

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

**Modelos Matemáticos para Redução de Custos com
Manufatura e Distribuição de Cartões de Crédito**

Lucas Thomaz Januario Pinto

Dissertação de Mestrado do Programa de Mestrado Profissional em
Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria (MECAI)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Lucas Thomaz Januario Pinto

Modelos Matemáticos para Redução de Custos com Manufatura e Distribuição de Cartões de Crédito

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria.
VERSÃO REVISADA

Área de Concentração: Matemática, Estatística e Computação

Orientadora: Profa. Dra. Maristela Oliveira dos Santos

USP – São Carlos
Fevereiro de 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

T465m Thomaz Januario Pinto, Lucas
Modelos Matemáticos para Redução de Custos com
Manufatura e Distribuição de Cartões de Crédito /
Lucas Thomaz Januario Pinto; orientadora Maristela
Oliveira dos Santos. -- São Carlos, 2023.
80 p.

Trabalho de conclusão de curso (Programa de Pós-
Graduação em Mestrado Profissional em Matemática,
Estatística e Computação Aplicadas à Indústria) --
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, 2023.

1. Pesquisa Operacional. 2. Programação Linear
Inteira-Mista. 3. Otimização Matemática. 4. Cartão
de Crédito. 5. Meios de Pagamento. I. Oliveira dos
Santos, Maristela, orient. II. Título.

Lucas Thomaz Januario Pinto

**Mathematical Models to Reduce Credit Card Manufacturing
and Distribution Costs**

Master dissertation submitted to the Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Master – Professional Masters in Mathematics, Statistics and Computing Applied to Industry. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Mathematics, Statistics and Computing

Advisor: Profa. Dra. Maristela Oliveira dos Santos

USP – São Carlos
February 2023

*Este trabalho é dedicado ao meu pai Claudio e minha mãe Irene,
que dignamente me apresentaram à importância da honestidade e o valor da
persistência. Sem o apoio deles, minha incursão no meio científico jamais teria acontecido.
A minha esposa e filha que dão todo sentido para continuar seguindo em frente em busca de
novas conquistas.*

*Dedico também a minha professora orientadora Maristela, pela confiança, paciência, incentivo
e excelente orientação.*

A eles meu muito, muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os colegas de cursos e de trabalho que me acompanharam em toda essa jornada. Também agradeço à minha família e principalmente meu pai Claudio, que sempre me incentivou os estudos e a formação de caráter desde muito pequeno.

Um especial agradecimento aos Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos, por todo o incentivo, sugestões e compartilhamentos que sempre forneceu de maneira atenciosa durante minha graduação.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dr. Maristela Oliveira dos Santos por todos os conselhos e compreensão, e ao Prof. Dr. Antonio Carlos Moretti e Prof. Dr. Ary Orozimbo Chiacchio, pelo estilo e exemplo de vida.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que eu era antes.”*
(Dr. Martin Luther King Jr.)

RESUMO

PINTO, L. T. J. **Modelos Matemáticos para Redução de Custos com Manufatura e Distribuição de Cartões de Crédito**. 2023. 80 p. Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2023.

Este trabalho tem por intuito apresentar aplicação de modelos de otimização inteira à produção e distribuição de cartão de crédito de uma instituição financeira de grande porte. Importa, aqui, anunciar a complexidade da cadeia de suprimentos de cartões, dado o tamanho do seu portfólio e também a dificuldade de produzir, escoar e distribuir os mesmos à clientes atuais e futuros com um custo e qualidade assertivos. Um trabalho dessa natureza, por consequência, possibilita aplicação prática de conceitos acadêmicos mais avançados e ajudam as empresas principalmente ter visibilidade do planejamento de curto, médio e longo prazo, tanto no que tange capacidade produtiva quanto consumo de recursos e matéria-prima. Dessa maneira, este trabalho pode ser enquadrado no universo dos modelos matemáticos com aplicações à indústria. Para tanto, nessa dissertação é feita inicialmente uma descrição do problema de produção e transporte dos cartões, seguido de uma revisão bibliográfica de trabalhos anteriores que já tenham abordado, de alguma forma, um tema parecido. É então realizada a delimitação do escopo do estudo e a proposição de modelos matemáticos hierárquico e integrado de otimização linear inteira-mista. Posteriormente, é realizada a aplicação a dados simulados de uma instituição financeira brasileira de grande porte. Veremos que para esse problema, a redução de custos potencial identificada é significativa e, por fim, os resultados obtidos são discutidos sendo apresentadas considerações finais acerca do trabalho realizado e possíveis melhorias para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Programação Linear Inteira-Mista. Otimização Matemática. Cartão de Crédito. Meios de Pagamento.

ABSTRACT

PINTO, L. T. J. **Mathematical Models to Reduce Credit Card Manufacturing and Distribution Costs**. 2023. 80 p. Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2023.

This paper aims to present the application of integer-programming models to reduce a large financial institution's credit card manufacturing and distribution costs. It's crucial here to announce the complexity of the credit card supply chain, given the size of its portfolio and also the difficulty of producing, disposing, and distributing current and future customers with assertive cost and quality. Such work, therefore, enables the practical application of more advanced academic concepts and helps companies to have visibility of the medium and long-term planning in terms of productive capacity and consumption of resources and raw materials. Thus, this work is into the universe of mathematical models with industry applications, specifically integer linear programming. Therefore, initially, it describes the production and transportation problem of credit cards, followed by a bibliographic review of previous works that have already approached a similar theme. A delimitation of the scope of the study is made, and a proposition of integer-mixed programming mathematical models to two variations of the problem. Subsequently, fictitious data are used by a large Brazilian bank in computational tests. We will see that for this problem, the identified potential cost reduction is significant, and, finally, the results obtained are discussed, and final considerations about the work done and possible improvements for future research are presented.

Keywords: Operational Research. Linear Programming. Mathematical Optimization. Credit card. Payment Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de camadas e composição de um cartão de crédito	28
Figura 2 – Exemplo de Impressora <i>Offset</i>	30
Figura 3 – Exemplo de Impressora <i>Silk</i>	31
Figura 4 – Exemplo de Maquinário para Laminação	32
Figura 5 – Exemplo de máquina de corte	32
Figura 6 – Exemplo de máquina de embossing	33
Figura 7 – Exemplo de Cofre de Armazenagem de Cartões	34
Figura 8 – Exemplo de Entrega Normal via Correios	34
Figura 9 – Exemplo de Entrega Emergencial via Courier	35
Figura 10 – Cadeia de Suprimentos de Cartões	36
Figura 11 – Macroprocesso de Produção de Cartões	37
Figura 12 – Macroprocesso de Expedição de Cartões	39
Figura 13 – Fluxo de Solução	42
Figura 14 – Alocação Demanda	43
Figura 15 – Exemplo de uma solução obtida pelo modelo de produção	48
Figura 16 – demanda histórica para o modelo distribuição	48
Figura 17 – demanda histórica cruzada	49
Figura 18 – demanda final obtida	50
Figura 19 – Cenários de SLA, % Insucesso e Custo Total variando P	51
Figura 20 – Cenários de SLA, % Insucesso e Custo Total, fixando $P = 0.75$	52
Figura 21 – Representação das variáveis $\alpha_{cgmost'}$	54
Figura 22 – Representação da cadeia da abordagem do problema por janelas de tempo	62
Figura 23 – Gráfico de Função Objetivo conforme a variação de r	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contexto Histórico	19
1.2	Perspectivas para essa pesquisa	22
2	O PROBLEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO E A CADEIA DE CARTÕES	25
2.1	Breve revisão da literatura	25
2.2	Cadeia de Cartões: Processo de Fabricação	28
2.2.1	<i>Composição e moldagem de plástico</i>	29
2.2.2	<i>Impressão</i>	30
2.2.3	<i>Laminação</i>	31
2.2.4	<i>Corte, Fusão do Chip e Gravação de Dados Variáveis</i>	31
2.2.5	<i>Controle de qualidade</i>	33
2.2.6	<i>Distribuição e Entrega ao Cliente Final</i>	33
2.2.7	<i>Macroprocesso de Produção e Distribuição</i>	35
3	MODELAGEM MATEMÁTICA: HORIZONTE TEMPORAL AGREGADO	41
3.1	Introdução	41
3.2	Modelo para alocação da Produção	42
3.3	Modelo para alocação da Distribuição	45
3.4	Experimentos Computacionais	47
3.4.1	<i>Dados Utilizados e Ambiente de Teste</i>	47
3.4.2	<i>Dados para modelo produção</i>	47
3.4.2.1	<i>Observações sobre a solução do modelo de produção</i>	47
3.4.2.2	<i>Dados para modelo distribuição</i>	50
3.4.2.3	<i>Ambiente de teste</i>	50
3.4.3	<i>Análises dos Resultados</i>	51
4	MODELAGEM MATEMÁTICA: HORIZONTE TEMPORAL DETALHADO	53
4.1	Modelo para alocação da Produção e Distribuição com Janelas de Tempo	53
4.1.1	<i>Função Objetivo</i>	55

4.1.2	<i>Restrições</i>	55
4.2	Experimentos Computacionais	57
4.2.1	<i>Dados utilizados</i>	57
4.2.2	<i>Ambiente para teste</i>	58
4.2.3	<i>Gerador de dados simulados</i>	58
4.3	Resultados dos Experimentos	62
4.3.1	<i>Resultados para $r=0$</i>	62
4.3.2	<i>Resultados para $r=1$</i>	68
4.3.3	<i>Resultados para $r=3$</i>	69
4.3.4	<i>Resultados para $r=6$ ou maior</i>	70
4.3.5	<i>Instâncias Maiores</i>	71
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto Histórico

Um cartão de crédito, descrito de forma física, é uma pequena placa de plástico contendo um meio de identificação, como uma assinatura ou imagem, que autoriza a pessoa a ele indicada a comprar bens ou serviços em uma conta, pela qual o titular do cartão é cobrado a posteriori e periodicamente.

Segundo [MANDELL \(1990\)](#), o uso deles originou-se nos Estados Unidos durante a década de 1920, quando algumas empresas privadas, como petrolíferas e redes de hotéis, começaram a emití-los para que funcionários e alguns clientes fizessem compras exclusivamente nos pontos de venda dessas companhias.

Uma inovação posterior foi o sistema de cartão de crédito bancário, no qual o banco credita na conta do comerciante à medida que as notas de venda são recebidas. Os encargos são cobrados no final do período para o titular do cartão, que paga o banco a vista ou em parcelas mensais com adição de juros e encargos.

No final da década de 1950, o *Bank of America* começou a licenciar bancos nos Estados Unidos e vender o direito de emitir seus cartões chamados BankAmericards, a partir deste evento, começou o primeiro plano de incentivo ao uso do cartão de crédito. Esse programa foi iniciado em nível estadual na Califórnia em 1958, sendo postumamente licenciado em outros estados a partir de 1966 e renomeado de VISA em 1976, de acordo com o contexto histórico explicitado por [CHUTKOW \(2001\)](#). Já o primeiro cartão de crédito que pôde ser usado em vários estabelecimentos foi introduzido pelo Diner's Club Inc. ([DCLUB, 2019](#)) 8 anos antes, em 1950. Outro cartão importante desse tipo, conhecido como cartão de viagem e entretenimento, foi estabelecido pelo American Express Company em 1958 ([AMEX, 2019](#)).

Segundo a cronologia explicitada no site da companhia ([VISAINC, 2019](#)), em 1977 o nome VISA foi adotado internacionalmente para cobrir todos esses cartões e marca se tornou

então o primeiro cartão de crédito a ser reconhecido no mundo todo. Posteriormente, muitos bancos que iniciaram planos de cartão de crédito por diversas cidades e regiões nos Estados Unidos acabaram afiliados aos principais planos bancários nacionais à medida que a gama de serviços incluídos tais como refeições, hospedagem, bem como as compras em lojas se expandia. Esse desenvolvimento mudou a natureza do crédito pessoal, que não era mais limitado por local. O crescente alcance das redes de crédito permitiu que uma pessoa fizesse compras com cartão de crédito em escala nacional e, eventualmente, internacional, por isso, não foi surpresa esse sistema se espalhar para todas as partes do mundo. Além desse último, outros principais cartões bancários incluem MasterCard, anteriormente conhecido como *Master Charge* nos Estados Unidos (MWORLDWIDE, 2019), a JCB muito comum no Japão e, por fim, a Barclaycard no Reino Unido, Europa e o Caribe.

De acordo com O'Sullivan (2003), em sistemas de cartão de crédito bancário, o titular do cartão pode optar pelo pagamento parcelado, caso em que o banco ganha juros sobre o saldo devedor. A receita de juros permite que os bancos evitem cobrar uma taxa anual aos portadores de cartão e cobrar dos comerciantes participantes uma taxa de serviço mais baixa. Uma vantagem adicional do sistema é que os comerciantes recebem seus pagamentos prontamente depositando suas notas de venda no banco. Sob esse sistema, a empresa de cartão de crédito cobra dos titulares dos cartões uma taxa anual e fatura periodicamente - geralmente mensalmente. Os comerciantes cooperantes de todo o mundo pagam uma taxa de serviço ao emissor do cartão de crédito um percentual do faturamento total.

No final do século 20, o uso do cartão de crédito começou a aumentar drasticamente, com muitos clientes gastando um pouco a mais do que seus ganhos, conforme podemos ver em CORDRAY (2019). Os clientes que não conseguiram fazer os pagamentos mensais dos saldos pendentes nos cartões foram posteriormente atingidos com pesadas multas, assim como altos juros de mora. A recessão e o aumento do desemprego que acompanharam a crise financeira global de 2008 levou a um aumento nos padrões, à medida que os consumidores foram cada vez mais forçados a confiar no crédito. Normalmente, a dívida do cartão de crédito é maior em países industrializados como os Estados Unidos - o país mais endividado do mundo - Reino Unido e Austrália. Países não industrializados e países com leis rígidas de falência, como a Alemanha, tendem a ter uma dívida relativamente baixa no cartão de crédito.

Por meio desse contexto histórico, vemos que desde o início do século XX, esse mercado cresceu ao longo dos anos, em grande parte graças à informatização da sociedade como explicito em SYSTEM (2019). Os cartões de crédito revolucionaram os hábitos de consumo e mudaram a cara dos negócios. Na economia de hoje, eles representam uma parte importante para pagamento de atividades domésticas, comerciais e globais.

Por isso, para os usuários, os cartões de crédito são uma parte importante na vida cotidiana. Seja comprando combustível e mantimentos ou reservando um hotel e um carro alugado para as próximas férias, eles representam uma forma conveniente e segura de pagamento

para os consumidores. Os benefícios, desde a proteção contra fraude nas compras até a facilidade de contestar cobranças suspeitas ou atividades fraudulentas, torna-os uma forma de pagamento atraente.

Além da facilidade de uso e segurança adicional, eles podem ajudá-lo a criar um sólido histórico de crédito. Com o uso regular e o pagamento imediato, os consumidores responsáveis descobrirão que os credores estão mais dispostos a oferecer crédito adicional na forma de aumento de linhas de crédito, financiamentos e empréstimos ao consumidor (ISAAC, 2019).

Novos negócios e empreendedores que desejam fundar uma nova empresa geralmente encontram dificuldade para encontrar capital. Para pequenas empresas, os cartões de crédito representam uma importante linha de vida financeira e são tão importantes quanto fontes de financiamento tradicionais, como empréstimos pessoais por exemplo, porém esses últimos apesar de fornecerem um capital geralmente superior, não tem a mesma praticidade na aprovação do crédito. Por fim, vemos que os cartões ajudam essas empresas financeiramente e têm um impacto positivo em seu crescimento.

Conforme explicitado por LONG (2019), apesar disso tudo, precisamos lembrar que cartões de crédito não são importantes apenas para indivíduos e empresas, eles são um aspecto importante do crescimento econômico contínuo. Segundo o artigo publicado por Scholnick *et al.* (2008), o dinheiro funciona melhor em transações presenciais, já os cheques, que estão entrando em desuso, levam tempo para serem compensados, e assim como dinheiro físico precisam de um esforço grande de bancos e o estado para fazê-los circular. Por isso, pagamentos e transações eletrônicas, facilitam muito o funcionamento em um mercado global. Essa facilidade incentiva transações de longas distâncias que aumentam o produto interno bruto e o consumo, os quais levam à criação de empregos. Logo, eles desempenham um papel importante no ciclo de aumento de consumo e produção, oferecendo aos comerciantes um método de pagamento garantido e oferecendo aos consumidores uma maneira de preencher a lacuna entre contracheques salariais em tempos de emergência.

Para acrescentar, segundo HAYASHI (2019), muitos cartões de crédito modernos tentam atrair os titulares, oferecendo benefícios e recompensas adicionais ao consumidor. Com base no tipo de cartão que você possui, você pode se qualificar para receber recompensas pelo uso, tais como: compras com desconto, reembolso de um percentual do valor das compras, seguro de cancelamento de viagem e milhas aéreas. Com uma pequena comparação de compras, você pode encontrar um cartão que oferece recompensas para se adequar ao seu estilo de vida. Alguns deles permitem que você obtenha novas compras sem juros por vários meses e isso permite que você financie a visita de um médico de emergência ou o reparo do carro sem pagar encargos financeiros.

Nos dias de atuais, baseado em BACEN (2019), pelo menos um quarto dos pagamentos efetuados no Brasil são feitos com cartões de crédito. Esse tipo de cartão permite que os consumidores comprem produtos ou serviços sem dinheiro e paguem por eles posteriormente.

Para se qualificar para este tipo de crédito, o consumidor deve abrir uma conta em um banco que patrocina um cartão. Eles então recebem uma linha de crédito com um valor especificado e a partir daí podem usá-lo para fazer compras em comerciantes participantes.

Há quatro principais fontes de receita no mercado de cartão de crédito, são elas: os juros cobrados sobre o saldo não pago, a taxa anual pelo uso do cartão, a cobrança de uma taxa por transação feita pelo cliente de um estabelecimento credenciado e também a locação de equipamentos de verificação de cartão de crédito para os comerciantes. Todas essas fontes de receita segundo a Associação Brasileira das Empresas de Cartões de Crédito e Serviços (ABECS) movimentaram um faturamento de R\$ 1,1 trilhão no balanço anual de 2018 (ABECS, 2019).

1.2 Perspectivas para essa pesquisa

Este trabalho tem por intuito apresentar modelos de otimização inteira aplicados à produção e distribuição de cartão de crédito de uma instituição financeira de grande porte. Assim como o problema de produção e distribuição integrada visto em CHEN (2019), essa dissertação investigará modelos de otimização para lidar com o problema. Importa, aqui, anunciar a complexidade da cadeia de suprimentos de cartões, devido grande variedade, dado o tamanho do seu portfólio, e a dificuldade de escoar e distribuir os mesmos a clientes atuais e futuros com um custo e qualidade assertivos.

