada gerando vários cenários, pois é possível alterar diversos parâmetros como, por exemplo, as paradas programadas de manutenção e operação, diminuir a quantidade de setups dentro do mês, é possível ainda priorizar certo tipo de família ou produto alterando o custo do atraso, dentre outros.

Analisando os custos, o custo de setup será utilizado apenas para simulação do analista do PCP quando o mesmo quiser comparar o custo total ao reduzir ou aumentar a quantidade de setups realizados no mês. O custo operacional será o mesmo em todos os cenários, pois o objetivo é sequenciar toda a demanda de produção, nem mais nem menos. O custo do atraso que foi o foco do trabalho, pois é um parâmetro que não é utilizado atualmente, porém, considerá-lo representa redução de custos e cumprimento dos prazos.

O modelo matemático aqui proposto demonstrou que pode ser uma ferramenta muito útil na confecção da tarefa de realizar o planejamento de produção das linhas de galvanização por imersão a quente, pois, além de ser mais confiável e rápido de simular, visto que, pelo menos duas versões do planejamento podem ser geradas, também pode ser aplicado à outras linhas de produção que possuam características semelhantes.

Os próximos passos desse trabalho estão relacionados à implementação do modelo matemático no ambiente de produção, para isso, algumas melhorias precisam ser realizadas:

- Considerar o atraso anterior ao período de início: o modelo atual inicia em $t=1$ e o atraso anterior a este período foi adicionado na demanda do primeiro decêndio, a proposta é separar este volume em atraso da demanda para sofrer penalização;

- Estoque de mínimo de segurança: tanto as linhas anteriores quanto as linhas posteriores possuem um estoque mínimo de segurança, portanto, realizar a integração destas linhas ao modelo será fundamental para que o mesmo seja implantado;
- Definição automática de setup: o modelo atual considera o planejamento de paradas de operação e manutenção que é definido pelo PCP, a proposta é fazer com que o próprio modelo defina o melhor dia para produzir GI ou GA;
- Planejamento por turno: atualmente é praticado o uso de três turnos de produção, 23:00h as 07:00h, 07:00h as 15:00h e 15:00h as 23:00h. Algumas análises exigem que o planejamento seja feito por turno.

5. Referencias Bibliográficas

AMPL. **CPLEX for AMPL**. Disponível em: <<http://ampl.com/>>. Acesso em: 26 set. 2016.

ANTUNES, Luciana Soares; SEHNEM, Simone; LIMA, Maurício Andrade de. **Análise do planejamento e controle de produção no setor de usinagem, corte e conformação em indústria metal-mecânica**. [2014]. Disponível em: <<http://navus.sc.senac.br/index.php/navus/article/view/99/139>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

ASSI, Leonardo Roque da Silva. **Planejamento agregado da produção em empresa de gestão de documentos: modelo e aplicação**. [2009]. Disponível em: <<http://pro.poli.usp.br/wp-content/uploads/2012/pubs/planejamento-agregado-da-producao-em-empresa-de-gestao-de-documentos-modelo-e-aplicacao.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

BATISTA, Kênia Barros. **Caracterização de superfícies de aços galvanizados utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica**. [2013]. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-986HZV/disserta__o_15.04.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 set. 2016.

BRONER. **Planejamento de Produção Avançado, Programação, Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos e MES para Metais**. Disponível em: <<http://www.bronermetals.com/index.php>>. Acesso em: 28 set. 2016.

CARVALHO, Pedro Ribeiro. **Quem é o Culpado Pelo Atraso na Entrega?** [2008]. Disponível em: <<http://revistas.unibh.br/index.php/dtec/article/download/462/256>>. Acesso em: 22 out. 2016.

FILHO, Oscar Salviano Silva; CEZARINO, Wagner. **Geração de planos de produção via otimização sequencial subótima**. [2007]. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v14n2/03.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

MUNHOZ, José Renato. **Otimização no planejamento agregado de produção em indústrias de processamento de suco concentrado congelado de laranja**. [2009]. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. Disponível em: <http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2416>. Acesso em: 18 fev. 2016.

USIMINAS. **Galvanizados por Imersão a Quente**. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/nossos-produtos/galvanizados-por-imersao-quente/>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

Apêndice A – Tabelas dos Resultados Computacionais

Tabela 21 – Resultado computacional do modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 132 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 5041250
56 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B   0   0   0
C   0  100  0
D   0   0   0

   [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A     0   0   0
B  1756.25  0   0
C     0   0   0
D   100   0   0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A           B           C           D           :=
1     0           0           0           0
2     0           0           0           0
3  1263.16         0           0           0
4   315.789       500         500         0
5  1263.16         0           0           0
6  1263.16         0           0           0
7   594.737       0           0           0
8     0           0           0           0
9     0           0           0           0
10    0           0           0           0
11    0           0           0           0
12    0           0           0           0
13    0           0           0           0
14    0           0           0           0
15    0           0           0           0
16    0           0           0           0
17    0           0           0           0
18    0           0           0           0
19    0           0           0           0
20    0           0           0           0
21    0           0          188.235       0
22    0          1257.89         0           0

```

23	1263.16	0	0	0
24	1263.16	0	0	0
25	0	-2.27374e-13	1411.76	0
26	1021.05	242.105	0	0
27	1052.63	-1.86985e-13	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

[*,GI,*] (tr)

:	A	B	C	D	:=
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	543.75	0	
8	0	0	1500	0	
9	0	743.75	756.25	0	
10	0	0	1500	0	
11	400	0	1000	0	
12	0	0	1500	0	
13	455	0	0	500	
14	0	1500	0	0	
15	0	1312.5	0	0	
16	45	1443.75	0	0	
17	1200	0	0	0	
18	1200	0	0	0	
19	0	0	1500	0	
20	0	1500	0	0	
21	310	0	0	100	
22	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	
24	0	0	0	0	
25	0	0	0	0	
26	0	0	0	0	
27	0	0	0	0	
28	0	1500	0	0	
29	570	0	787.5	0	
30	0	0	1312.5	0	
31	320	1100	0	0	

ampl:

Tabela 22 – Resultado computacional do modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 132 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 4587625
48 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0 4600
B   0   0   0
C   0 100 188.235
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0 1200
B 1756.25 0 2600
C   0   0 787.5
D  100  0   0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3 1263.16 0   0   0
4  763.158 500 0   0
5  815.789 0 500 0
6 1263.16 0   0   0
7  594.737 0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  0   0   0   0
22  0   0   0   0
23  0   0   0   0
24  0   236.842 0 0
25  0 1263.16 0 0
26  0   0 1411.76 0
27  0   0   0   0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[*,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      543.75  0
8      0      0      1500    0
9      0      743.75  756.25  0
10     0      0      1500    0
11     0      0      1500    0
12     455    0      0      500
13     0      1500   0      0
14     0      1500   0      0
15     0      312.5  1000   0
16     1200   0      0      0
17     0      0      1500   0
18     0      1500   0      0
19     1200   0      0      0
20     445    943.75  0      0
21     0      0      0      100
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     0      0      0      0
29     0      0      0      0
30     0      0      1312.5  0
31     0      0      0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 23 – Resultado computacional do modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 112 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 0
0 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:      1      2      3      :=
A    4700   4700   9300
B     500    500   2000
C     500    600   2100
D       0      0      0

  [*,GI,*]
:      1      2      3      :=
A     0    3300   4500
B    2500   6500   9100
C    4300   8300  10400
D    100    500    600
;

x [*,GA,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      0      0
8      0      0      0      0
9      0      0      0      0
10     0      0      0      0
11     0      0      0      0
12     0      0      0      0
13     0      0      0      0
14     0      0      0      0
15     0      0      0      0
16     0      0      0      0
17     0      0      0      0
18     0      0      0      0
19     0      0      0      0
20     0      0      0      0
21     0      0      0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0

```

```
27 0 0 0 0
28 0 0 0 0
29 0 0 0 0
30 0 0 0 0
31 0 0 0 0
```

```
  [* ,GI,*] (tr)
:=
:   A   B   C   D
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3   0   0   0   0
4   0   0   0   0
5   0   0   0   0
6   0   0   0   0
7   0   0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  0   0   0   0
22  0   0   0   0
23  0   0   0   0
24  0   0   0   0
25  0   0   0   0
26  0   0   0   0
27  0   0   0   0
28  0   0   0   0
29  0   0   0   0
30  0   0   0   0
31  0   0   0   0
;
```

```
ampl:
```

Tabela 24 – Resultado do computacional modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 123 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 3346000
20 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:      1      2      3      :=
A      0      0      0
B      0      0      0
C     500     600    2100
D      0      0      0