Um trabalho dessa natureza, por consequência, possibilita aplicação prática de conceitos acadêmicos mais avançados e ajudam as empresas principalmente ter visibilidade do planejamento de médio e longo prazo, tanto no que tange capacidade produtiva quanto consumo de recursos e matéria-prima. Dessa maneira, este trabalho pode ser enquadrado no universo dos modelos matemáticos com aplicações à indústria.

Baseado em Willians (2013) “O exercício real da construção de um modelo geralmente revela relações que não eram aparentes para muitas pessoas e como resultado, um maior entendimento é alcançado do objeto que está sendo modelado. Tendo construído um modelo, geralmente é possível analisá-lo matematicamente para ajudar a sugerir cursos de ação que de outra forma não seriam aparentes. Além disso, a experimentação é possível com um modelo, enquanto muitas vezes não é possível ou desejável para experimentar com o objeto que está sendo modelado.”

O foco deste estudo, através do desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização inteira, é avaliar o planejamento de produção e distribuição da empresa e sugerir novos planos e alternativas que possam aperfeiçoar fatores como: quais recursos consumir, quanto de matéria prima de PVC ou tinta utilizar, em que gráfica produzir, de qual origem sair o cartão a ser entregue em cada região e qual configuração da cadeia de suprimentos otimiza o nível de serviço de entrega ao cliente. Em resumo, no final deste estudo espera-se demonstrar que por meio de abordagens de otimização, torna-se possível mensurar a viabilidade financeira de processos, possibilitando aperfeiçoá-los, validá-los por meio de ferramentas, que mesmo que específicas, na

sua maioria são acessíveis a empresas.

Na empresa em questão, há pouca mão de obra especializada e que esteja apta a formulação do problema através de uma visão integrada da cadeia de suprimentos de cartões, o que reforça a necessidade desse estudo. Para acrescentar, observando estudo da ABECS, a representante oficial do mercado de cartões, revela no balanço geral de 2018, que apesar desse mercado representar 50% de todo tipo de pagamento no Brasil, ele está sendo invadido por mais de 200 *fintechs* que são empresas digitais e de baixo custo operacional, o que reforça a necessidade de maior eficiência e dimensionamento de uma cadeia de suprimentos enxuta por parte dos chamados bancos tradicionais.

Essa gestão está alinhada a Ballou (2006) que enfatiza “gerenciar estoques é equilibrar a disponibilidade dos produtos, ou seja, controlar o que há fisicamente para venda e o que é preciso repor. É garantir que o produto esteja disponível no tempo certo e nas quantidades necessárias evitando custos adicionais”.

Em relação ao estudo da cadeia de suprimentos de cartões, podem ser delineadas pelo menos três abordagens para o problema em diferentes níveis, conforme exposto por Crainic e Laporte (1997):

Nível estratégico: Trata da análise de malha da cadeia de cartão, como a localização física dos fabricantes e distribuidores, o seu porte e capacidade, quais modais serão utilizados, entre outros.

Nível tático: No nível tático, é estudada a rede de serviços oferecida pelos fabricantes e operadores logísticos, ou seja, quais serão as sequências e lotes de produção, quais serão as rotas dos veículos na rede, de forma a manter um nível de serviço adequado, respeitando todas as janelas de entrega e também visando uma redução de custos a partir de uma demanda esperada.

Nível operacional: No nível operacional, é abordado o dia-a-dia da operação, como atraso de produção de um determinado cartão ou de veículos para recolhimento, aumento da capacidade produtiva a curto prazo ou mesmo o envio direto em caso de demanda acima do esperado e o gerenciamento e condução dos transportes e movimentação das cargas.

No presente trabalho, será dado tanto enfoque ao nível tático quanto ao nível operacional, pois apesar de discutirmos lotes mínimos de produção e janelas de entrega, o que abrangeria o nível tático, é preciso lembrar que os modelos propostos dessa tese têm desdobramento diário da produção e entrega, sendo assim predominantemente operacionais.

De maneira mais ampla, o desafio dos problemas propostos é, a partir de uma rede de produção e distribuição já estabelecida, deve-se definir quais os melhores planos de produção e distribuição de maneira a reduzir seus custos mantendo o nível de serviço desejado.

Com isso em mente, no Capítulo 2 é abordado o escopo do problema e processo envolvido, além disso são discutidas todas as premissas do problema que deverá ser efetivamente tratado no presente trabalho. incluindo a abordagem para a solução dele.

Uma vez delimitado o escopo, no Capítulo 3 é proposto uma modelagem de programação linear inteira mista para o problema, no caso um modelo com horizonte temporal agregado. Apesar de ser um modelo mais simplificado, ele continua sendo relevante para analisar a produção e distribuição. Além disso, analisar a demanda consolidada é fundamental para se construir a definição do plano de produção mestre e analisar a capacidade da cadeia de suprimentos.

Em um primeiro momento, no Capítulo 3, é realizada a descrição da fase inicial do método, em que cada demanda do sistema é analisada e alocada na rede buscando a minimização de custos. É descrito também um método de melhoria local em que são realizadas alterações nas soluções em busca de mais oportunidades de redução de custo e manutenção do nível de serviço.

Em seguida, são apresentados os resultados da aplicação para dados transformados de um Banco de Varejo de grande porte, sendo avaliada a sua factibilidade em termos de aplicação a casos reais e em potenciais benefícios. Ao final do capítulo, discute-se a respeito dos resultados identificados.

No Capítulo 4, introduzimos um modelo mais sofisticado, real e aderente ao que acontece na prática. Nesse modelo, chamado de janelas de tempo, foram acrescentadas mais restrições e análogo ao capítulo anterior são discutimos os principais resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 5, são realizadas as considerações finais a respeito do trabalho, incluindo as suas principais conclusões e sugestões de continuidade da pesquisa no futuro.

O PROBLEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO E A CADEIA DE CARTÕES

2.1 Breve revisão da literatura

O universo de problemas de otimização engloba também problemas de planejamento da produção integrados com a distribuição, que são caracterizados por serem bastante desafiadores, principalmente devido à sua estrutura complexa e os dados dinâmicos que influenciam os mesmos. Inicialmente na literatura vemos esse problema do planejamento integrado da cadeia separado como dois problemas clássicos: o problema de dimensionamento de lotes e o problema de transporte de bens de consumo ao cliente final.

O problema de dimensionamento de lotes tem como finalidade uma questão muito importante em todas as empresas que manufaturam bens: quando e quanto se deve produzir, respeitando o *setup* (preparação) de máquina e capacidade de fábricas, matérias-primas disponíveis e principalmente reduzindo e otimizando custos. Este problema consiste em determinar um plano produção ou compra nos próximos períodos de tempo do horizonte de planejamento, geralmente dimensionado em dias, semanas ou meses. Ele também tem como função determinar os níveis de estoque e os recursos necessários e disponíveis para a implementação do plano, sendo assim esse tipo de modelo suporta decisões de médio prazo na indústria.

Nos problemas de dimensionamento de lotes, [Wagner e Whitin \(1958\)](#) são amplamente citados por serem os pioneiros ao apresentarem um algoritmo para uma solução da versão dinâmica do modelo de tamanho de lote econômico, permitindo a demanda de um único item, custos de manutenção do estoque e custos de *setup* variarem ao longo de t períodos. Por fim, nesse modelo deseja-se que o custo total seja mínimo e que a demanda conhecida seja satisfeita em cada período. [Trigeiro, Thomas e McClain \(1989\)](#) aborda o problema com múltiplos itens, com limitação de capacidade, e tempos e custos de preparações não nulos. Os autores desenvolveram

uma heurística amplamente utilizada pela comunidade científica, que combina uma relaxação lagrangiana com um procedimento de suavização heurística que constrói soluções viáveis (planos de produção) que não requerem horas extras para o *setup* de máquina. Revisões sobre o problema de dimensionamento de lotes considerando diversas características, integrações e aplicações podem ser encontradas em [Karimi, Ghomi e Wilson \(2003\)](#), [Jans e Degraeve \(2008\)](#), [Buschkühl et al. \(2010\)](#), [Glock, Grosse e Ries \(2014\)](#), [Almada-Lobo et al. \(2015\)](#) e [Brahimi et al. \(2017\)](#).

Além dos problemas de dimensionamento de lotes outra classe de problemas que são muito importantes na cadeia de suprimentos é justamente o problema de rede de distribuição. Eles são importantes pois consideram uma ou mais fontes de origem, centros de distribuição e locais intermediários por onde materiais e produtos apenas passam, com o objetivo de fazer a entrega ao ponto final, ao cliente ou demandante da cadeia. Os problemas de transporte podem ser considerados uma simplificação do problema de distribuição de custo mínimo.

Nos deparamos com um problema de transporte quando precisamos enviar unidades de um produto por uma rede de modais (rodoviário, ferroviário, dentre outros) que conectam um determinado local ou grupo de locais de entrega. O propósito, além de minimizar o custo de transportar bens de um local para outro, é proceder de forma que as necessidades de cada área de destino sejam conhecidas e todo local de remessa opere dentro de sua capacidade.

Uma das primeiras vezes que esse problema apareceu foi em um artigo de [Dantzig e Ramser \(1959\)](#) no qual, a primeira abordagem algorítmica foi escrita e aplicada à distribuição de gasolina por caminhões de combustível. Com frequência, nesse tipo de problema, o contexto é o de entregar mercadorias localizadas em um depósito central para clientes que fizeram pedidos para tais mercadorias com o objetivo maior de minimizar o custo total da rota.

Apesar dos modelos citados serem aplicáveis à cadeia de cartões, queremos dar um passo além, que seria a integração de ambos modelos com o objetivo de tomada de decisão simultânea, olhando tanto a distribuição quanto a produção. Logo estamos, por um lado, intimamente relacionados ao problema de dimensionamento e distribuição da produção, que integra dimensionamento de lotes, estoque e decisões de distribuição simultaneamente e, por outro lado, lida com o lote mínimo integrado com janelas de tempo, dado a necessidade de decisões no horizonte de planejamento. Uma revisão que destaca os aspectos da integração do problema de dimensionamento de lotes e produção pode ser encontrada em [Adulyasak, Cordeau e Jans \(2015\)](#).

A abordagem mais complexa faz-se necessária pois nos últimos anos, a crescente competição entre as cadeias de suprimentos obrigou as empresas a buscarem soluções que resultem em economia de custos e melhoria da eficiência, por um lado, e que ofereçam serviços ainda mais rápidos, flexíveis e confiáveis aos clientes, por outro. A ênfase na redução de custos de estoque aliada ao crescente custo de transporte e datas de entrega competitivas acentuam a importância da coordenação e integração das funções e decisões da cadeia de suprimentos. Sob uma abordagem integrada, várias funções as decisões dentro de uma cadeia de suprimentos são simultaneamente

tratadas e otimizadas conjuntamente.

A maioria das pesquisas e estudos de caso sobre integração da cadeia de suprimentos confirma o efeito positivo da integração no desempenho dos negócios. A otimização simultânea de decisões críticas da cadeia de suprimentos tem sido uma tarefa tão complexa e difícil que a abordagem comum para resolver qualquer problema integrado era trata-las separadamente, ou seja, aplicar o modelo de lote de produção e o rede de distribuição de forma independente. Uma abordagem não simultânea, como a última citada, tem suas limitações, pois impacta diretamente as decisões táticas e operacionais, que são os alvos e vantagens da integração.

Nesse sentido, um artigo que fundamentou essa dissertação de mestrado foi o [Darvish e Coelho \(2016\)](#), pois descreve um modelo para suportar a demanda de uma empresa de bens de consumo. Nesse problema as fábricas da empresa estão localizadas no Canadá e Estados Unidos e seus clientes estão espalhados por toda a América do Norte. O Modelo parte do pressuposto de uma demanda determinística, dado a alta confiabilidade da previsão de demanda, além disso, supõe-se que o tempo necessário para produzir um item e alocá-lo no estoque da fábrica seja insignificante, dado o tamanho do horizonte temporal. Por fim, a solução para este problema identifica os períodos em que a produção ocorre, bem como as quantidades produzidas, armazenadas e quais clientes serão atendidos em cada um dos períodos de cada um dos armazéns. Um ponto interessante é que, além de trabalhar com janelas de tempo, ele também permite o atraso na entrega de alguns itens por um fator r , justamente para simular o que ocorre na vida real: a priori queremos que todas as entregas ocorram na janela de tempo correta, porém devido a diversos imprevistos isso não acontece, e por fim tolera-se um máximo atraso para aquela demanda esperada naquele período.

É preciso ressaltar que o artigo restringe o modelo a produzir e entregar um único produto, várias fábricas e períodos, inclui janelas de tempo de entrega e decisões de localização das instalações. Usa-se um algoritmo *branch-and-cut* de um solver comercial para resolver o problema avaliando os *trade-offs* entre custos e entregas rápidas, e no fim os autores mostram a vantagem competitiva da abordagem integrada, tanto em termos de custos totais quanto em nível de serviço.

Dois anos após o primeiro artigo sobre janelas de tempo, os autores publicaram o artigo [Darvish e Coelho \(2018\)](#) no qual é mostrado um modelo que integra a localização das instalações, produção, estoque e decisões de distribuição em um ambiente multiproduto, multinível e multifábrica, complementando a visão necessária ao artigo anterior, servindo também como uma das bases para construção dessa dissertação.

Outro artigo relacionado com o problema que essa dissertação pretende resolver é o [Mostafa \(2015\)](#). No artigo em questão os autores argumentam que os modelos clássicos de otimização inteira lidam com casos relativamente simples e não necessariamente são aplicáveis aos problemas de mercado. No entanto, na vida real, existem sistemas e variantes mais complexas, logo no sentido de dar um passo adiante, o artigo propõe uma descrição genérica do

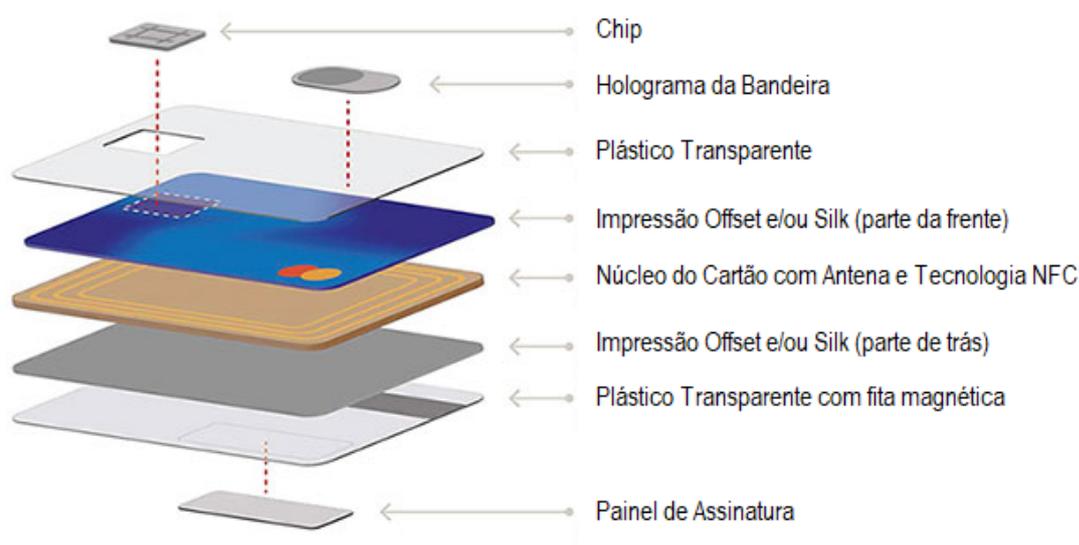
problema integrado e também desenvolve um modelo matemático para resolver o problema de sequenciamento da produção, estoque e distribuição. Por fim, aborda-se o problema de uma perspectiva conceitual, é criado um *framework* para ilustrar o trabalho potencial neste tópico e o objetivo do artigo é fornecer boas referências e orientações para os pesquisadores evoluírem com problemas integrados da cadeia de suprimentos.

Uma outra contribuição relevante para o planejamento da produção e distribuição na literatura é trabalho de [Cohen e Lee \(1988\)](#). Eles propõem uma metodologia que considera a relação entre um sistema de produção e distribuição de vários estágios, capturando as interações estocásticas e dinâmicas. O modelo proposto é composto por um submodelo de controle de material, um submodelo de produção, um submodelo de estoque e um submodelo de distribuição.

Relacionado com o tema também temos [Armentano, Shiguemoto e Løkketangen \(2010\)](#) que trata do problema de integrado de planejamento da produção e distribuição/roteamento ao longo de períodos de um horizonte de planejamento finito. Os autores desenvolveram duas variantes da busca tabu para esse problema, uma que envolve construção e uma memória de curto prazo, e uma que incorpore uma memória de longo prazo usada para integrar um procedimento de vinculação de caminho à primeira variante. As variantes de pesquisa de tabu propostas são testadas em instâncias geradas com até dez itens e em instâncias da literatura envolvendo um único item. Alguns outros trabalhos que consideram o problema da produção com roteamento são [Archetti et al. \(2011\)](#), [Miranda et al. \(2018\)](#), [Mostafa e Eltawil \(2019\)](#), [Li et al. \(2019\)](#) e [Manousakis et al. \(2022\)](#).

2.2 Cadeia de Cartões: Processo de Fabricação

Figura 1 – Exemplo de camadas e composição de um cartão de crédito



Fonte: [thales \(2020\)](#).

A [Figura 1](#) representada de forma lúdica a composição de um cartão de crédito. Eles são feitos de várias camadas de plástico laminado, para ser específico, geralmente são usadas 4 a 5, sendo que o centro é geralmente feito de uma resina plástica conhecida como acetato de polivinila (PVCA). Essa resina é misturada com materiais opacificantes, corantes e plastificantes para dar a aparência mais rígida, consistência e durabilidade adequada. Esse material é laminado com outros materiais plásticos transparentes e, por fim, eles aderem entre si quando aplicados pressão e calor.

Uma variedade de tintas ou corantes também são usados para imprimir os cartões de crédito. Estão disponíveis em várias cores e foram projetados para uso em substratos plásticos, além disso, alguns fabricantes usam tintas magnéticas especiais para imprimir a tarja magnética na parte de trás do cartão e as mesmas são feitas dispersando partículas de óxido de metal em alguns solventes apropriados. Alguns processos adicionais de impressão de itens especiais também fazem parte da produção de cartões, tais como hologramas reflexivos e o painel de assinatura.