  [*,GI,*]
:      1      2      3      :=
A      0      0      0
B      0      0      0
C     4300     8300    10400
D      100     500     600
;

x [*,GA,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3     1121.05    0      0      0
4      0      500    0      0
5     1263.16    0      0      0
6     1263.16    0      0      0
7     1052.63    0      0      0
8      0      0      0      0
9      0      0      0      0
10     0      0      0      0
11     0      0      0      0
12     0      0      0      0
13     0      0      0      0
14     0      0      0      0
15     0      0      0      0
16     0      0      0      0
17     0      0      0      0
18     0      0      0      0
19     0      0      0      0
20     0      0      0      0
21     0      0      0      0
22     0      236.842  0      0
23     0      1263.16  0      0
24     1263.16    0      0      0
25     1263.16    0      0      0
26     1021.05    0      0      0
27     1052.63    0      0      0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      0      0
8      0      1500  0      0
9      0      1000  0      0
10     0      0      0      0
11     0      0      0      0
12     0      0      0      0
13     0      1500  0      0
14     0      1500  0      0
15     0      0      0      0
16     1200   0      0      0
17     1200   0      0      0
18     400    1000  0      0
19     0      0      0      0
20     500    0      0      0
21     0      0      0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     0      0      0      0
29     170    1287.5  0      0
30     0      1312.5  0      0
31     1030   0      0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 25 – Resultado do computacional modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto GI = R\$0,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$200,00/t)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 121 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 1626000
18 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B   0   0   0
C   0  100  0
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0  3300  4500
B  2500  6500  9100
C  4300  8300 10400
D   100   500   600
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3  1263.16  0   0   0
4  305.263  500  0   0
5  1263.16  0   0   0
6   815.789  0  500  0
7  1052.63  -1.86985e-13  0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  0   0   705.882  0
22  0   794.737  0   0
23  1263.16  0   0   0
24  1263.16  0   0   0
25  0   463.158  894.118  0
26  1021.05  242.105  0   0

```

27	1052.63	-1.86985e-13	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

```

[* ,GI,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3   0   0   0   0
4   0   0   0   0
5   0   0   0   0
6   0   0   0   0
7   0   0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  0   0   0   0
22  0   0   0   0
23  0   0   0   0
24  0   0   0   0
25  0   0   0   0
26  0   0   0   0
27  0   0   0   0
28  0   0   0   0
29  0   0   0   0
30  0   0   0   0
31  0   0   0   0
;

```

AMPL:

Tabela 26 – Resultado do computacional modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 254 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
49 constraints, all linear; 257 nonzeros
    20 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 123 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 3394000
30 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:      1      2      3      :=
A    4700   4700   9300
B     500    500   2000
C     500    600   2100
D       0      0      0

  [*,GI,*]
:      1      2      3      :=
A       0      0      0
B       0      0      0
C    1050      0      0
D     100      0      0
;

x [*,GA,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1       0      0      0      0
2       0      0      0      0
3       0      0      0      0
4       0      0      0      0
5       0      0      0      0
6       0      0      0      0
7       0      0      0      0
8       0      0      0      0
9       0      0      0      0
10      0      0      0      0
11      0      0      0      0
12      0      0      0      0
13      0      0      0      0
14      0      0      0      0
15      0      0      0      0
16      0      0      0      0
17      0      0      0      0
18      0      0      0      0
19      0      0      0      0
20      0      0      0      0
21      0      0      0      0
22      0      0      0      0
23      0      0      0      0
24      0      0      0      0
25      0      0      0      0
26      0      0      0      0
27      0      0      0      0

```

```

28  0  0  0  0
29  0  0  0  0
30  0  0  0  0
31  0  0  0  0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0     1250     0
8      0      0     1500     0
9      0     1500      0      0
10     0     1000      500     0
11     0      0     1500     0
12     0      0     1500     0
13     0      0     1500     0
14     0     1500      0      0
15     0     1000      0      0
16    1200      0      0      0
17     550      0      0     500
18     760      0     550     0
19     790      0      0      0
20     0     1500      0      0
21     0      0     750     0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28    1040      0      0      0
29     160     1100     37.5    100
30     0      0    1312.5     0
31     0     1500      0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 27 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 1 (Custo de atraso em R\$200,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 132 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 5041250
68 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B   0   0   0
C   0  100  0
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B  1756.25  0  0
C   0   0   0
D   100   0  0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3   815.789  0  500  0
4   1263.16  0   0   0
5   763.158  500  0   0
6   1263.16  0   0   0
7   594.737  0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  163.158  0   0   0
22  1263.16  0   0   0
23  0   0  1411.76  0
24  1094.74  0  188.235  0
25  1026.32  236.842  0   0
26  0  1263.16  0   0
27  1052.63  0   0   0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      543.75  0
8      0      0      1500    0
9      0      743.75  756.25  0
10     0      0      1500    0
11     400    0      1000    0
12     0      1500   0      0
13     455    0      0      500
14     0      0      1500    0
15     1050   0      0      0
16     0      1500   0      0
17     195   1256.25  0      0
18     0      1500   0      0
19     0      0      1500    0
20     1200   0      0      0
21     0      556.25  0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     0      1331.25  0      100
29     0      0      1500    0
30     0      712.5   600     0
31     1200   0      0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 28 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 2 (Custo de atraso em R\$100,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 132 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 4845625
68 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B   0   0   0
C   0  100  0
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B  1756.25  0  0
C   0   0   0
D   100   0  0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3   815.789  0  500  0
4   1263.16  0   0   0
5   763.158  500  0   0
6   1263.16  0   0   0
7   594.737  0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  163.158  0   0   0
22  1263.16  0   0   0
23  0   0  1411.76  0
24  1094.74  0  188.235  0
25  1026.32  236.842  0   0
26  0  1263.16  0   0
27  1052.63  0   0   0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      543.75  0
8      0      0      1500    0
9      0      743.75  756.25  0
10     0      0      1500    0
11     400    0      1000    0
12     0      1500   0      0
13     455    0      0      500
14     0      0      1500    0
15     1050   0      0      0
16     0      1500   0      0
17     195   1256.25  0      0
18     0      1500   0      0
19     0      0      1500    0
20     1200   0      0      0
21     0      556.25  0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     0      1331.25  0      100
29     0      0      1500    0
30     0      712.5   600    0
31     1200   0      0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 29 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 3 (Custo de atraso em R\$0,00/t para todas as famílias e produtos)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 112 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 4650000
75 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0 -4.54747e-13
B   0   0   0
C   0 100   0
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0 -5.68434e-14
B  225   0   0
C 1818.75 6.25 0
D   0   0   0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3 1263.16 0   0   0
4 1263.16 0   0   0
5  815.789 0 500 0
6 1263.16 0   0   0
7  94.7368 500 0 0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21 631.579 0   0   0
22 1263.16 0   0   0
23  0   0 1411.76 0
24 1094.74 0  188.235 0
25 1263.16 0   0   0
26 347.368 915.789 0 0
27  0   584.211 0 0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[*,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      543.75  0
8      0      0      1500    0
9      0      1062.5  437.5  0
10     0      1212.5  0      100
11     220    1225    0      0
12     680    0      0      400
13     0      0      1500    0
14     0      1500    0      0
15     0      0      1312.5  0
16     0      0      1500    0
17     0      1500    0      0
18     1200   0      0      0
19     1200   0      0      0
20     0      0      1500    0
21     0      0      0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     315   0      0      100
28     320   1100   0      0
29     565   0      793.75  0
30     0      0      1312.5  0
31     0      1500   0      0
;

```

```

AMPL:

```

Tabela 30 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 4 (Custo de atraso da Família A e B = R\$200,00/t, Custo de atraso da Família C e D = R\$0,00/t)

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 123 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 4650000
62 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:      1      2      3      :=
A      0      0      0
B      0      0      0
C     -1.13687e-13  100    0
D      0      0      0

  [*,GI,*]
:      1      2      3      :=
A      0      0      0
B      0      0      0
C     2000      0      0
D      0      0      0
;

x [*,GA,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3     763.158    500      0      0
4     1263.16      0      0      0
5     1263.16      0      0      0
6     815.789      0      500      0
7     594.737      0      0      0
8      0      0      0      0
9      0      0      0      0
10     0      0      0      0
11     0      0      0      0
12     0      0      0      0
13     0      0      0      0
14     0      0      0      0
15     0      0      0      0
16     0      0      0      0
17     0      0      0      0
18     0      0      0      0
19     0      0      0      0
20     0      0      0      0
21     0      0      188.235    0
22     1263.16      0      0      0
23     0      0      1411.76    0
24     1263.16      0      0      0
25     0      1263.16      0      0
26     1021.05    236.842      0      0
27     1052.63      0      0      0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      543.75  0      0
8      0      1256.25  0      100
9      0      700      800      0
10     0      0      1500      0
11     0      0      1500      0
12     0      1500      0      0
13     650      0      0      400
14     0      1500      0      0
15     1050      0      0      0
16     0      0      1500      0
17     400      1000      0      0
18     0      0      1500      0
19     0      0      1500      0
20     1200      0      0      0
21     0      387.5  0      100
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     1200      0      0      0
29     0      712.5  787.5  0
30     0      0      1312.5  0
31     0      1500      0      0
;

```