O processo de fabricação consiste em várias etapas: primeiro a bobina de plástico e os materiais laminados são compostos e moldados em forma de folha. Então ela é impressa com as informações apropriadas e em seguida, plásticos laminados são aplicados a folha para, por fim, com ela montada a mesma seja cortada em cartões individuais.

2.2.1 Composição e moldagem de plástico

O plástico é fabricado por fusão e mistura de acetato de polivinila com outros aditivos. Os componentes misturados são transferidos para uma prensa de moldagem por extrusão, que força o plástico fundido através de um pequeno orifício plano conhecido como matriz.

Quando a folha sai da matriz, ela passa por uma série de três rolos empilhados, um sobre o outro, e que puxa a mesma. Esses rolos mantêm a folha plana já com a espessura adequada e, após isso, as mesmas poderão passar por unidades de refrigeração adicionais, antes de serem cortadas em folhas separadas por serras, tesouras ou fios quentes. As folhas cortadas entram em um empilhador que as mantém organizadas em um espaço reservado e as armazena para operações subsequentes.

As películas laminadas usadas para revestir o material do de PVCA são feitas por um processo de extrusão semelhante. Estas películas mais finas podem ser feitas com um processo de moldagem por ranhura em que uma película de plástico fundido é espalhada sobre um rolo de fundição, sendo que o rolo determina a espessura e a largura do filme. Após o resfriamento, os filmes são armazenados em rolos até estarem prontos para uso.

2.2.2 Impressão

O núcleo de plástico do cartão é impresso com texto e gráficos. Isso é feito usando uma variedade de processos comuns de serigrafia. Além disso, uma das películas laminadas também pode sofrer operações subsequentes, onde é impressa com tinta magnética. Alternativamente, a faixa magnética pode ser adicionada por um método de estampagem quente. Os cabeçotes magnéticos usados para codificar e decodificar as partículas de óxido de ferro só podem operar se o meio magnético estiver próximo à superfície do cartão, portanto, as partículas de metal devem ser colocadas sobre a camada de laminação. Após a conclusão do processo de impressão, a folha está pronta para ser laminada.

Dependendo do tipo de acabamento de impressão que se quer ter na confecção do cartão, o tipo de impressora offset, apresentado na [Figura 2](#), não é suficiente para dar ao cartão algumas tonalidades e tipos de cores especiais, como dourado ou prateado.

Figura 2 – Exemplo de Impressora *Offset*



Fonte: [Autoprint \(2019\)](#).

Para esse tipo de cor também é necessário o uso de um tipo de impressão chamado de *silk*, onde o processo de confecção é bem parecido com a estampagem de camisetas. Diferente das impressoras *offset* que geralmente tem alta capacidade de produção por hora, as impressoras *silk* possuem menor escoamento da produção e dado maior complexidade da impressão e trabalho manual. Podemos ver na [Figura 3](#) um exemplo do que é o maquinário que estamos descrevendo.

É muito frequente a maioria dos cartões precisar passar tanto pela impressão *offset* quanto pela impressão *silk*. Inclusive, o custo unitário dele está diretamente associado a quantas cores diferentes serão usadas em sua fabricação, e por isso para precificação, os mesmos são classificados em 4 grupos: aqueles que usam até 2 cores, de 3 a 4 cores, de 5 a 8 cores e, por fim, os que usam de 9 a 16 cores. Dessa forma um dos muitos desafios desse problema saber desenhar a programação ótima de produção de cartão de forma que minimizamos o *setup* (preparação)

Figura 3 – Exemplo de Impressora *Silk*

Fonte: [Taoxing \(2019\)](#).

de máquina, pois nesse caso, o mesmo onera muito a produção, afinal o tempo de *setup* da impressão *silk* é quase 2 vezes maior do que a *offset*, que é de cerca de 30 min.

2.2.3 Laminação

A laminação ajuda a proteger o acabamento do cartão e aumenta sua rigidez e resistência. Nesse processo, as folhas são inseridas em um sistema de rolos. Esses rolos mantêm as folhas de plástico juntas enquanto eles escoam por dentro da máquina para uma fase de aderência. É justamente nessa parte que, um par de lâmpadas de quartzo infravermelho aquece os filmes plásticos superior e inferior. Essas lâmpadas são apoiadas com refletores para focar a energia radiante em uma área estreita dos filmes, o que otimiza uma ligação suave do filme ao material de PVCA. As películas laminadas são então totalmente aderidas ao material pressionando com placas de metal, que são aquecidas a 130°C e aplicadas com uma pressão de 1,1 MPa. Esse processo de laminação pode levar até 3 minutos. Vemos um exemplo desse equipamento na [Figura 4](#).

2.2.4 Corte, Fusão do Chip e Gravação de Dados Variáveis

Após a laminação, seguimos para a montagem final da placa de PVC, que é completada por um método conhecido como corte e vinco, onde cada montagem produz uma folha, que é cortada em 50 cartões físicos. Eles são obtidos cortando primeiramente o conjunto longitudinal-

Figura 4 – Exemplo de Maquinário para Laminação



Fonte: WenLin (2023a).

mente para formar cinco seções alongadas. Um exemplo da máquina que faz o corte dos cartões é descrito na Figura 5.

Cada uma das cinco seções é cortada para formar 10 cartões de crédito. Nas operações subsequentes, é incluído o chip no mesmo, o que configura para o cartão o principal custo agregado, dado valor do chip, pois é o item que configura maior segurança e custo tecnológico. O nome técnico dessa etapa é chamado de *embossing*, e vemos um exemplo do maquinário utilizado na Figura 6.

Depois, para finalizar o processo de produção, o cartão é gravado com números de conta, titular, código de segurança e painel de assinatura. Os cartões acabados são então preparados para o transporte, geralmente anexando o cartão a uma carta em papel com adesivo, conhecida como carta-berço.

Figura 5 – Exemplo de máquina de corte



Fonte: WenLin (2023b).

Figura 6 – Exemplo de máquina de embossing



Fonte: [CNJACK \(2019\)](#).

2.2.5 Controle de qualidade

Os principais problemas de qualidade estão associados à composição do plástico e à correspondência de cores das tintas. Como em qualquer procedimento de composição, os ingredientes devem ser cuidadosamente pesados e misturados sob temperatura e condições adequadas.

Da mesma forma, o processo de moldagem deve ser monitorado para evitar defeitos, que podem causar rachaduras ou quebra dos cartões. A verificação final da qualidade é para garantir que estejam corretos os números a serem carimbados nos cartões durante o processo de gravação.

Caso algum cartão apresente problema e não passe pelos critérios do controle de qualidade, eles não são descartados. Eles são picados, moídos e por fim enviados a uma empresa que os derrete, processa e então disponibiliza novas bobinas de material PVC reciclado que pode ser usado para fazer novos cartões. Historicamente cerca de 2 % dos cartões produzidos passam por esse processo.

2.2.6 Distribuição e Entrega ao Cliente Final

Após serem produzidos, os cartões são armazenados em cofres no próprio fabricante. Depois disso, quando há um pedido de envio desse item, os dados do usuário são gravados no plástico e eles são enviados ao setor de expedição, onde o kit do cliente é montado e coletado por uma das empresas de entrega, para então serem destinados ao endereço residencial do cliente ou um ponto de atendimento como por exemplo uma agência bancária.

A distribuição física dos cartões também é complexa por que é feita por uma rede que envolve os correios, transportadoras, motociclistas, também conhecidos como couriers, para chegar a um dos milhões de clientes de cartão de crédito no Brasil.

Figura 7 – Exemplo de Cofre de Armazenagem de Cartões



Fonte: [rockmaxguard \(2023\)](#).

Figura 8 – Exemplo de Entrega Normal via Correios



Fonte: [Folhapress \(2019\)](#).

Dada à importância dessa operação devido aos altos custos de manufatura e de logística, é relevante estudar a aplicação de técnicas eficientes da pesquisa operacional, a fim de buscar um melhor desempenho operacional e gerar uma vantagem competitiva, conseguindo quantificar as operações e dimensionar o impacto financeiro delas mantendo um bom nível de serviço de entrega.

Em particular pode-se dizer que a pesquisa operacional nos auxilia em resoluções de problemas, de diferentes segmentos, através de técnicas e modelos matemáticos, para otimizar processos, obter menores custos de operações, melhorar o nível de serviços e desempenhar um planejamento tático e operacional competitivo.

Figura 9 – Exemplo de Entrega Emergencial via Courier



Fonte: [EcommerceBrasil](#) (2019).

2.2.7 Macroprocesso de Produção e Distribuição

Dessa forma, após explicitarmos o problema abordado e detalhando um pouco mais afundo o desafio de produzir e distribuir, conseguimos através do texto criar os dois Macroprocessos principais e que definem a cadeia de cartões apresentados nas Figuras 11 e 12. Apesar de apresentar a cadeia em detalhes, nesta dissertação vamos considerar as etapas de produção agregadas, ou seja, no problema de dimensionamento de lotes consideramos a produção de lotes de cartões de diversos tipos considerando uma capacidade agregada para produção em um determinado período. A produção ocorre em gráficas (também conhecidas como fábricas) espalhadas pelo Brasil e que devem enviar os cartões para diversos clientes agregados em regiões, os quais possuem demanda por cartões ao longo de um horizonte de tempo. Os cartões são entregues aos clientes e regiões utilizando operadores e serviços, conforme podemos observar na Figura 10, onde cada etapa da cadeia pode ser definida por:

Canal: Onde foi feito o pedido do cartão pelo cliente. O canal pode ser uma agência bancária, o aplicativo de celular, uma central de atendimento, o próprio site do banco ou um parceiro da instituição financeira.

Proposta: Se o cartão pedido é de crédito, débito, múltiplo (cartão com a função débito e crédito) ou se é um cartão pré-pago.

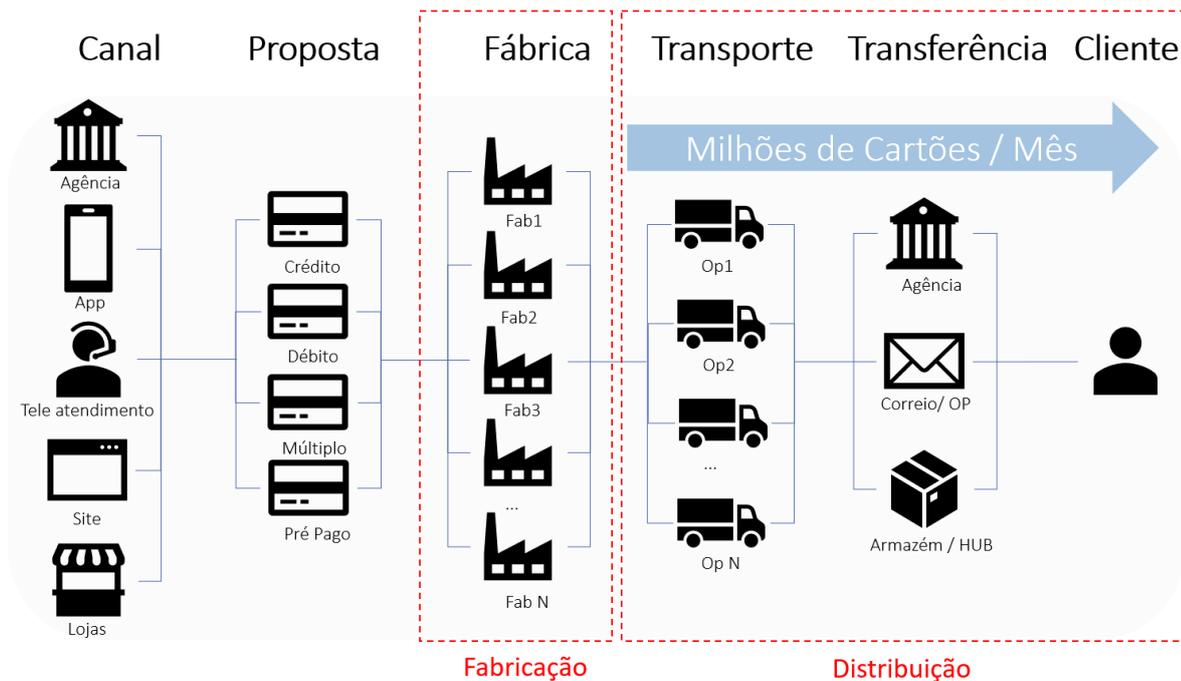
Fábrica: Também conhecido como gráfica onde será produzido o cartão.

Transporte e Transferência: Movimentação e entrega do item por operadores logísticos, sendo

que ele pode ser deixado em uma agência, na agência dos correios, em um posto de coleta do operador logístico ou, o que é mais comum, na residência do cliente.

Cliente: Quem pediu e usará o cartão.

Figura 10 – Cadeia de Suprimentos de Cartões



Fonte: Autor (2023).

Para elucidar mais a etapa de fabricação, na Figura 11 é mostrado esse macroprocesso onde cada etapa de fabricação é definida por:

Pré-Impressão: Setup das impressoras *offset* e/ou *silk* no que diz respeito ao *layout* de cores de tal forma que a cor real impressa seja idêntica ao desenho digital do cartão.

Offset: Impressão simples, mas de alto volume.

Silk ou serigrafia: Impressão necessária quando o produto precisa de um efeito especial tal como brilho.

Punçamento: Punçar uma folha de PVC em outra de forma a deixá-las juntas umas das outras para irem para a etapa de laminação.

Prensamento ou Laminação: Após punçadas as folhas são comprimidas de forma a ficarem coladas umas nas outras, gerando um plástico rígido.

Corte: Corte das folhas prensadas na forma exata de um cartão de crédito.

QA: Abreviação *Quality Assurance* ou etapa de verificação de qualidade do produto, para garantir que um cartão produzido seja idêntico ao protótipo validado pela instituição bancária. Aqueles validados pela inspeção de qualidade continuam para a próxima etapa, no entanto os negados são destruídos e reaproveitados postumamente na construção de itens reciclados.

Holografia: Cola-se o logo holográfico da bandeira no cartão. Geralmente são imagens de alumínio com aspeto semelhante a um espelho.

Estoque PA sem chip: Armazenagem de cartões praticamente prontos (produto acabado) faltando apenas inserção do chip. Geralmente não se coloca ele no cartão até ter um pedido formal do cliente, pois este é único e intransferível e diretamente vinculado a dados do usuário final.

Embossing: Gravação dos dados do cliente no plástico tal como número e nome do consumidor. Nessa etapa também ocorre o que é conhecido como *Embedding*, ou seja, a inserção e colagem do chip tendo-se assim o item final para uso.

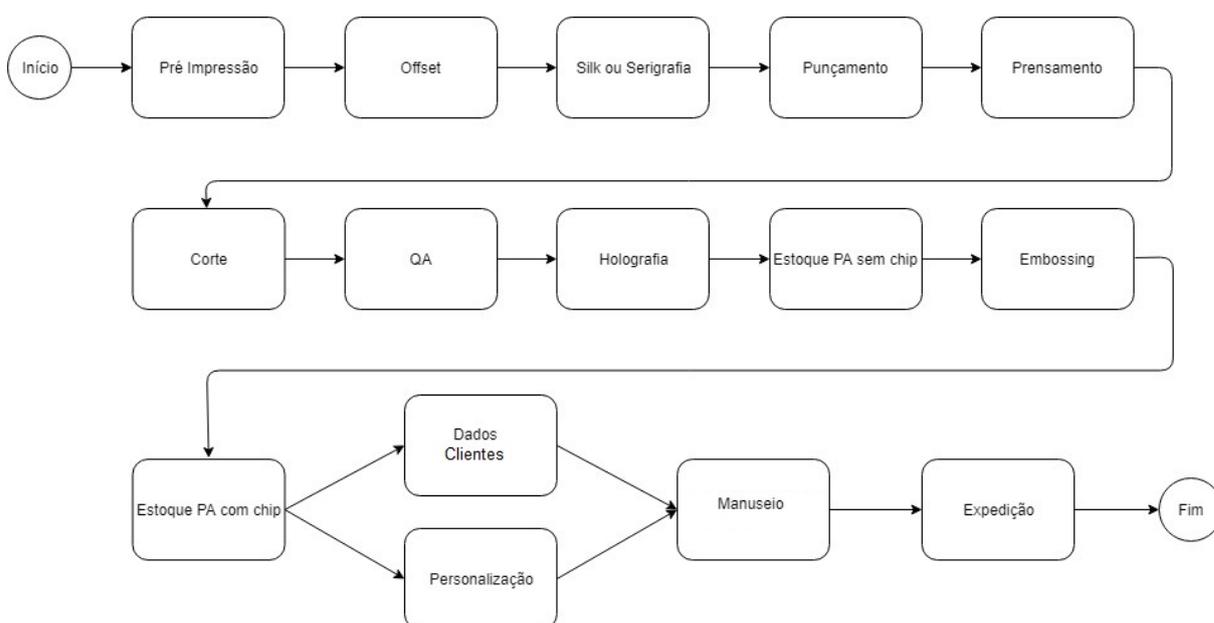
Estoque PA com chip: Armazenagem de produto acabado em cofres, após finalização da etapa de *Embossing*.

Dados dos clientes e personalização: Criação de comunicações impressas e outras correspondências que vão anexas ao cartão, tais como explicações de como desbloqueá-lo, como funciona o programa de pontos, contratação de serviços adicionais como seguros contra roubo, além de boas práticas de como usá-lo.

Manuseio: Montagem do kit final que chegará na casa do cliente. O kit contém o cartão, as comunicações e são colocados num envelope final contendo remetente e destinatário.

Expedição: Montagem das caixas com os kits que serão coletados na gráfica e distribuídos pelos operadores logísticos por todo o Brasil.

Figura 11 – Macroprocesso de Produção de Cartões



Fonte: Autor (2019b).

Análogo ao processo produtivo do cartão, temos o processo de expedição descrito na figura 12 onde cada etapa de distribuição é definida por:

Pedido de entrega do cartão: Pedido feito pelo cliente e aprovado pela instituição financeira para entrega do cartão de crédito ao usuário final.

Cliente de alto valor: Cliente de alta renda, relevante para o banco devido a rentabilidade, receita, os investimentos, margem de contribuição ou outro critério financeiro.

Necessidade de entrega rápida ou expressa: Quando um item precisa ser entregue rápido devido a reclamação do usuário, fraude ou com o intuito de reter o consumidor como cliente da instituição financeira.

Região de Risco: Geralmente uma área de difícil acesso, uma comunidade, favela, região onde há alto índice de roubo de carga ou risco de integridade física.

Outros: Outros motivos de envio do cartão dos quais não se enquadra um envio por operador logístico. Geralmente isso acontece quando o custo de envio e risco de fraude não justifica a receita que o cliente gerará para a empresa, ou também quando nenhum outro operador consegue fazer a entrega salvo os correios.

Operadores Logísticos: Operadores que realizam entrega do cartão. Geralmente são utilizados quando o cliente é alta renda ou a entrega precisa ser rápida ou a região de entrega é considerada de risco.

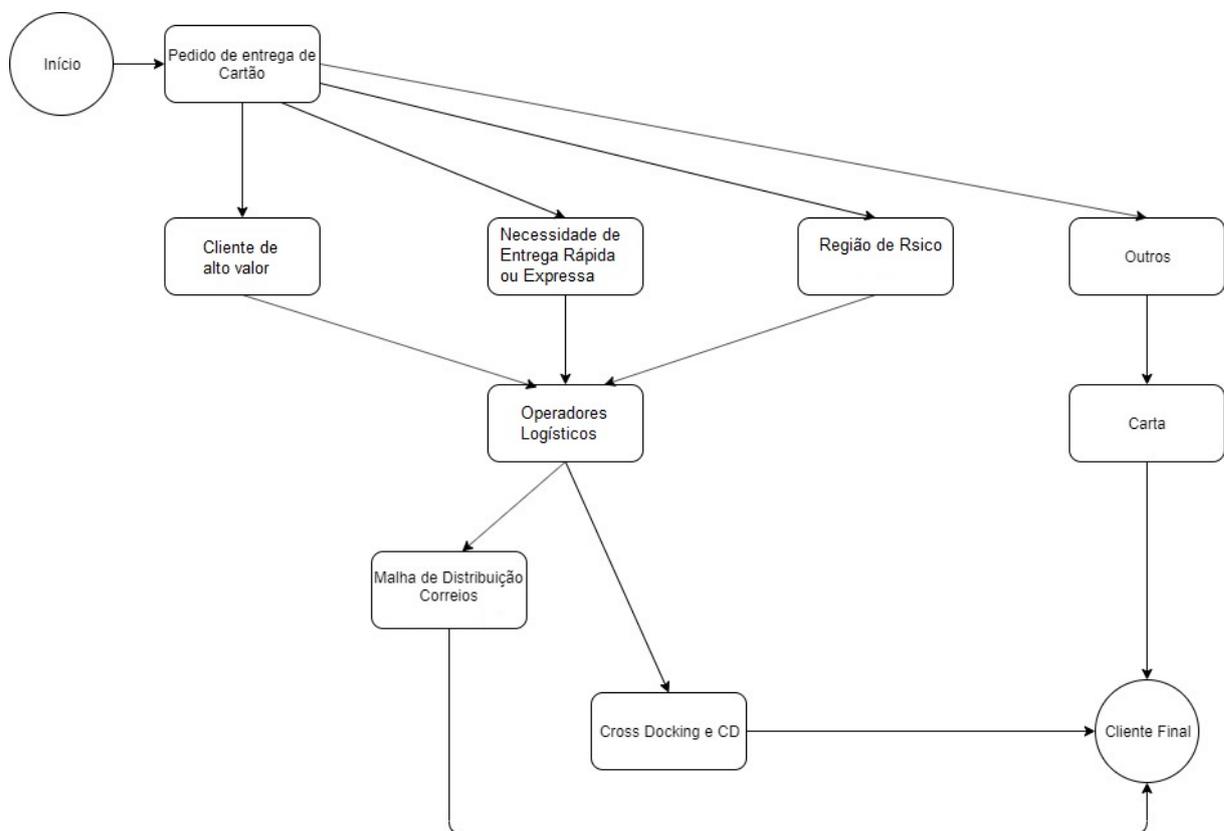
Carta: Esse é método mais simples de envio, pois a carta é postada com o cartão numa agência dos correios, contendo remetente e destinatário, porém sem possibilidade de verificar se o cartão realmente chegou ao seu destino. Só é possível verificar se houve a entrega quando o cliente usar a primeira vez o cartão.

Malha de distribuição dos correios: Infra estrutura dos correios para entregar o item, o que inclui centros de distribuição, transferência de mercadorias, postos avançados entre outros.

Cross Docking e CD: Infra estrutura dos operadores para entregar o item, o que inclui centros de distribuição, transferência de mercadorias, postos avançados entre outros.

Cliente Final: Usuário/Consumidor que receberá o cartão.

Figura 12 – Macroprocesso de Expedição de Cartões



Fonte: Autor (2019a).

MODELAGEM MATEMÁTICA: HORIZONTE TEMPORAL AGREGADO

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma estratégia de resolução do problema baseada na forma que uma empresa distribuidora de cartões lida com o problema. A abordagem é hierárquica, ou seja, resolve-se primeiro o problema de produção e depois o problema da distribuição. Porém, antes de apresentar com detalhe os dois modelos desenvolvidos nessa primeira abordagem do problema, descreve-se brevemente o problema e a estratégia de resolução deste. Esta primeira abordagem de solução tenta reproduzir os passos da busca de solução pela empresa. Observe que esta abordagem é mais conservadora, pois não lida com as mudanças das demandas e decisões que podem acontecer ao longo do tempo em um horizonte de planejamento. A abordagem que considera as questões temporais será apresentada no Capítulo 4.

O objetivo inicial é escolher os cartões que serão produzidos em cada gráfica (modelo da Seção 3.2), e, em seguida, distribuir esses itens manufaturados para os clientes com a escolha dos operadores que fazem as entregas (modelo da Seção 3.3). Na parte da distribuição, os clientes são agrupados em regiões de destino e escolhe-se os melhores operadores possíveis para realizar a entrega. Resumidamente, os modelos são dependentes, ou seja, necessariamente é preciso obter a solução de um modelo após o outro, em cadeia.

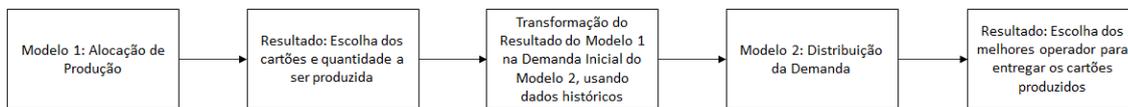
É importante ressaltar também que, pela abordagem desenvolvida, o resultado do modelo de produção não retorna planos de produção que consideram as demandas específicas de cada região, ou seja, os planos de produção olham as gráficas e uma demanda agregada considerando a capacidade produtiva e a disponibilidade de chips para aquela produção. Ou seja, a solução do primeiro modelo é a quantidade produzida de um determinado cartão em uma determinada gráfica, sem especificar para qual região será destinado. No entanto, a demanda a ser considerada

no segundo modelo é a demanda alocada para uma região usando um determinado serviço de entrega saindo de uma determinada gráfica específica. Assim, tendo o resultado do modelo de produção, ou seja, a produção de cada gráfica, fazemos uma transformação, utilizando dados históricos de uma distribuidora de cartões e suas frações de atendimento das regiões, para gerar as demandas de cartões que serão os parâmetros de entrada no modelo de distribuição.

De forma resumida, após a obtenção da solução pelo modelo de produção, transforma-se a solução desse primeiro modelo em dados de entrada para o segundo modelo, o de distribuição. Após a execução do segundo modelo, teremos a solução desejada.

A Figura 13 mostra uma representação da estratégia de solução proposta:

Figura 13 – Fluxo de Solução



Com essas considerações, apresentamos os modelos desenvolvidos para a produção e distribuição.

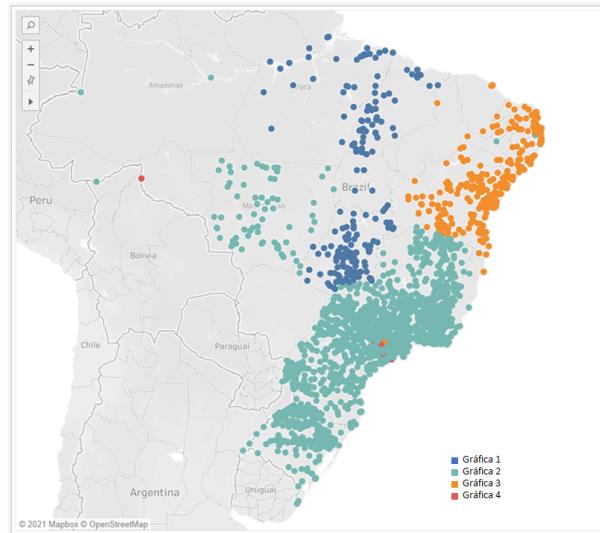
3.2 Modelo para alocação da Produção

Neste primeiro modelo consideramos que existem um conjunto de N_g de gráficas localizadas em diversas regiões do país, as quais podem produzir um conjunto de famílias de cartão de créditos N_c . Cada gráfica g pode produzir tipos distintos de cartões. Consideramos a existência de recursos limitados para a produção em cada gráfica bem como, a limitação de produção total condicionada a quantidade de chips disponíveis. Os recursos para produção são as máquinas utilizadas para produzir os cartões. A decisão de produção de um lote de um cartão c obriga a produção de um lote mínimo.

É relevante salientar que nessa primeira abordagem do problema, não é permitido ao otimizador alterar a alocação histórica de produção de um determinado cartão em uma determinada gráfica, ou seja, não existe a decisão de produzir em uma gráfica diferente do já havia sido planejado no histórico de 3 meses. Não há a possibilidade de deixar de produzir um cartão, por exemplo, na gráfica 1 para produzir na gráfica 4, se isso não tiver previamente acontecido no passado. Essa foi a primeira forma de garantir que o resultado do problema seja o mais próximo da realidade. Porém, é necessário lembrar que uma abordagem diferente do que olhar os dados históricos é proposta no Capítulo 4.

A Figura 14 mostra um exemplo de alocação histórica de produção. Os pontos simbolizam as regiões de cartões entregues e as cores a origem de produção daquele cartão. Por exemplo, os pontos azuis representam as regiões atendidas pela Gráfica 1.

Figura 14 – Alocação Demanda



Em resumo, nesse primeiro modelo, o problema consiste em produzir um cartão crédito e deixá-lo disponível para coleta por um operador logístico em umas das gráficas. É preciso adaptar a demanda de produção frente à restrições de capacidade das gráficas, restrições do mercado internacional quanto a disponibilidade de chips de cartão. Perante ao cenário, considera uma flexibilidade no atendimento da demanda agregada de cartão ao considerar um intervalo da demanda a ser atendida. O objetivo é ter o portfólio mais rentável possível no estoque para realizarmos a venda e distribuição. Por fim, há uma restrição mínima de volume de produção e preparação para produção (*setup*) para compensar financeiramente a manufatura do mesmo pela gráfica.

O modelo de otimização inteira para o problema da produção (MODELO 1) é definido a seguir:

Conjuntos

N_g : Conjunto das gráficas

N_c : Conjunto das diferentes famílias de cartão a serem produzidas

Parâmetros

D_{cg} : Demanda do cartão c na gráfica g no período

M_{cg} : Demanda mínima do cartão c na gráfica g no período

Cap_g : Capacidade de Produção da Gráfica g

F : Disponibilidade de chip no período

Q : Constante de chip por cartão

P_{cg} : Tempo de produção do cartão c pela gráfica g

R_c : Receita do cartão c

C_{cg} : Custo de produção do cartão c pela gráfica g

$C_{s_{cg}}$: Custo de preparação (setup) para produção do cartão c pela gráfica g

E_c : lote mínimo de produção do cartão c

Variáveis

y_{cg} : Quantidade produzida do cartão c na gráfica g

z_{cg} : Demanda final atendida do cartão c pela gráfica g no período

u_{cg} : 1 se o cartão c é produzido na gráfica g , 0 caso contrário

$$\text{máx} \left(\sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} R_c z_{cg} - \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} C_{cg} y_{cg} - \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} C_{s_{cg}} u_{cg} \right) \quad (3.1)$$

$$\sum_{c \in N_c} P_{cg} y_{cg} \leq \text{Cap}_g \quad g \in N_g \quad (3.2)$$

$$\sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} Q y_{cg} \leq F \quad (3.3)$$

$$y_{cg} \leq \text{BigM} * u_{cg} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.4)$$

$$M_{cg} \leq z_{cg} \leq D_{cg} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.5)$$

$$y_{cg} \geq z_{cg} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.6)$$

$$y_{cg} \geq u_{cg} * E_c \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.7)$$

$$y_{cg} \geq 0, \quad z_{cg} \geq 0 \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.8)$$

$$u_{cg} \in \{0, 1\} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (3.9)$$

A função objetivo (3.1) visa maximizar o lucro total, definido pela receita menos despesas, (3.2) garante que a capacidade de produção das gráficas é respeitada, assim como (3.3) garante que disponibilidade de chip no cenário global é respeitado. A (3.4) outorga que se um cartão é produzido então uma gráfica é utilizada com $\text{BigM} = \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} D_{cg}$. As restrições (3.5) garantem que a demanda a ser ajustada está necessariamente entre a demanda mínima e a demanda original do cartão, por fim (3.6) diz que, a quantidade de itens produzidos nas gráficas é maior ou igual a demanda ajustada dos cartões. Por último, as restrições (3.7) garantem que

a haverá uma produção mínima a ser considerada. As restrições (3.8) e (3.9) representam o domínio das variáveis de decisão.

3.3 Modelo para alocação da Distribuição

O problema consiste em entregar um cartão de crédito, já previamente produzido em uma gráfica, para o cliente final em uma determinada região geográfica do Brasil, usando diferentes tipos de serviços: entrega comum, prioritária e crítica. É preciso decidir qual a melhor escolha de fornecedores para essa operação logística, dado que é necessário se ter o melhor *SLA Service-level agreement*, que é o nível de serviço acordado com o fornecedor para a entrega dos cartões aos clientes. Também quer-se ter o menor percentual de insucesso na entrega, que é o índice que mede quantos cartões não conseguimos entregar logo na primeira visita ao endereço do cliente. Por fim, deve-se respeitar o orçamento financeiro da distribuição de cartões e, além disso, há uma restrição máxima de operadores que vão atuar nas regiões, e quando um fornecedor for escolhido, então o mesmo precisa ter um volume mínimo garantido.

A formulação matemática desse problema, é definida assim:

Conjuntos

- N_o : Conjunto dos operadores/fornecedores
- N_m : Conjunto das regiões geográficas
- N_s : Conjunto dos tipos de serviços prestados
- N_g : Conjunto das gráficas

Parâmetros

- D_{msg} : Demanda na região m do serviço s saindo da gráfica g
- C_{omsg} : Custo unitário do operador o na região m para o serviço s saindo da gráfica g
- I_{omsg} : % de insucesso para o operador o , na região m , para o serviço s saindo da gráfica g
- S_{omsg} : *SLA* para aquele operador o , naquela região m , para o serviço s saindo da gráfica g
- P : Peso que representa a importância entre *SLA* e Insucesso na entrega na função objetivo. Quanto mais próximo de 0 mais esse fator privilegia o *SLA*, e quanto mais próximo de 1 mais ele dá importância para o insucesso
- H : Insucesso máximo ponderado global
- Z : *SLA* mínimo ponderado global
- R : Gasto máximo orçamentário global
- V_m : Volume mínimo para escolher um fornecedor naquela região m
- F_{ms} : Máxima quantidade de operadores por região m e serviço s

Variáveis

x_{omsg} : quantidade da demanda D_{ms} atribuída ao operador o na região m para o serviço s saindo da gráfica g

b_{omsg} : 1 se o operador o é utilizado na região m para o serviço s saindo da gráfica g , 0 caso contrário

$$\min \left(\left(P \sum_{o \in N_o} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} I_{omsg} x_{omsg} \right) - \left((1-P) \sum_{o \in N_o} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} S_{omsg} x_{omsg} \right) \right) \quad (3.10)$$

$$\sum_{o \in N_o} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} I_{omsg} x_{omsg} \leq H * \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} D_{msg} \quad (3.11)$$

$$\sum_{o \in N_o} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} S_{omsg} x_{omsg} \geq Z * \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} D_{msg} \quad (3.12)$$

$$\sum_{o \in N_o} x_{omsg} = D_{msg} \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.13)$$

$$\sum_{o \in N_o} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{g \in N_g} C_{omsg} x_{omsg} \leq R \quad (3.14)$$

$$x_{omsg} \geq b_{omsg} D_{msg} \quad o \in N_o \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.15)$$

$$x_{omsg} \geq b_{omsg} V_m \sum_{s \in N_s} D_{msg} \quad o \in N_o \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.16)$$

$$\sum_{o \in N_o} b_{omsg} \leq F_{ms} \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.17)$$

$$x_{omsg} \geq 0 \quad o \in N_o \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.18)$$

$$b_{omsg} \in \{0, 1\} \quad x_{omsg} \in \mathbb{Z} \quad o \in N_o \quad m \in N_m \quad s \in N_s \quad g \in N_g \quad (3.19)$$

A função objetivo (3.10) visa minimizar o (% insucesso - SLA), (3.11) garante um % de insucesso máximo, assim como (3.12) garante um SLA mínimo, ao alocar os fornecedores. A (3.13) diz respeito ao balanceamento da demanda, (3.14) garante a restrição orçamentária, (3.15) diz que, se decidirmos usar um fornecedor, então vamos alocar uma determinada quantidade de volume ao mesmo. Por fim (3.16) garante um volume mínimo ao fornecedor se ele for escolhido e (3.17) restringe o número máximo de fornecedores por serviço e região. Por último, (3.18) e (3.19) dizem respeito ao domínio das variáveis.

3.4 Experimentos Computacionais

3.4.1 Dados Utilizados e Ambiente de Teste

Para testar o modelo proposto, utilizamos dados simulados da demanda de emissão de cartões de crédito da empresa analisada nessa dissertação. É preciso salientar que se tomou o cuidado para esses dados não serem necessariamente os originais, devido ao sigilo necessário à empresa. Porém, eles replicam de maneira fidedigna a informação da cadeia logística de produção e distribuição de cartões.

3.4.2 Dados para modelo produção

A Tabela 1 apresenta os dados utilizados no modelo de produção, Modelo 1.

Tabela 1 – Dados para o modelo de produção

Índices	Quantidade	Valores
Gráficas	3	grf_1, grf_2, grf_3
Tipos de Cartões	150	crt_1, crt_2, ... ,crt_150
Parâmetros	Quantidade	Valores
Capacidade produtiva	3	de 50.000 a 100.000 horas/ano
Disponibilidade de chip	-	10.000.000
Demanda anual inicial	450	de 30.000 até 105.000 cartões/gráfica
Demanda mínima	450	de 0 até 67.500 cartões/gráfica
Tempo unitário de produção	150	de 0.002 até 0.024 horas por cartões
Quantidade mínima produzida	150	de 5.000 até 10.000 unidades por cartão
Receita média	150	de R\$ 8,50 até R\$ 35,00 por cartão
Custo de produção médio	450	de R\$ 0,50 até R\$ 9,00 por cartão
Custo de setup	-	de R\$ 1,00 por cartão

3.4.2.1 Observações sobre a solução do modelo de produção

Após solucionado o Modelo 1, a demanda ajustada serve como entrada do modelo de distribuição. Para esclarecer como é determinada as entradas de dados do modelo de produção para o modelo de distribuição, ilustramos um plano de produção exemplificado pela Figura 15, ou seja, a saída do modelo é a quantidade do cartão c será produzida em cada gráfica g .

Como observado anteriormente, o formato da saída do Modelo 1 (Figura 15) deve ser ajustado para ser utilizado como dado de entrada no Modelo 2. Para isso, olha-se a demanda histórica real da entrega de cartão, com o desdobramento de região, serviço, cartão e gráfica. Essa demanda têm o histórico de 12 meses, considera 1.000 mesorregiões, 3 tipos de serviços ou modalidades de entrega para 150 cartões diferentes produzidos em 3 gráficas possíveis e é mostrada na Figura 16. Nesta figura, a primeira coluna é a mesorregião, ou seja, um agrupamento

de regiões menores no Brasil definido pelo IBGE. Utilizou-se esse agrupamento com o objetivo de reduzir a complexidade do problema e agregar a demanda. Já a segunda coluna na mesma Figura 16 é o tipo do serviço prestado, a terceira coluna é o modelo de cartão, na quarta qual gráfica o mesmo foi produzido e por fim a última coluna é a quantidade de cartão a ser distribuído.

Figura 15 – Exemplo de uma solução obtida pelo modelo de produção

	cartão	gráfica	volume
0	crt_1	grf_1	0.0
1	crt_1	grf_2	97224.0
2	crt_1	grf_3	0.0
3	crt_2	grf_1	0.0
4	crt_2	grf_2	46355.0
...
445	crt_149	grf_2	38327.0
446	crt_149	grf_3	0.0
447	crt_150	grf_1	5859.0
448	crt_150	grf_2	31680.0
449	crt_150	grf_3	29650.0

Figura 16 – demanda histórica para o modelo distribuição

	mesorregiao	servico	cartão	gráfica	volume
0	meso_1	serv_1	crt_1	grf_1	0.0
1	meso_1	serv_2	crt_1	grf_1	0.0
2	meso_1	serv_3	crt_1	grf_1	0.0
3	meso_2	serv_1	crt_1	grf_1	0.0
4	meso_2	serv_2	crt_1	grf_1	0.0
...
1349995	meso_999	serv_2	crt_150	grf_3	10.0
1349996	meso_999	serv_3	crt_150	grf_3	19.0
1349997	meso_1000	serv_1	crt_150	grf_3	19.0
1349998	meso_1000	serv_2	crt_150	grf_3	4.0
1349999	meso_1000	serv_3	crt_150	grf_3	15.0

A partir deste histórico agrupa-se a demanda histórica por gráfica e cartão. O objetivo é saber o quanto da demanda histórica de uma determinada região e serviço, representa do volume histórico de produção de um cartão fabricado em uma determinada gráfica.

A figura 17 apresenta mais informações sobre os valores e considerações. Na figura, a coluna vol_hist é a demanda histórica, a coluna vol_hist_agrup_crt_grf é a mesma demanda histórica agrupada por região e serviço. Por fim, a coluna result_mod_prod consiste no valor da

produção obtido por meio da otimização do problema de produção.

Figura 17 – demanda histórica cruzada

	mesorregião	serviço	cartão	gráfica	vol_hist	vol_hist_agrup CRT_grf	result_mod_prod
0	meso_1	serv_1	crt_1	grf_1	5	29827	0.0
1	meso_1	serv_2	crt_1	grf_1	1	29827	0.0
2	meso_1	serv_3	crt_1	grf_1	19	29827	0.0
3	meso_2	serv_1	crt_1	grf_1	4	29827	0.0
4	meso_2	serv_2	crt_1	grf_1	17	29827	0.0
...
1349995	meso_999	serv_2	crt_150	grf_3	10	30249	29650.0
1349996	meso_999	serv_3	crt_150	grf_3	19	30249	29650.0
1349997	meso_1000	serv_1	crt_150	grf_3	19	30249	29650.0
1349998	meso_1000	serv_2	crt_150	grf_3	4	30249	29650.0
1349999	meso_1000	serv_3	crt_150	grf_3	15	30249	29650.0

Na Figura 17, o valor 30.249 trata-se do volume do cartão crt_150 produzido na gráfica grf_3, independente da região e serviço de entrega. O que queremos saber, por exemplo, é o quanto o valor 19 que está na linha 1349996 representa dos 30.249 cartões. Dessa forma sabermos, historicamente, o quanto um cartão enviado para meso_999 usando o serv_3 representa da produção. Com essas informações, basta multiplicar essa representatividade pelo resultado do modelo de produção, que está na coluna result_mod_prod, e teremos a demanda nova no formato necessário para rodar o modelo de distribuição e mostrado na Figura 18. Para exemplificar melhor a conta feita temos a fórmula 3.20:

$$valor = \frac{vol_hist}{vol_hist_agrup_crt_grf} * result_mod_prod \quad (3.20)$$

Por exemplo, substituindo na equação os valores que encontramos na linha 1349996 da Figura 17, temos o seguinte:

$$valor = \frac{19}{30.249} * 29.650 = 18,623 \quad (3.21)$$

Ou seja, a demanda nova do cartão crt_150, na mesorregião meso_999 na gráfica grf_3 para o serviço serv_3 é 18,623

Se somarmos todos os resultados dessa equação acima para todos cartões (crt_1 a crt_150) na mesorregião meso_999 na gráfica grf_3 para o serviço serv_3 teremos como resultado a linha 8999 que é igual a 1.228, exposto na figura 18

Figura 18 – demanda final obtida

	mesorregião	serviço	gráfica	valor
0	meso_1	serv_1	grf_1	1197.0
1	meso_1	serv_1	grf_2	1006.0
2	meso_1	serv_1	grf_3	1294.0
3	meso_1	serv_2	grf_1	1231.0
4	meso_1	serv_2	grf_2	1140.0
...
8995	meso_999	serv_2	grf_2	1014.0
8996	meso_999	serv_2	grf_3	1213.0
8997	meso_999	serv_3	grf_1	1059.0
8998	meso_999	serv_3	grf_2	1049.0
8999	meso_999	serv_3	grf_3	1228.0

3.4.2.2 Dados para modelo distribuição

A Tabela 2 apresenta os dados utilizados para o problema de distribuição.

Tabela 2 – Dados utilizados no modelo de distribuição.

Índices	Quantidade	Valores
Gráficas	3	grf_1, grf_2, grf_3
Tipos de Cartões	150	crt_1, crt_2, ... ,crt_150
Operadores	10	opl_1, opl_2, ... ,opl_10
Regiões	1000	meso_1, meso_2, ... ,meso_10
Tipos de Serviço de entrega	3	serv_1, serv_2, serv_3
Parâmetros	Quantidade	Valores
Demanda de distribuição	9.000	saída do modelo de produção
% insucesso nas entregas	90.000	de 0.05% até 0.12%
% Nível de serviço (SLA)	90.000	de 0.80% até 0.88%
Máximo de fornecedores	3.000	de 1 até 10 por região e serviço
Alocação mínima	1.000	de 5% a 15% do volume da região
Custo de distribuição médio	90.000	de R\$ 2,50 até R\$ 15,00 cartão

3.4.2.3 Ambiente de teste

O computador usado para realizar as simulações possui um processador Intel Core i7, com 32 GB de RAM, disco rígido SSD de 1 TB com sistema operacional Windows 10 versão 21h1 e solver de otimização Gurobi versão 9.0.2. O modelo foi implementado utilizando API nativa em Python versão 3.7.6 nas IDEs Spyder e Jupyter notebook.

3.4.3 Análises dos Resultados

Dada a solução do problema de produção, gera-se as entradas para serem utilizadas no modelo de distribuição, conforme descrito na Seção 3.4.2.1.

Para analisar as soluções sob aspecto da aplicação real, foram criados cenários de sensibilidade da função objetivo, principalmente no contexto do problema da distribuição. Estas análises serão discutidas com profundidade a seguir.

Inicialmente, fez-se a comparação entre *SLA*, o % Insucesso e Custo total variando o parâmetro P da função objetivo do problema de distribuição (mostrado na Figura 19). Analisando os 21 cenários mostrados, quanto o parâmetro $P = 0.0$ então significa que o modelo prioriza escolher os fornecedores que trarão o máximo *SLA*, com custo total de distribuição de R\$ 87,8 milhões. Em contrapartida, quanto $P = 0.75$ então o modelo prioriza escolher fornecedores que minimizam o percentual de insucesso na entrega, com custo total de R\$ 87,2 milhões. A partir dessa simulação já existe indicação do direcionamento tático, pois olhando do ponto de vista orçamentário, a diferença entre o ótimo dessas duas possíveis diretrizes da empresa é de R\$ 87,8 - R\$ 87,2 = R\$ 0,6 milhões no ano.

Por fim, tomando como critérios de qualidade e custos internos da companhia, o cenário com $P = 0.75$ (Figura 19) foi o escolhido como o melhor, pois mantêm-se um nível aceitável de *SLA* e também valores controlados de insucesso na entrega, além de economizar cerca de R\$ 1,4 milhões por semestre frente ao cenário mais caro.

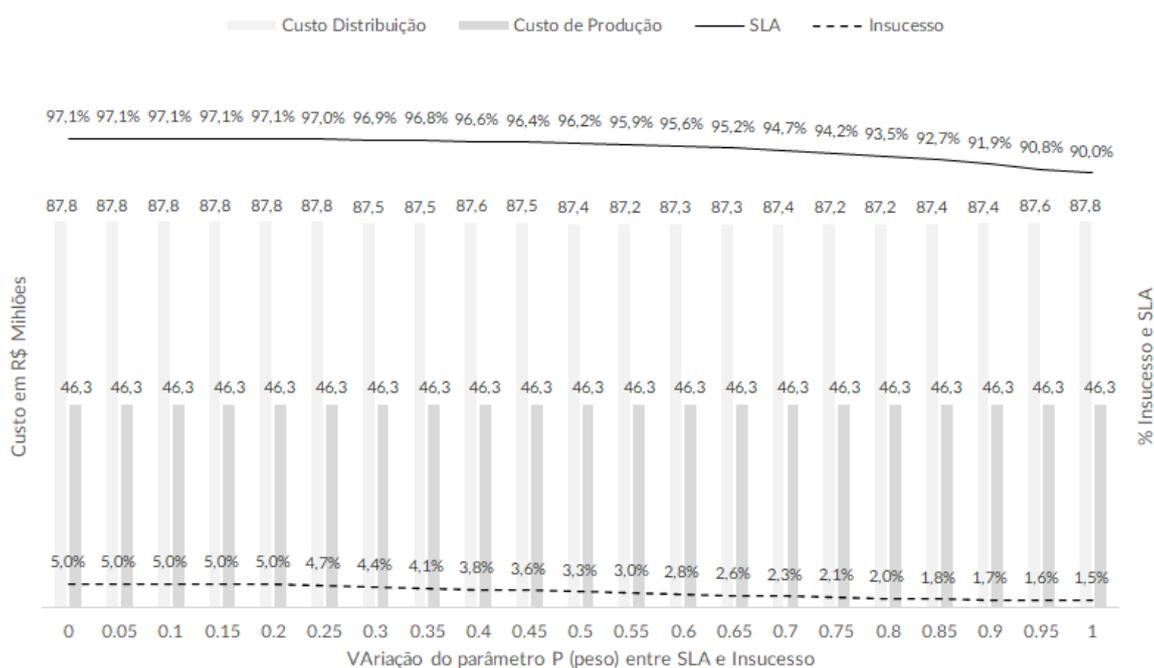


Figura 19 – Cenários de *SLA*, % Insucesso e Custo Total variando P .

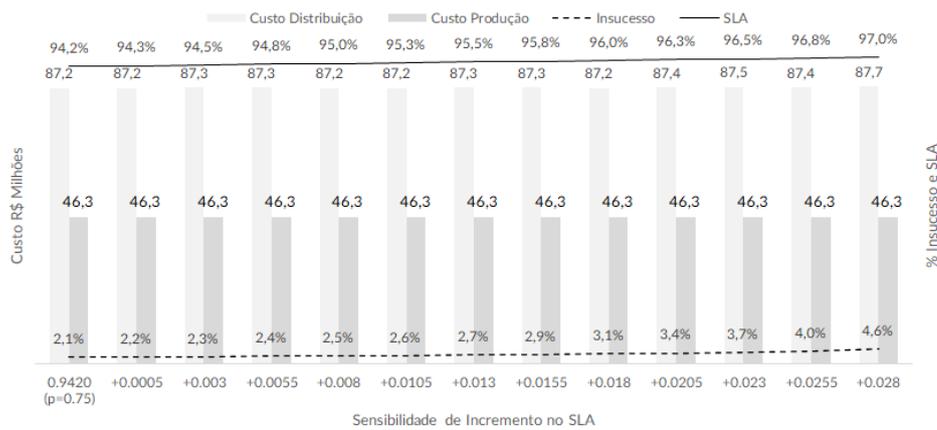


Figura 20 – Cenários de SLA, % Insucesso e Custo Total, fixando $P = 0.75$

Uma vez definido o melhor parâmetro P acima, decidiu-se simular cenários (mostrado na Figura 20) acrescentando 0.25 ponto percentual tanto no SLA quanto no % insucesso, justamente para ver o quanto o custo orçamentário é sensível a esses incrementos. Por fim, conseguimos verificar um cenário bastante interessante onde, basicamente pioramos levemente o % de insucesso de 2,1% para 2,6%, porém aumentamos o nível de serviço para 95,3% sem custo adicional, comparado ao cenário ótimo inicial. Por fim, esse cenário é também bastante razoável visto que seu custo incremental é nulo, porém nos cenários subsequentes percebemos que ao aumentar o SLA para patamares iguais ou acima de 95,3% pagamos um alto investimento, acima de R\$ 0,5 milhão adicional, bem como abrimos mão do nível de insucesso, que piora a patamares pouco interessantes.

Os *insights* obtidos pelas análises de cenários não teriam sido possíveis sem o uso dessas técnicas avançadas de pesquisa operacional, corroborando ainda mais a importância desses modelos para decisões táticas nas empresas.

MODELAGEM MATEMÁTICA: HORIZONTE TEMPORAL DETALHADO

4.1 Modelo para alocação da Produção e Distribuição com Janelas de Tempo

O modelo apresentado a seguir é baseado no modelo apresentado em [Darvish e Coelho \(2018\)](#) e, ao contrário do problema descrito no Capítulo 3, considera o horizonte de planejamento dividido em períodos possibilitando assim, a formação de estoque para atender demandas futuras. Neste problema, a demanda que deve ser atendida no período t , no nosso caso com flexibilidade, pois a demanda de cada família de cartão c na região m pode estar entre os valores mínimos (Q_{cmt}) e máximos (D_{cmt}), deve ser atendida até o período $t + r_c$, onde r_c é a janela de atendimento do cartão c . Assim, considerando a variável $\alpha_{cgmostt'}$ como sendo quantidade do cartão do tipo c encaminhado da gráfica g para a região m através do serviço s do operador o durante o período t para atendimento da demanda associada ao período t' o operador o é selecionado no período t para atender a região m , com $t \geq t'$. A Figura 21 representa os intervalos possíveis de variáveis $\alpha_{cgmostt'}$ para garantir esse atendimento da demanda considerando $r = 2$, e $t' = 1$. Neste caso, a demanda pode ser atendida até $t = 3$ com possíveis valores das variáveis $\alpha_{cgmos11}$, $\alpha_{cgmos21}$ e $\alpha_{cgmos31}$.

A formulação matemática desse problema, é definida assim:

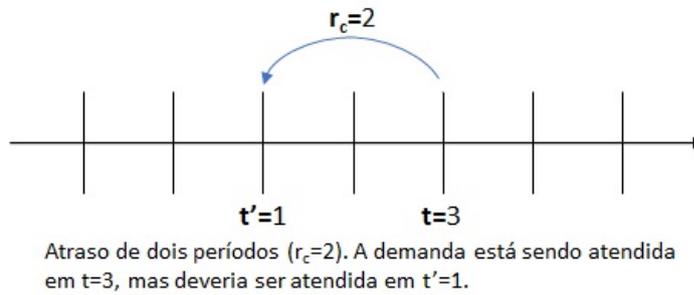
Conjuntos

N_c : Conjunto das diferentes famílias de cartão c a serem produzidas

N_g : Conjunto das gráficas g

N_{gm} : Conjunto das gráficas g que atendem a região m

N_o : Conjunto dos operadores logísticos o

Figura 21 – Representação das variáveis $\alpha_{cgmost'}$ 

N_s : Conjunto dos tipos de serviços s prestados pelos operadores (comum, prioritária, crítica)

T : Conjunto dos períodos t do horizonte de planejamento, em dias

Parâmetros

D_{cmt} : Demanda máxima do cartão c para a região m no período t

Q_{cmt} : Demanda mínima do cartão c para a região m no período t

r_c : janela de tempo de entrega para o cartão c , em dias

E_{cg} : lote mínimo de produção para o cartão c na gráfica g

F_m : quantidade mínima de fornecedores na região m

VO_m : Volume mínimo de entrega por fornecedor na região m

P_{cg} : custo de produção do cartão c na gráfica g

H_{cg} : custo de estoque do cartão c na gráfica g

W_{gms_o} : Custo de distribuição e entrega do cartão pelo do operador o na região m para o serviço s saindo da gráfica g no período t

Cap_g : capacidade de produção na gráfica g em volume de cartões por dia

R_{cs} : Receita do cartão c utilizando o serviço s

K : Nível de serviço global acordado

Z : Deflator da demanda para gerar a demanda mínima

Big_M : Valor grande

Variáveis

x_{cgt} : produção do cartão c na gráfica g no período t

I_{cg}^t : estoque do cartão c na gráfica g no período t

y_{cgt} : (=1) se um setup é realizado para o cartão c na gráfica g no período t

λ_{omt} : (=1) se o operador o é escolhido para atender a região m durante o período t

v_{cmst} : Demanda ajustada do cartão c para a região m do serviço s no período t

$\alpha_{cgmos}^{tt'}$: quantidade do cartão do tipo c encaminhado da gráfica g para a região m através do serviço s do operador o durante o período t para atendimento da demanda associada ao período t' o operador o é selecionado no período t para atender a região m

4.1.1 Função Objetivo

A função 4.1 visa a maximização da diferença entre a receita, perda de receita por postergação da entrega e os custos de produção, armazenagem e distribuição.

$$\begin{aligned}
 \text{máx} \quad & \left(\sum_{c \in N_c} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{t \in T} R_{cs} v_{cmst} - \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{o \in N_o} \sum_{t \in T} \sum_{t' < t} \alpha_{cgmost'} (t - t') R_{cs} Z \right. \\
 & - \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} \sum_{t \in T} P_{cg} x_{cgt} \\
 & - \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} \sum_{t \in T} H_{cg} I_{gt} \\
 & \left. - \sum_{g \in N_g} \sum_{t \in T} \sum_{m \in N_m} \sum_{s \in N_s} \sum_{o \in N_o} W_{gtms} \left(\sum_{c \in N_c} \alpha_{cgmost'} \right) \right) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

4.1.2 Restrições

As restrições 4.2 garantem que capacidade de produção nas fábricas, para cada período t , que pode ser um dia, do horizonte T não seja ultrapassada. Já as restrições 4.3 relacionam as variáveis de produção e preparação, ou seja, se o cartão c for produzido na gráfica g então $y_{cg} = 1$, caso contrário $y_{cg} = 0$. E as restrições 4.4 impõem um lote mínimo de produção, caso ocorra a produção em uma gráfica.

$$\sum_{c \in N_c} x_{cgt} \leq Cap_g \quad g \in N_g, t \in T \quad (4.2)$$

$$x_{cgt} \leq BigM * y_{cg} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (4.3)$$

$$x_{cgt} \geq E_{cg} * y_{cg} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (4.4)$$

As restrições (4.5) e (4.6) garantem o balanceamento de estoque. As restrições (4.5) garantem o balanceamento do estoque para o período t diferente de 1, assegurando que o estoque de cada cartão c , na gráfica g no final do período t é igual a quantidade em estoque no período $t - 1$ mais a produção na gráfica c menos as quantidades distribuídas do período t para atender

demandas do período t' . As restrições (4.6) garantem o balanceamento do estoque para o período t igual a 1.

$$I_{cg}^t = I_{cg}^{t-1} + x_{cgt} - \sum_{m \in N_m} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \sum_{t'=t-r_c}^t \alpha_{cgmos}^{tt'} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad t \in T/\{1\} \quad (4.5)$$

$$I_{cg}^1 = x_{cg1} - \sum_{m \in N_m} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \alpha_{cgmos}^{11} \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad (4.6)$$

As restrições (4.7) garantem uma quantidade mínima de fornecedores por região. Caso o operador o seja escolhido para atuar na região m no período t , uma quantidade mínima deve ser entregue, o que é garantido pelas restrições (4.8).

$$\sum_{o \in N_o} \lambda_{omt} \geq F_m \quad m \in N_m \quad t \in T \quad (4.7)$$

$$\sum_{t'=\{1,..,T\}} \sum_{c \in N_c} \sum_{g \in N_g} \sum_{s \in N_s} \alpha_{cgmos}^{tt'} \geq VO_m \lambda_{omt} \quad m \in N_m \quad o \in N_o \quad t \in T \quad (4.8)$$

As restrições (4.9) referem-se a flexibilidade de atendimento da demanda, se necessário. A demanda atendida, de cada cartão, estará necessariamente entre o mínimo e o máximo da demanda inicial estimada.

$$Q_{cmt} \leq \sum_{s \in N_s} v_{cmst} \leq D_{cmt} \quad c \in N_c \quad m \in N_m \quad t \in T \quad (4.9)$$

As restrições (4.10) garantem que nenhuma demanda será atendida de forma adiantada.

$$\sum_{g \in N_g} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \sum_{t=1}^u \sum_{t'=1}^t \alpha_{cgmos}^{tt'} \leq \sum_{s \in N_s} \sum_{t=1}^u v_{cmst} \quad c \in N_c \quad m \in N_m \quad u \in T \quad (4.10)$$

As restrições (4.11) garantem que não haverá distribuição em janelas de tempo que não existem, ou seja, apenas atende no período ou atrasado, mas dentro da janela de tempo de cada cartão.

$$\alpha_{cgmos}^{tt'} = 0, \quad c \in N_c \quad g \in N_g \quad m \in N_m \quad o \in N_o \quad s \in N_s \quad t \in T, \quad t' \in \{0, \dots, t-r_c-1\} \cup \{t+1, \dots, T\} \quad (4.11)$$

As restrições 4.12 definem que a entregas das demandas podem ser atrasadas em até r_c períodos para cada cartão c .

$$\sum_{g \in N_g} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \sum_{t=1}^{\min\{T, u+r_c\}} \sum_{t'=1}^u \alpha_{cgmos}^{tt'} \geq \sum_{s \in N_s} \sum_{t=1}^u v_{cmst} \quad c \in N_c \quad m \in N_m \quad u \in T \quad (4.12)$$

As restrições (4.13) garantem que toda demanda seja atendida.

$$\sum_{g \in N_g} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \sum_{t \in T} \alpha_{cgmos}^{tt'} = \sum_{s \in N_s} v_{cmst'} \quad c \in N_c \quad m \in N_m \quad t' \in T \quad (4.13)$$

O nível de serviço K é a análise da eficiência de distribuição de um operador de entrega de cartão. Por meio de indicadores de desempenho, é possível definir parâmetros de avaliação, acompanhar os resultados e identificar pontos de melhoria no serviço prestado. No caso dessa restrição queremos garantir que apenas um percentual pequeno de clientes não seja atendido no prazo pré-estabelecido para o cartão c na região m no período t' .

As restrições (4.14) garantem que a demanda do cartão c na região m no período t' seja atendida com o nível de serviço K .

$$\sum_{g \in N_g} \sum_{o \in N_o} \sum_{s \in N_s} \sum_{t \in T} \alpha_{cgmos}^{tt'} \geq K \sum_{s \in N_s} v_{cmst'} \quad c \in N_c \quad m \in N_m \quad t' \in T \quad (4.14)$$

As restrições 4.15 garantem que as variáveis de decisão contínuas serão maiores que zero.

$$x_{cgt} \geq 0, \quad I_{cg} \geq 0, \quad y_{cgt} \geq 0, \quad \alpha_{cgmost'} \geq 0 \quad (4.15)$$

As restrições 4.16 é de domínio das variáveis binárias.

$$\lambda_{omt} \in \{0, 1\}, y_{cgt} \in \{0, 1\} \quad (4.16)$$

4.2 Experimentos Computacionais

4.2.1 Dados utilizados

Ao contrário do modelo apresentado no Capítulo 3, em que utilizamos dados completamente aleatórios para a entrada dele, nesse novo modelo utilizamos um gerador de dados simulados da demanda de emissão de cartões de crédito baseados em parâmetros reais. É preciso salientar que se tomou o cuidado para esses dados não serem necessariamente os originais,

devido ao sigilo necessário. Porém, eles replicam, de maneira próxima à realidade, a informação da cadeia logística de produção e distribuição de cartões.

4.2.2 Ambiente para teste

Assim como no capítulo anterior, o computador usado para realizar as simulações possui um processador Intel Core i7, com 32 GB de RAM, disco rígido SSD de 1 TB com sistema operacional Windows 10 versão 21h1 e solver de otimização Gurobi versão 9.0.2. O modelo foi implementado utilizando API nativa em Python versão 3.7.6 nas IDEs Spyder e Jupyter notebook

4.2.3 Gerador de dados simulados

O gerador de dados foi construído em Python versão 3.9. O gerador utiliza parâmetros reais para quantidade existentes de gráficas, regiões de entrega, quantidade de cartões a serem produzidos e entregues, quantidade de operadores e tipos de serviços, receitas, custos de produção, de distribuição, entre outros.

A demanda foi gerada da seguinte forma: levantou-se os dados de 3 meses de distribuição diária de cartões de crédito agrupado por tipo de cartão e região. Logo em seguida, tirou-se a média μ e desvio padrão σ para cada região e cartão com o objetivo de termos parâmetros da distribuição da demanda. Por fim, inferiu-se que a distribuição da demanda para cada combinação segue uma curva normal dada por Demanda $D \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. O Algoritmo 1 melhor descreve a geração da demanda.

Tabela 3 – Parâmetros para geração da demanda dos cartões.

cartão	mesorregião	μ	σ
CARTAO1	REGIAO117	60.49	47.88
CARTAO1	REGIAO33	85.01	99.56
CARTAO7	REGIAO85	1.58	2.58
CARTAO7	REGIAO23	1.5	2.75
...
CARTAO15	REGIAO85	0.46	1.25
CARTAO15	REGIAO23	0	1
...
CARTAO26	REGIAO104	0	3
CARTAO26	REGIAO94	0.88	2

Além da demanda original, um outro dado necessário é a demanda mínima de um determinado item/cartão. Isso acontece porque o cartão, assim como outros itens de tecnologia, depende de um chip para funcionar de forma segura (veja o modelo apresentado no Capítulo 3). O problema é que no cenário atual, ou seja, no ano de 2022, o negócio de cartões é impactado pela crise mundial de semicondutores. Essa crise afeta diretamente a disponibilidade desse item

Algoritmo 1 – gerador de demanda

C_{max} : Número máximo de cartões
 M_{max} : Número máximo de regiões
 T : Número máximo de períodos
para $c = 1, 2, \dots, C_{max}$ **faça**
 para $m = 1, 2, \dots, M_{max}$ **faça**
 para $t = 1, 2, \dots, T$ **faça**
 $D_{cmt} = \mathcal{N}(\mu_{cm}, \sigma_{cm}^2)$ para cada t
 se $D_{cmt} < 0$ **então**
 $D_{cmt} = 0$
 fim se
 fim para
 fim para
fim para

necessário a produção do cartão. Dessa forma a demanda mínima representa o quanto podemos variar de um item, assumindo que não há como cumprir toda a demanda, por falta de alguma das matérias-primas, dentre eles, os chips. O Algoritmo 2 descreve o procedimento para a geração da demanda mínima do cartão.

Algoritmo 2 – gerador de demanda mínima

F : deflator da demanda, onde $F \in [0, 1]$
para $c = 1, 2, \dots, C_{max}$ **faça**
 para $m = 1, 2, \dots, M_{max}$ **faça**
 para $t = 1, 2, \dots, T$ **faça**
 $Q_{cmt} = D_{cmt} * F$
 fim para
 fim para
fim para

A receita dos cartões foi gerada seguindo um procedimento análogo à demanda de cartões. Porém, a receita é em função do cartão c e o tipo de serviço s , sendo que existe uma premissa muito importante na receita: quanto mais rápido entregamos um determinado cartão, então maior vai ser a receita daquele cartão devido o cliente receber o mesmo antes, podendo já utilizá-lo e consumir seu limite.

O Algoritmo 3 apresenta o procedimento utilizado para a geração das receitas por cartão e serviço.

Para avaliar a eficácia do modelo de otimização, foi proposto um conjunto de 32 instâncias que abrange uma ampla gama de cenários. Como os dados reais não podem ser divulgados devido à confidencialidade, gerou-se aleatoriamente as instâncias de teste combinando as configurações dos parâmetros.

- gráficas: $g \in [4]$, trata-se do número de gráficas g que existem para produção das famílias

Algoritmo 3 – gerador de receita

C_{max} : Número máximo de cartões
 S_{max} : Número máximo de serviços
para $c = 1, 2, \dots, C_{max}$ **faça**
 para $m = 1, 2, \dots, S_{max}$ **faça**
 $R_{c1} = \mathcal{U}(38.5, 55)$
 se $s = 2$ **então**
 $R_{c2} = R_{c1} \times (1.07)$
 senão
 se $s = 3$ **então**
 $R_{c3} = R_{c1} \times (1.18)$
 fim se
 fim se
fim para
fim para

de cartão c . Cada gráfica é regionalizada, ou seja, nem toda gráfica atende todas as regiões, assim como nem todas as gráficas produzem todos os tipos de cartão.

- regiões: $m \in [10, 15]$ trata-se da quantidade m de regiões diferentes de entrega do cartão c a partir da gráfica g . As regiões são agrupamentos das demandas originais. Basicamente agrupou-se o pedido dos clientes na demanda por cidade, e a demanda por cidade agrupou-se pela mesorregião dela usando os parâmetros do IBGE, segundo o catálogo de dados.

A Tabela 4 apresenta os dados retirados do site do IBGE, partindo da DTB (distribuição territorial do Brasil de 2021) e disponível no link [divisao-territorial-brasileira-2021](https://divisao-territorial-ibge-2021) para agrupar as demandas das cidades dos clientes em mesorregiões maiores. O motivo para esse agrupamento é reduzir a dimensionalidade do modelo de otimização com o intuito de ganhar performance na otimização, sem perder qualidade dos dados e resultados obtidos.

Tabela 4 – Dados utilizados no modelo de distribuição.

Nome_Município	Nome_UF	Nome_Mesorregião
ÁGUAS DE LINDÓIA	SÃO PAULO	CAMPINAS
AMERICANA	SÃO PAULO	CAMPINAS
AMPARO	SÃO PAULO	CAMPINAS
ARTUR NOGUEIRA	SÃO PAULO	CAMPINAS
CACONDE	SÃO PAULO	CAMPINAS
CAMPINAS	SÃO PAULO	CAMPINAS
...
SERRA NEGRA	SÃO PAULO	CAMPINAS
SOCORRO	SÃO PAULO	CAMPINAS
VALINHOS	SÃO PAULO	CAMPINAS
VINHEDO	SÃO PAULO	CAMPINAS

No exemplo apresentado pela Tabela 4 agrupa-se, para cada cartão, todas as demandas das cidades da mesorregião de Campinas em uma única região, ou seja, a demanda de cada cartão para as 49 cidades que compõem essa mesorregião foi consolidada em uma única região. Adotando esse mesmo procedimento para todo o Brasil, consolidamos as demandas de 5570 municípios em 137 mesorregiões.

- cartões: $c \in [3, 10, 15]$ trata-se da quantidade de famílias diferentes de cartões existentes para produção e distribuição. As famílias já estão agrupadas em grupo de cartões com características parecidas. Na prática existem mais de 100 tipos de cartões diferentes, porém essa foi uma forma de reduzir a dimensionalidade do problema.
- operadores: $o \in [3, 5]$ trata-se do número de operadores o existentes para coletar o cartão c na gráfica g para entregar na região m .
- tipo de serviços: $s \in [3]$ trata-se do número de serviços s diferentes para entrega do cartão c . Tem-se cenários com os três tipos de serviço.
- períodos: $t \in [3, 10, 20]$ trata-se do número de períodos do horizonte de planejamento; Em um primeiro momento pensou-se em considerar um período como sendo um mês, porém chegou-se à conclusão de usar o período em dias, justamente para ter um planejamento detalhado.
- atraso da janela de entrega: $r \in \{0, 1, 3, 6\}$ trata-se do atraso máximo na entrega de um cartão. O valor igual a 0 impõe que todos os cartões devem ser entregues na sua região sem nenhum atraso, exatamente no período de atendimento. Quando $r=1$ então o atraso máximo permitido é de 1 dia da sua janela. Por último quando $r=3$ ou 6, permite-se o atraso de 1 a 3 ou 4 a 6 dias conforme visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados utilizados no modelo de distribuição.

cartoes	r=0	r=1	r=3	r=6
CARTAO1	0	1	3	6
CARTAO2	0	0	2	5
CARTAO3	0	1	3	6
CARTAO4	0	1	3	6
CARTAO5	0	1	3	6
...
CARTAO11	0	1	3	6
CARTAO12	0	1	3	6
CARTAO13	0	1	3	6
CARTAO14	0	0	2	5
CARTAO15	0	0	1	4

No exemplo da Tabela 5 podemos citar o cartão CARTAO1. Quando $r=0$ não se permite atraso para esse cartão, logo a demanda esse cartão só pode ser entregue dentro janela de entrega, sem atrasos. Quando $r=1$ ou 3 ou 6 permite-se uma flexibilização no prazo de entrega de 1 a 6 dias.

4.3 Resultados dos Experimentos

Nessa seção apresentamos alguns dos resultados obtidos utilizando os dados gerados. A Figura 22 mostra um desenho da cadeia de suprimentos que estamos tentando integrar através desse problema.

Figura 22 – Representação da cadeia da abordagem do problema por janelas de tempo



Esse desenho representa de forma macro o problema em questão, salvo que, para esse problema vamos omitir, sem perda relevante de informação, como é feita a transferência dos produtos da fábrica para a região de destino. Portanto, focaremos mais precisamente na alocação de produção e na entrega final. Para isso, antes de apresentar os resultados de diversas simulações, resolvermos explicitar os resultados para um exemplo menor com a realização de diversas simulações com a variação dos dados.

4.3.1 Resultados para $r=0$

O exemplo menor que será abordado aqui têm 3 cartões, 3 fábricas, 3 regiões de entrega, 3 operadores que podem ser utilizados, 3 tipos de serviços e vamos analisar 3 janelas de tempo e verificar como o modelo se comporta. o Lote mínimo de produção para esse modelo simulado será de 100 unidades, ou seja, em qualquer momento que produzirmos um cartão, o lote precisa ter no mínimo esse tamanho. Para essa primeira simulação o nível de serviço a ser atingido é no mínimo 95%, porém como colocamos $r=0$, então a primeira simulação desse modelo terá que entregar tudo na sua devida janela de tempo, sem permissão para atrasos na mesma, o que significa que o nível de serviço ficará em 100%. O Tempo limite para o otimizador fica no processamento da solução foi definido como 300 segundos, prioritariamente.

A Tabela 6 apresenta os dados utilizados, ou seja, todas as gráficas, os cartões e seus respectivos custos de produção. É possível notar que a entrada inicial do modelo considera que devemos simular 3 fábricas. Porém, assim como na distribuição real os cartões, os 3 cartões simulados não podem ser produzidos na GRAFICA2, o motivo é uma restrição sistêmica existente na empresa em questão, por isso os custos de produção não são mostrados na Tabela 6, logo todas as restrições que envolvem a produção não serão escritas com essa fábrica, pois a malha com ela e esses cartões não existe. É necessário fazer esse filtro antes, pois queremos evitar soluções que não fazem sentido ao comparar com dados reais, ao mesmo tempo queremos também reduzir a complexidade computacional do modelo, evitando colocar na otimização, custos, restrições e combinações que não existem. Na Tabela 7 apresenta-se a quantidade de cartões da simulação em questão.

Tabela 6 – Regiões de destino dos cartões utilizados nessa simulação

gráficas	cartões	custo de produção
GRAFICA1	CARTAO1	R\$ 6,50
GRAFICA1	CARTAO2	R\$ 4,10
GRAFICA1	CARTAO3	R\$ 9,30
GRAFICA2	CARTAO1	R\$ -
GRAFICA2	CARTAO2	R\$ -
GRAFICA2	CARTAO3	R\$ -
GRAFICA3	CARTAO1	R\$ 5,20
GRAFICA3	CARTAO2	R\$ 5,10
GRAFICA3	CARTAO3	R\$ 11,10

Convém salientar que como r foi informado como sendo igual a 0, então não é permitido atraso nas janelas de tempo dessa simulação, como podemos ver na Tabela 7.

Tabela 7 – Cartões e atraso máximo nas janelas de tempo utilizados na simulação.

cartão	$r=0$
CARTAO1	0
CARTAO2	0
CARTAO3	0

A Tabela 8 mostra as 3 opções de produção das gráficas em questão, assim como custo de armazenagem na fábrica. A Tabela 8 apresenta os operadores possíveis da simulação em questão.

Tabela 8 – Gráficas utilizadas na simulação.

gráficas	capacidade de produção por janela	custo de estoque
GRAFICA1	80000	R\$ 0,05
GRAFICA2	7000	R\$ 0,04
GRAFICA3	8000	R\$ 0,05

A Tabela 9 apresenta os operadores existentes, quem podemos utilizar para distribuir os cartões.

Tabela 9 – Operadores utilizados na simulação.

operadores
OPERADOR1
OPERADOR2
OPERADOR3

A Tabela 10 apresenta os períodos possíveis, onde devemos produzir e distribuir os volumes de cartões.

Tabela 10 – Horizonte de tempo dessa simulação

janela de entregas possíveis (dias)
1
2
3

Na Tabela 11 mostra-se todos os custos existentes de distribuição dado origem, destino, operador e tipo de serviço. É importante salientar que mesmo havendo diversas combinações de operadores, origens e destinos, no problema real existem trechos que os operadores não fazem, ou devido à abrangência da malha de distribuição deles ou porque a empresa não negociou contrato para o operador fazer aquela região em específico. Logo, deve-se inferir que se não há trecho nessa Tabela de custo de distribuição, então não há como aquele operador fazer aquela entrega, usando aquele serviço para aquela determinada região para aquela origem.

A Tabela 12 mostra a receita do cartão em função do tipo de serviço usado. O motivo da receita variar em função do serviço parte do fato que quando um cliente recebe um cartão rapidamente, então ele já o desbloqueia para o uso e o utiliza para compra de serviços e crédito, potencializando o faturamento e gastos no cartão. É preciso observar que quando mais rápido entregamos, mais caro é o serviço, porém ao depender do tipo de cartão e perfil de cliente, nota-se que há casos que a entrega se justifica. Apesar desse exemplo ser pequeno por possuir

apenas 3 cartões, que na prática poderão ser produzidos em apenas 2 gráficas, então um dos pontos que queremos observar é qual tipo de frete utilizado na distribuição.

Tabela 11 – Custos de distribuição usados na simulação

gráficas	regiões	operadores	tipo_serviços	valor
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	1-COMUM	11.9
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO	14.3
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL	18.9
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR2	1-COMUM	21.1
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR2	2-RAPIDO	25.9
GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR2	3-EMERGENCIAL	28.7
GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM	21
GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	2-RAPIDO	32.3
GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	3-EMERGENCIAL	60.8
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM	18.6
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	2-RAPIDO	20.8
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL	26.8
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM	9.8
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	2-RAPIDO	24.8
GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	3-EMERGENCIAL	31.5
GRAFICA2	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM	25.4
GRAFICA2	REGIAO3	OPERADOR1	2-RAPIDO	30.2
GRAFICA2	REGIAO3	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL	39.3
GRAFICA3	REGIAO1	-	-	-
GRAFICA3	REGIAO2	-	-	-
GRAFICA3	REGIAO3	-	-	-

Tabela 12 – Receita em função da velocidade do serviço

cartões	tipo servico	receita
CARTAO1	1-COMUM	41.80
CARTAO1	2-RAPIDO	44.73
CARTAO1	3-EMERGENCIAL	49.33
CARTAO2	1-COMUM	46.93
CARTAO2	2-RAPIDO	50.21
CARTAO2	3-EMERGENCIAL	55.37
CARTAO3	1-COMUM	39.30
CARTAO3	2-RAPIDO	42.05
CARTAO3	3-EMERGENCIAL	46.37

Nas Tabelas 13 e 14 observa-se que o total de produção é igual ao total de demanda no período. Por fim, o modelo optou por uma estratégia diferente para cada cartão. No CARTAO1 observamos que basicamente foi produzido apenas o necessário para atender os períodos onde há demanda. Para o CARTAO2 produziu-se no primeiro período, a demanda a ser entregue no primeiro e segundo período. Por último o CARTAO3 foi produzido no primeiro período. O

motivo dessas decisões é explicado pelo tamanho do lote de produção que foi definido como 100 unidades de demanda, o que condiciona o modelo a distribuir algumas produções, e o estoque mostrado na Tabela 15 é uma consequência direta disso.

Tabela 13 – Resultado Demanda de Cartão por Janela para $r=0$

cartões	período 1	período 2	período 3	Total
CARTAO1	185	143	138	466
CARTAO2	171	88	165	424
CARTAO3	41	18	95	154
Total Geral	397	249	398	1044

Tabela 14 – Resultado alocação de produção para $r=0$

Cartão	Fábrica	período 1	período 2	período 3	Total
CARTAO1	GRAFICA1	185	143	138	466
CARTAO2	GRAFICA1	259	-	165	424
CARTAO3	GRAFICA1	154	-	-	154

Tabela 15 – Resultado do estoque para $r=0$

Cartão	Fábrica	período 1	período 2	período 3
CARTAO2	GRAFICA1	-	-	-
CARTAO2	GRAFICA1	88	-	-
CARTAO3	GRAFICA1	18	-	-

Conforme se esperava, a Tabela 17 é idêntica à Tabela 16, o que comprova que o o modelo está correto, uma vez que $r=0$ ou seja, não seria permitido atraso na entrega.

Após avaliar o último resultado na Tabela 18, observamos que a entrega respeita a restrição da demanda por período e região, conforme esperamos. Um ponto importante é que nesse momento o modelo escolhe o operador e o tipo de frete a ser utilizado para entrega daquele volume de cartão. Verificando a Tabela 11, a escolha predominante do OPERADOR1 na REGIAO1 ocorre porque o custo dele é mais barato nela, logo é lógico que o modelo escolha o menor custo para maximizar a diferença entre receitas e despesas. Porém, é de se observar que para a mesma REGIAO1, o tipo de frete usado tem total vínculo com o tipo de cartão a ser entregue, pois o tipo de frete varia para o mesmo operador, isso porque cartões que geram maior receita há possibilidade de entregar mais rápido, pois a receita gerada compensa uma entrega expressa.

Tabela 16 – Demanda por região e janela de entrega para $r=0$

cartoes	regioes	período 1	período 2	período 3	Total Geral
CARTAO1	REGIAO1	56	13	87	156
CARTAO1	REGIAO2	36	95	51	182
CARTAO1	REGIAO3	93	35	0	128
CARTAO1 Total		185	143	138	466
CARTAO2	REGIAO1	129	9	23	161
CARTAO2	REGIAO2	3	22	40	65
CARTAO2	REGIAO3	39	57	102	198
CARTAO2 Total		171	88	165	424
CARTAO3	REGIAO1	26	0	0	26
CARTAO3	REGIAO2	4	0	64	68
CARTAO3	REGIAO3	11	18	31	60
CARTAO3 Total		41	18	95	154

Tabela 17 – Resultado atendimento janela de entrega para $r=0$

cartoes	regioes	período 1	período2	período 3	Total Geral
CARTAO1	REGIAO1	56	13	87	156
CARTAO1	REGIAO2	36	95	51	182
CARTAO1	REGIAO3	93	35	0	128
CARTAO1 Total		185	143	138	466
CARTAO2	REGIAO1	129	9	23	161
CARTAO2	REGIAO2	3	22	40	65
CARTAO2	REGIAO3	39	57	102	198
CARTAO2 Total		171	88	165	424
CARTAO3	REGIAO1	26	0	0	26
CARTAO3	REGIAO2	4	0	64	68
CARTAO3	REGIAO3	11	18	31	60
CARTAO3 Total		41	18	95	154

É importante salientar que partimos também do fato que quanto mais demoramos para entregar um cartão, mais isso impacta a receita gerada pelo cliente, uma vez que o quão mais rápido entregarmos um cartão para o cliente certo, mais rápido ele desbloqueia o mesmo e utiliza, gerando a oportunidade de receita. Esse tipo de escolha é extremamente necessária na empresa que estamos analisando, uma vez que a escolha do melhor operador de entrega não é uma decisão óbvia quando temos uma quantidade grande de operadores de entrega, muitos tipos de frete para os operadores, diversas regiões e clientes diferentes a serem atendidos. Reforçando esse último ponto a entrega vinculada ao tipo cliente passa ser um diferencial competitivo dado que a entrega expressa para todos os clientes teria um impacto grande na gestão orçamentária da área e a viabilidade financeira não seria aceitável, sendo isso outro ponto que justifica a otimização.

Tabela 18 – Resultado distribuição da demanda e janela de entrega para $r=0$

cartoes	graficas	regioes	operador	tipo de frete	período 1	período 2	período 3
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO	56		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL		13	
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			87
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM	36		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM		95	
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			51
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM	93		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM		35	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL	129		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL		9	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL			23
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM	3		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM		22	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			40
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM	39		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM		57	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			102
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO	26		
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM	4		
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			64
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM	11		
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM		18	
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			31

4.3.2 Resultados para $r=1$

Alterando apenas o parâmetro $r=1$ conforme Tabela 19, observamos que o comportamento do modelo muda bastante do ponto de vista de decisão. A distribuição da produção é bem diferente e as decisões de estoque também são afetadas, principalmente o CARTAO3. Esse cartão passa a ter um estoque maior no período 2, pois o volume de produção foi consolidado para a esse período, como observamos na Tabela 20.

Tabela 19 – Atraso máximo nas janelas de tempo utilizados na simulação.

cartão	$r=1$
CARTAO1	1
CARTAO2	0
CARTAO3	1

O estoque se comporta de maneira ligeiramente diferente do cenário para $r=0$, sendo que o CARTÃO 3 possui estoque no período 2, dado que no período 1 tomou-se a decisão de produzir para todo o horizonte de análise conforme vemos nas Tabelas 20 e 21. A distribuição da demanda também é diferente nesse cenário comparado a $r=0$, onde vemos que o modelo usufruiu da possibilidade de poder a atrasar a entrega em 1 período, conforme visto na Tabela 22

Tabela 20 – Resultado alocação de produção $r=1$

Cartão	Fábrica	período 1	período 2	período 3	Total
CARTAO1	GRAFICA1	328	138	-	466
CARTAO2	GRAFICA1	259	-	165	424
CARTAO3	GRAFICA1	-	154	-	154

Tabela 21 – Resultado do estoque $r=1$

Cartão	Fábrica	período 1	período 2	período 3
CARTAO2	GRAFICA1	88	-	-
CARTAO3	GRAFICA1	-	95	-

Tabela 22 – Resultado distribuição da demanda e janela de entrega alterando $r=1$

cartoes	graficas	regioes	operador	tipo de frete	período 1	período 2	período 3
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO	56		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			13
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			87
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM	36		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			95
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			51
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM	93		
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM			35
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL	129		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL		9	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL			23
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM	3		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM		22	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			40
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM	39		
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM		57	
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			102
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO		26	
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM		4	
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			64
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM		11	
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM		18	
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			31

4.3.3 Resultados para $r=3$

Nesse exemplo para $r=3$ decidiu-se variar a janela de entrega do modelo permitindo que ele se comportasse conforme exposto na Tabela 23. Por fim, podemos ver que o modelo decidiu entregar sempre no último período conforme exposto nas Tabelas 24 e 25. É observável também que o tipo de frete usado nesse segundo exemplo também variou, onde o modelo preferiu fazer um tipo de frete rápido para todas as janelas do CARTAO1.

Tabela 23 – Atraso máximo nos períodos de tempo utilizados na simulação.

cartão	r=3
CARTAO1	3
CARTAO2	2
CARTAO3	3

Tabela 24 – Resultado alocação de produção para r=3

Cartão	Fábrica	período 1	período 2	período 3	Total
CARTAO1	GRAFICA1	-	-	466	466
CARTAO2	GRAFICA1	-	-	424	424
CARTAO3	GRAFICA1	-	-	154	154

Tabela 25 – Resultado distribuição da demanda e período de entrega alterando r=3

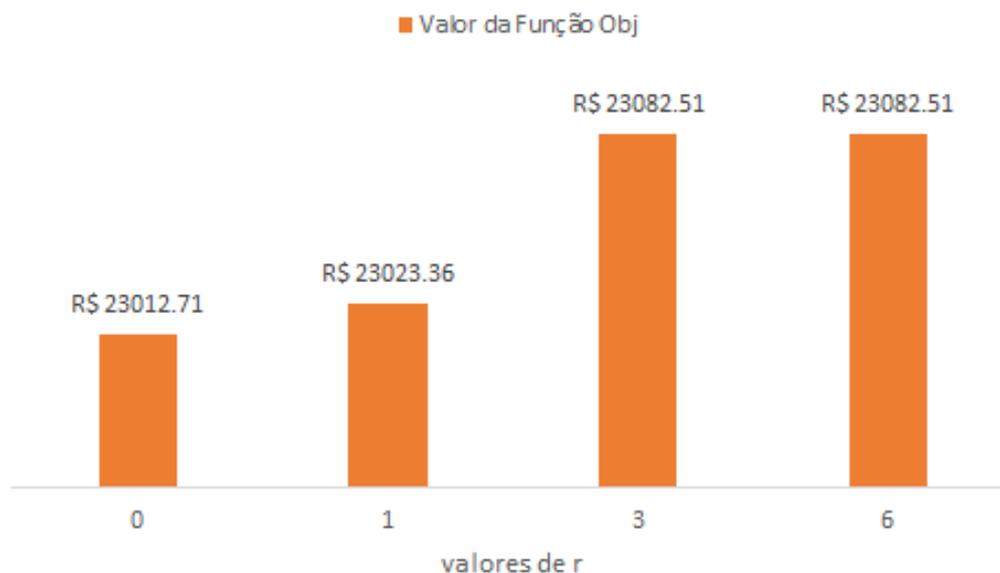
cartoes	graficas	regioes	operador	tipo de frete	período 1	período 2	período 3
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			56
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			13
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			87
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			36
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			95
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR1	1-COMUM			51
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM			93
CARTAO1	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR1	1-COMUM			35
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL			129
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL			9
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	3-EMERGENCIAL			23
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			3
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			22
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			40
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			39
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			57
CARTAO2	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			102
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO1	OPERADOR1	2-RAPIDO			26
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			4
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO2	OPERADOR3	1-COMUM			64
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			11
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			18
CARTAO3	GRAFICA1	REGIAO3	OPERADOR3	1-COMUM			31

4.3.4 Resultados para r=6 ou maior

Percebemos que a solução para quando r=6 é idêntica a solução para r=3, isso ocorre predominantemente por que o modelo já tem folga suficiente dentro do horizonte de tempo para alocar tudo no último período de tempo, usando inclusive frete emergencial para potencializar a receita. A [Figura 23](#) mostra o valor da função objetivo para cada valor de r que simulamos até aqui nesse capítulo. Por fim, vemos que a partir de r=3, não há alteração no valor da função

objetivo.

Figura 23 – Gráfico de Função Objetivo conforme a variação de r



Fonte: Autor (2022).

4.3.5 Instâncias Maiores

Conforme podemos verificar na Tabela 26 rodamos diversas instâncias para o problema com horizonte temporal detalhado. Essas instâncias partiram das premissas abordadas no início da seção 4.2 quando explanamos o gerador de dados e em qual cenário iríamos rodar instâncias do modelo. Na Tabela 26, o campo definido como *model* é dado na forma de quantidade de gráficos-regiões-cartões-operadores-tipo_serviços-períodos- r , ou seja, o primeiro número indica o número de gráficos diferentes utilizadas na simulação, o segundo a quantidade de regiões, o terceiro a quantidade de cartões, o quarto a quantidade de operadores diferentes, o quinto a quantidade tipos diferentes de serviços, o sexto indica a quantidade de janelas/períodos de tempo e por último qual foi o fator r daquela simulação. Já o campo *status*, como pode-se verificar, pode ser O: Otimizado ou T: Tempo limite atingido, no caso o tempo limite para solução é 300 segundos, conforme abordado anteriormente.

É possível observar que quando $r=0$, que significa que não existe margem para o modelo permitir atrasos na janela de entrega, ele sempre consome o tempo limite da otimização. Isso acontece porque quanto maior o exemplo, mais complexo tende a ser. E, quando colocamos restrições que impõe que a demanda seja atendida apenas naquele intervalo específico de tempo, é natural que o modelo demore mais para encontrar uma solução ótima, dado que há uma menor flexibilidade para a solução, assim como o espaço de soluções é menor se comparado ao modelo que permite atrasos na janela.

Outra informação que colocamos na Tabela 26, é o $MIPgap$. Na prática, quando o valor da equação 4.17 cai abaixo do valor desse parâmetro, a otimização inteira mista é interrompida. Por exemplo, para instruir o *solver* a parar assim que localizar uma solução viável de número inteiro que provou estar dentro de um por cento do ideal, configuramos a tolerância da diferença relativa do MIP para 0.01. Isto posto, também é possível perceber que quanto maior o tamanho da simulação, ou seja, quanto maior o número de gráficas, cartões, operadores, períodos e para $r=0$ maior tende a ser o $MIPgap$.

$$MIPgap = \frac{|bestbound - bestinteger|}{|bestinteger|} \quad (4.17)$$

Fora essas informações, também contabilizamos a quantidade de restrições, variáveis e variáveis binárias do modelo, assim como o valor da função objetivo, o tempo que o modelo rodou até encontrar a solução ou parar devido ao limite de tempo, a quantidade de soluções para o modelo, a quantidade de iterações e número de nós percorridos.

Por fim, não conseguimos rodar muitas instâncias maiores que as observáveis na Tabela 26, porém isso não prejudica analisarmos um modelo menor e perceber as vantagens claras da modelagem integrada do problema.

Tabela 26 – modelos maiores

Modelo (c-g-m-o-s-t-r)	Status	Qtde. Restrições	Qtde. Variáveis	Qtde. Binárias	Valor Função Obj. (R\$)	MIP Gap	tempo (segundos)	Qtde. Soluções	Qtde. Iterações	Qtde. Nós
4-10-10-3-3-10-0	O	220 290	145 150	72 530	464 513,9	0,01%	1,8	7	5 021	1
4-10-10-3-3-10-3	O	205 662	145150	72 530	465 993,2	0,01%	227,5	10	266 244	39
4-10-10-3-3-20-0	O	854 580	566 300	283 060	858 286	0,01%	6,6	10	9 279	1
4-10-10-3-3-20-3	T	822 012	566 300	283 060	858 388,5	0,35%	300,1	8	203 767	1
4-10-10-5-3-10-0	O	310 490	205250	102 630	464 236,6	0%	2,6	9	7 187	1
4-10-10-5-3-10-3	T	289 502	205 250	102 630	466 419	0,01%	300,1	10	346 246	74
4-10-10-5-3-20-0	O	121 4980	806 500	403 260	855 613,4	0,01%	8	6	13 437	1
4-10-10-5-3-20-3	T	1 168 252	806 500	403 260	858 790	0,17%	300,1	9	202 128	1
4-10-15-3-3-10-0	O	330 170	217 630	108 690	96 194,4	0,01%	3,4	2	6 767	1
4-10-15-3-3-10-3	T	308 780	217 630	108 690	97 236,9	0,68%	300,2	10	142 259	1
4-10-15-3-3-20-0	O	1 281 340	849 260	424 380	187 297,6	0,01%	18,9	10	19 832	1
4-10-15-3-3-20-3	T	1 233 730	849 260	424 380	188 852,6	1,15%	300,1	5	22 9677	1
4-10-15-5-3-10-0	O	465 370	307 730	153 790	83 346,6	0%	3,9	2	9 106	1
4-10-15-5-3-10-3	T	434 680	307 730	153 790	84 555,1	1,28%	300,1	10	230 756	1
4-10-15-5-3-20-0	O	1 821 740	1 209 460	604 580	161 444,8	0%	25,3	10	30 544	639
4-10-15-5-3-20-3	T	1 753 430	1 209 460	604 580	162 835,4	2,28%	300,7	6	278 593	1
4-15-10-3-3-10-0	O	307 630	202 240	101 120	280 260,5	0,01%	2,5	9	7 583	1
4-15-10-3-3-10-3	T	287 278	202 240	101 120	282 063,3	0,07%	300,7	10	141 927	1
4-15-10-3-3-20-0	O	1 191 260	788 480	394 240	559 856,7	0%	9,7	10	11 320	1
4-15-10-3-3-20-3	T	1 145 948	788 480	394 240	562 911,6	0,34%	300,1	7	197 904	1
4-15-10-5-3-10-0	O	460 970	304 410	152 290	27 1135,6	0,01%	4,1	10	12 277	1
4-15-10-5-3-10-3	T	429 806	304 410	152 290	273 955,1	0,16%	300,1	10	233 924	1
4-15-10-5-3-20-0	O	1 803 940	1 196 820	598 580	541 559,5	0,01%	14	9	22 364	1
4-15-10-5-3-20-3	T	1 734 556	1 196 820	598 580	546 165,7	0,56%	300,2	6	252 416	1
4-15-15-3-3-10-0	O	461 060	303 220	151 530	112 316,4	0,01%	4,6	10	4 517	1
4-15-15-3-3-10-3	T	431 300	303 220	151 530	113 689,7	12,7%	300,1	9	254 470	1
4-15-15-3-3-20-0	O	1 786 120	1 182 440	591 060	234 227,4	0%	16,6	10	11 470	1
4-15-15-3-3-20-3	T	1 719 880	1 182 440	591 060	235 983,9	1,88%	300,2	5	310 507	1
4-15-15-5-3-10-0	O	690 900	456 390	228 200	89 408,9	0,01%	6,5	10	6 151	1
4-15-15-5-3-10-3	T	645 330	456 390	228 200	90 951,2	16,02%	300,1	5	285 908	1
4-15-15-5-3-20-0	O	2 704 800	1 794 780	897 400	188 285	0%	23,4	10	14 491	1
4-15-15-5-3-20-3	T	2 603 370	1 794 780	897 400	185 906,5	6,07%	300,3	3	345 189	1

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme [BACEN \(2019\)](#), o cartão de crédito tornou-se um ativo muito popular na economia mundial e brasileira, pois o mesmo traz muitas vantagens aos seus usuários por diversos motivos. Atualmente, tudo que o dinheiro em espécie proporciona, um cartão pode replicar. Sua aceitação é ampla, há menor risco na transação e também oferece conveniências que o dinheiro físico não consegue proporcionar.

Seja pela maior segurança, ou pelo crédito imediato com pagamento futuro e sem a necessidade de garantias à instituição financeira, seja pela conveniência, agilidade, descontos e vantagens em estabelecimentos parceiros, ou mesmo pelo bônus aos seus clientes de programas de relacionamento onde é possível trocar pontos por prêmios, milhas aéreas e muito mais, é fato que o cartão tornou-se presente no nosso cotidiano e é extremamente necessário para aquecimento do mercado de bens de consumo, como vemos bem explicitado em [LONG \(2019\)](#).

Com a popularização do cartão de crédito, a existência dos chamados bancos tradicionais e o crescimento das chamadas *fintechs*, há muitas companhias do mesmo tipo da empresa alvo desse estudo nesse segmento, com provavelmente as mesmas dificuldades e desafios, sendo o principal deles trazer excelência operacional através de um bom nível de serviço, entregas e produções rápidas e no tempo certo, porém com um custo assertivo e competitivo, com a visão do todo da cadeia e baseando as decisões de maneira integrada.

Assim, nesta dissertação de mestrado foram abordados temas como modelo de alocação de produção, modelo de distribuição, dimensionamento de lotes e integração da cadeia de suprimentos de uma empresa produtora e distribuidora de cartões de crédito e débito. Os modelos foram testados utilizando dados simulados, através de um gerador de dados aleatórios, porém eles foram baseados em dados reais dessa empresa, tomando-se cuidado com o sigilo e fazendo algumas alterações para garantir a confidencialidade necessária.

O primeiro modelo na verdade é subdividido em dois, onde é feito a otimização primeiramente da produção e depois a distribuição, com o objetivo de maximizar a diferença entre

a receita do cartão e os custos, garantindo que se cumpra restrições de qualidade da operação assim como restrições orçamentárias num horizonte temporal consolidado.

Baseado principalmente em [Darvish e Coelho \(2016\)](#) e [Darvish e Coelho \(2018\)](#), o segundo modelo permite a introdução de um horizonte temporal detalhado sendo ligeiramente mais complexo que o anterior, mas possibilitando a formação de estoque para atender demandas futuras e permitindo flexibilização da janela de entrega dos cartões, com nível de serviço e atendimento ao cliente.

O objetivo principal dessa dissertação é fornecer ao planejamento tático da empresa as melhores decisões, informações e resultados no sentido de garantir o melhor plano de distribuição, o melhor plano de alocação da produção e origem de um cartão, a melhor escolha de operador para entregar em determinada rota garantindo qualidade do serviço e custos competitivos, evitando-se desperdícios e levando em consideração ferramentas importantes.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Há uma oportunidade de melhorar o segundo modelo, pois nos dados é possível verificar o tempo de um produto sair de uma origem e chegar em um destino. Apesar de haver essa informação (do *lead time* de entrega), dado a complexidade atual do modelo, optou-se por não usar a informação, mas de fato ele ficaria ainda mais verossímil.

Outro ponto que podemos verificar é que as demandas foram consolidadas baseadas no conceito de mesorregião macroeconômica retirado do site do IBGE. Aqui é possível aplicar modelos não supervisionados de aprendizado de máquina para fazer o agrupamento da demanda de uma maneira melhor, agregando de maneira assertiva os diferentes tipos e famílias de cartão.

Pode-se também aplicar algoritmos de previsão de demanda para rodar os modelos para um horizonte temporal grande, tornando a decisão do mesmo mais próxima da visão estratégica. Por último, mas não menos importante, há a oportunidade de gerar instâncias com máquinas e ferramentas em *cloud* que são mais poderosas do ponto de vista de processamento e memória do que o computador disponibilizado, para conseguir rodar cenários de dados em escala real.

Nos dois modelos utilizados, notou-se que o sistema de produção e distribuição de cartões é bem amplo e o trabalho em questão não esgota o tema abordado. Porém de forma objetiva, esta dissertação teve o objetivo de fornecer algumas soluções para o problema contextualizado, propondo novas abordagens e oportunidades de melhorias para toda cadeia de suprimentos.

REFERÊNCIAS

ABECS. “**Estudo do Setor de Meios Eletrônicos de Pagamento: Balanço 2018**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://api.abecs.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Balanc%CC%A7o-do-Setor-2018.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 22.

ADULYASAK, Y.; CORDEAU, J.-F.; JANS, R. The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. **Computers and Operations Research**, v. 55, p. 141–152, 2015. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054814000240>>. Citado na página 26.

ALMADA-LOBO, B.; CLARK, A.; GUIMARÃES, L.; FIGUEIRA, G.; AMORIM, P. Industrial insights into lot sizing and scheduling modeling. **Pesquisa Operacional**, SciELO Brasil, v. 35, n. 3, p. 439–464, 2015. Citado na página 26.

AMEX. **American Express Logo Review**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20100920014842/http://companylogos.ws/americanexpresslogo.html>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 19.

ARCHETTI, C.; BERTAZZI, L.; PALETTA, G.; SPERANZA, G. Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system. **Computers and Operations Research**, Elsevier, v. 38, n. 12, p. 1731–46, 2011. Citado na página 28.

ARMENTANO, V.; SHIGUEMOTO, A.; LØKKETANGEN, A. “**Tabu search with path re-linking for an integrated production–distribution problem**”. [S.l.], 2010. Disponível em: <[Elsevier27oct.2010](#)>. Acesso em: 27 oct. 2010. Citado na página 28.

AUTOPRINT. **Autoprint Dion 450 Offset Color Printing Machine**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/autoprint-dion-450-4-colour-5696797312.html>>. Acesso em: 22 out. 2019. Citado na página 30.

AUTOR. **Macro Processo de Expedição de Cartões**. [S.l.], 2019. Citado na página 39.

_____. **Macro Processo de Produção de Cartões**. [S.l.], 2019. Citado na página 37.

_____. **Função Objetivo em Função do r**. [S.l.], 2022. Citado na página 71.

_____. **Cadeia de Suprimento de Cartões de Crédito**. [S.l.], 2023. Citado na página 36.

BACEN. “**Quantidade de transações com cartões de crédito**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://dadosabertos.bcb.gov.br/dataset/25223-quantidade-de-transacoes-com-cartoes-de-credito>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado nas páginas 21 e 75.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. Brasil: Editora Bookman, 2006. Citado na página 23.

- BRAHIMI, N.; ABSI, N.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; NORDLI, A. Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey. **European Journal of Operational Research**, v. 263, n. 3, p. 838–863, 2017. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717304368>>. Citado na página 26.
- BUSCHKÜHL, L.; SAHLING, F.; HELBER, S.; TEMPELMEIER, H. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. **OR Spectrum**, v. 32, n. 2, p. 231–261, 2010. Citado na página 26.
- CHEN, W. W. M. **A linear programming model for integrated steel production and distribution planning**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/01443579710167276>>. Acesso em: 01 jan. 1997. Citado na página 22.
- CHUTKOW, P. **VISA : The Power of an Idea**. United States: Harcourt Legal and Professional Publications, Inc., 2001. Citado na página 19.
- CNJACK. **CNJ-TD400 Auto Code**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.cnjacky-rfidcard.com/en-US/detail.aspx?node=en-products408&id=544>>. Acesso em: 22 out. 2019. Citado na página 33.
- COHEN, M. A.; LEE, H. L. “**Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods**”. [S.l.], 1988. Disponível em: <[OperationsResearch, vol.36, no.2, pp.216\TI\textendash228, 1988](#)>. Acesso em: 01 jan. 1988. Citado na página 28.
- CORDRAY, R. **The Consumer Credit Card Market**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://files.consumerfinance.gov/f/201512_cfpb_report-the-consumer-credit-card-market.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 20.
- CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. Planning models for freight transportation. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 97, p. 409–438, 1997. Citado na página 23.
- DANTZIG, G.; RAMSER, J. The truck dispatching problem. **Management Science**, v. 6, p. 80–91, 1959. ISSN 1. Citado na página 26.
- DARVISH, H. L. M.; COELHO, L. C. A dynamic multi-plant lot-sizing and distribution problem. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 1, p. 22, 2016. ISSN 6707-6717. Citado nas páginas 27 e 76.
- DARVISH, M.; COELHO, L. C. Sequential versus integrated optimization: Production, location, inventory control, and distribution. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 1, p. 203–214, 2018. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221718300493>>. Citado nas páginas 27, 53 e 76.
- DCLUB. **Casino Banking**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://casinosbanking.com/diners-club-overview.htm>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 19.
- ECOMMERCEBRASIL, R. M. **Loggi: o Uber dos motoboys que está revolucionando a logística no Ecommerce**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://ecommercenapratica.com/blog/loggi-uber-motoboy/>>. Acesso em: 25 out. 2019. Citado na página 35.
- FOLHAPRESS. **Atuação dos Correios no comércio virtual cai quase 20% em 6 anos**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/atuacao-dos-correios-no-comercio-virtual-cai-quase-20-em-6-anos/>>. Acesso em: 25 out. 2019. Citado na página 34.

GLOCK, C. H.; GROSSE, E. H.; RIES, J. M. The lot sizing problem: A tertiary study. **International Journal of Production Economics**, v. 155, p. 39–51, 2014. ISSN 0925-5273. Celebrating a century of the economic order quantity model. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270971466_The_lot_sizing_problem_A_tertiary_study>. Citado na página 26.

HAYASHI, F. “**THE ECONOMICS OF PAYMENT CARD FEE STRUCTURE: WHAT DRIVES PAYMENT CARD REWARDS?**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.kansascityfed.org/PUBLICAT/RESWK/PAP/PDF/rwp08-07.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 21.

ISAAC, F. “**Why Are Credit Scores Important?**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.americanexpress.com/us/financial-education/how-credit-scoring-helps-you.html>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 21.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, Taylor and Francis, v. 46, n. 6, p. 1619–1643, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207540600902262>>. Citado na página 26.

KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003. Citado na página 26.

LI, Y.; CHU, F.; CHU, C.; ZHU, Z. An efficient three-level heuristic for the large-scaled multi-product production routing problem with outsourcing. **European Journal of Operational Research**, v. 272, n. 3, p. 914–927, 2019. ISSN 03772217. Citado na página 28.

LONG, N. **The Importance of Credit Cards**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://budgeting.thenest.com/importance-credit-cards-29514.html>>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado nas páginas 21 e 75.

MANDELL, L. **Credit Card Industry: A History**. United States: Twayne Pub, 1990. Citado na página 19.

MANOUSAKIS, E. G.; KASAPIDIS, G. A.; KIRANOUDIS, C. T.; ZACHARIADIS, E. E. An infeasible space exploring matheuristic for the Production Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier B.V., v. 298, n. 2, p. 478–495, 2022. ISSN 03772217. Citado na página 28.

MIRANDA, P. L.; CORDEAU, J. F.; FERREIRA, D.; JANS, R.; MORABITO, R. A decomposition heuristic for a rich production routing problem. **Computers and Operations Research**, v. 98, p. 211–230, 2018. ISSN 03050548. Citado na página 28.

MOSTAFA, A. B. E. N. A. “**The Production-Inventory-Distribution-Routing Problem: An integrated formulation and solution framework**”. [S.l.], 2015. Disponível em: <[IEEE2015](#)>. Acesso em: 01 jan. 2015. Citado na página 27.

MOSTAFA, N.; ELTAWIL, A. Using valid inequalities to solve the integrated production-inventory-distribution-routing problem. **International Journal of Operational Research**, v. 35, n. 4, p. 551, 2019. ISSN 1745-7645. Citado na página 28.

MWORLDWIDE. “**Mastercard: Company Milestones**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20130514105529/http://mastercard.com/us/company/en/ourcompany/company_milestones.html>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 20.

O'SULLIVAN, A. **Economics: Principles in action**. United States: Pearson Prentice Hall, 2003. Citado na página 20.

ROCKMAXGUARD. **Personal Safe Box**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.rockmaxguard.com/>>. Acesso em: 23 fev. 2023. Citado na página 34.

SCHOLNICK, B.; MASSOUD, N.; SAUNDERS, A.; CARBO-VALVERDE, S.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, F. The economics of credit cards, debit cards and atms: A survey and some new evidence. **Journal of Banking & Finance**, v. 32, n. 8, p. 1468–1483, 2008. ISSN 0378-4266. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378426607001641>>. Citado na página 21.

SYSTEM, B. O. G. O. T. F. R. “**Report to the Congress on the Use of Credit Cards by Small Businesses and the Credit Card Market for Small Businesses**”. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.federalreserve.gov/newsevents/conferences/sbc_smallbusinesscredit.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 20.

TAOXING. **Hangzhou Taoxing Printing Machinery Co., Ltd**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://cnscreen.en.made-in-china.com/product/oNSEUbPvrsVR/China-High-Precision-Semi-Automatic-Vertical-Flatbed-Silk-Screen-Printing-Machine-for-Flat-Sheet.html>>. Acesso em: 22 out. 2019. Citado na página 31.

THALES. **What to do with old credit cards? A quick review**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/banking-payment/inspired/old-credit-cards>>. Acesso em: 20 fev. 2023. Citado na página 28.

TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, L. J.; MCCLAIN, J. O. Capacitated lot sizing with setup times. **Management Science**, v. 35, n. 3, p. 353–366, 1989. Citado na página 25.

VISAINC. **History of Visa**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://usa.visa.com/about-visa/our_business/history-of-visa.html>. Acesso em: 11 dez. 2019. Citado na página 19.

WAGNER, H. M.; WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v. 5, p. 89–96, 1958. ISSN 1. Citado na página 25.

WENLIN. **A3 Size Auto Feeding Plastic Card Laminator CR80**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://wlen.wangwenlin.com/>>. Acesso em: 23 fev. 2023. Citado na página 32.

_____. **WL-HSA-3C Full Automatic Card Punching Machine**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://wlen.wangwenlin.com/>>. Acesso em: 23 fev. 2023. Citado na página 32.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programming**. United States: Wiley, 2013. Citado na página 22.