```

AMPL:

```

*Tabela 31 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 5 (Custo de atraso do produto
 $GI = R\$0,00/t$; Custo de atraso do produto $GA = R\$200,00/t$)*

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 121 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 4670000
71 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B   0   0   0
C   0  100  0
D   0   0   0

  [*,GI,*]
:   1   2   3   :=
A   0   0   0
B  1537.5  0   0
C   506.25  6.25  0
D   0   0   0
;

x [*,GA,*] (tr)
:   A   B   C   D   :=
1   0   0   0   0
2   0   0   0   0
3   315.789  500  500  0
4   1263.16  0   0   0
5   1263.16  0   0   0
6   1263.16  0   0   0
7   594.737  0   0   0
8   0   0   0   0
9   0   0   0   0
10  0   0   0   0
11  0   0   0   0
12  0   0   0   0
13  0   0   0   0
14  0   0   0   0
15  0   0   0   0
16  0   0   0   0
17  0   0   0   0
18  0   0   0   0
19  0   0   0   0
20  0   0   0   0
21  163.158  0   0   0
22  1263.16  0   0   0
23  0   0   1411.76  0
24  1263.16  0   0   0
25  857.895  405.263  0   0
26  0   1094.74  188.235  0
27  1052.63  0   0   0

```

```

28      0      0      0      0
29      0      0      0      0
30      0      0      0      0
31      0      0      0      0

```

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      543.75  0
8      0      962.5  250      100
9      0      0      1500     0
10     0      0      1500     0
11     0      0      1500     0
12     1050   0      0      115.385
13     0      1500   0      0
14     0      0      1500     0
15     1050   0      0      0
16     0      1500   0      0
17     0      1500   0      0
18     1200   0      0      0
19     0      1037.5  0      284.615
20     0      0      1500     0
21     0      393.75  0      100
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      0
28     1200   0      0      1.13687e-13
29     0      0      1500     0
30     0      706.25  606.25  0
31     0      1500   0      0
;

```

```

AMPL:

```

*Tabela 32 – Resultado computacional do novo modelo para o cenário 6 (Custo de atraso do produto
GI = R\$200,00/t; Custo de atraso do produto GA = R\$0,00/t)*

```

ampl: model 'D:\AMPL\TCC\script.run';

Presolve eliminates 255 constraints and 140 variables.
Adjusted problem:
132 variables, all linear
56 constraints, all linear; 369 nonzeros
    27 equality constraints
    29 inequality constraints
1 linear objective; 123 nonzeros.

CPLEX 12.6.3.0: optimal solution; objective 5020000
76 dual simplex iterations (0 in phase I)
a [*,GA,*]
:      1      2      3      :=
A  5.26316    5.26316  -2.04636e-12
B   0          0          0
C   0        100          0
D   0          0          0

  [*,GI,*]
:      1      2      3      :=
A   0      0      0
B  1250    0      0
C   500    0      0
D   100    0      0
;

x [*,GA,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1       0      0      0      0
2       0      0      0      0
3     815.789    0      500    0
4     1263.16    0      0      0
5     1263.16    0      0      0
6     763.158   500    0      0
7     589.474    0      0      0
8       0      0      0      0
9       0      0      0      0
10      0      0      0      0
11      0      0      0      0
12      0      0      0      0
13      0      0      0      0
14      0      0      0      0
15      0      0      0      0
16      0      0      0      0
17      0      0      0      0
18      0      0      0      0
19      0      0      0      0
20      0      0      0      0
21      0      305.263    0      0
22     984.211   278.947    0      0
23      0      0      1411.76    0
24     1094.74    0      188.235    0
25     1263.16    0      0      0
26     1263.16    0      0      0

```

27	0	915.789	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

```

[* ,GI,*] (tr)
:      A      B      C      D      :=
1      0      0      0      0
2      0      0      0      0
3      0      0      0      0
4      0      0      0      0
5      0      0      0      0
6      0      0      0      0
7      0      0      550    0
8      0      0      1500   0
9      0      1250   250    0
10     0      0      1500   0
11     0      0      1500   0
12     0      0      1500   0
13     450    937.5   0      0
14     450    0      0      500
15     0      1312.5   0      0
16     1200   0      0      0
17     0      1500   0      0
18     0      1500   0      0
19     0      0      1500   0
20     1200   0      0      0
21     0      387.5   0      0
22     0      0      0      0
23     0      0      0      0
24     0      0      0      0
25     0      0      0      0
26     0      0      0      0
27     0      0      0      100
28     1200   0      0      -3.41061e-13
29     0      0      1500   0
30     0      712.5   600    0
31     0      1500   0      0
i

```

AMPL: