



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

REGINALDO CUNHA SALES JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA SOLUÇÃO DO
PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

Recife

2022

REGINALDO CUNHA SALES JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA SOLUÇÃO DO
PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura.

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Isis Didier Lins.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves da Luz, CRB-4 / 1361

S163d	Sales Junior, Reginaldo Cunha. Desenvolvimento de algoritmo genético para solução do problema da programação de carregamento de veículos / Reginaldo Cunha Sales Junior. – 2022. 43f.: il., figs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Recife, 2022. Inclui referências. 1. Engenharia de produção. 2. Problema da programação de carregamentos. 3. Otimização combinatória. 4. Algoritmos genéticos. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título. UFPE 6658.5CDD (22. ed.) BCTG/2022-441
-------	--

REGINALDO CUNHA SALES JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA SOLUÇÃO DO
PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 23/08/2022

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o(a) candidato(a) **REGINALDO CUNHA SALES JUNIOR, APROVADO(A).**

Recife, 23 de agosto de 2022.

Prof. MÁRCIO JOSÉ DAS CHAGAS MOURA, Doutor (UFPE)

Prof.^a ISIS DIDIER LINS, Doutora (UFPE)

Prof. PAULO RENATO ALVES FIRMINO, Doutor (UFCA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita misericórdia e permissividade para que este momento fosse concretizado.

Aos meus pais, Josineide Barbosa e Reginaldo Cunha, pelo carinho, paciência e educação oferecidos durante meu processo de formação como cidadão e membro integrante de uma sociedade.

A minha esposa Raíssa Lima, pela paciência, pelo apoio, pelo companheirismo e pela mulher de caráter que é. A minha filha Ruanne que mesmo em gestação, já faz parte dessa conquista.

A todo corpo docente do curso de Mestrado Profissional de Engenharia de Produção da UFPE – PPGEPP, pela paciência, dedicação e conhecimento passado aos alunos.

Ao Ceerma-UFPE por me prover pessoas importante e de grande conhecimento para a construção dessa obra, em especial o meu orientador Prof. Dr. Márcio Moura por todo apoio, paciência, instrução e conhecimento compartilhado ao longo da minha jornada no desenvolvimento deste trabalho. Meu muito obrigado.

Aos meus amigos de turma pelos diversos momentos que vivenciamos em busca de atingir nossos objetivos.

A empresa na qual eu pude adquirir o conhecimento e enxergar a oportunidade que me trouxe até aqui para construir essa obra. Meu agradecimento por acreditar e apostar no meu potencial para desenvolvimento deste trabalho.

Por fim e não menos importante, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que de alguma forma eu chegasse até esse grande momento.

“Tudo o que a mente humana pode conceber e acreditar, ela pode conquistar.”

Hill (2015)

RESUMO

A finalidade desta dissertação é modelar a programação de carregamento dos veículos regidos por uma tabela de horários em um operador logístico em busca de soluções que proporcionem redução de custos. Sendo assim, este trabalho se utilizou de buscas realizadas no que há de mais recente e avançado em termos de modelagem com algoritmos genéticos para aplicar na resolução do problema. Em seguida, adotou-se como metodologia de direcionamento o levantamento de como funciona a programação dos carregamentos dos veículos assim como o conhecimento das regras de negócios contidas no setor responsável pela operação para identificar possíveis entraves contrários à produtividade e redução dos custos. Logo após construir a modelagem, deu-se início à atividade de análise dos resultados, onde se constatou que diversas soluções viáveis foram conhecidas, porém, dentre elas, 8 apresentavam as melhores soluções do modelo, ou seja, soluções que apresentavam a menor quantidade de colaboradores a serem contratados para operacionalizar os carregamentos dos veículos. De posse de tais evidências, esta dissertação avaliou comparativamente o impacto de algumas soluções utilizando uma das principais variáveis utilizadas pelos gestores operacionais, que é a quantidade de caixas. Por fim, dentre as oito melhores soluções, uma delas foi eleita como a melhor e recomendada para a implantação.

Palavras-chave: problema da programação de carregamentos; otimização combinatória; algoritmos genéticos.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to model the loading schedule of vehicles governed by a timetable in a logistics operator in search of solutions that provide cost reduction. Therefore, this work used searches carried out in the most recent and advanced in terms of modeling with genetic algorithms to apply in solving the problem. Then, it was adopted as a targeting methodology the survey of how the vehicle loading schedule works as well as the knowledge of the business rules contained in the sector responsible for the operation to identify possible obstacles contrary to productivity and cost reduction. Soon after building the model, the activity of analyzing the results was started, where it was found that several viable solutions were known, however, among them, 8 presented the best solutions of the model, that is, solutions that presented the least amount of employees to be hired to carry out the loading of vehicles. With such evidence, this dissertation comparatively evaluated the impact of some solutions using one of the main variables used by operational managers, which is the number of cashiers. Finally, among the eight best solutions, one of them was chosen as the best and recommended for implementation.

Keywords: load scheduling problem; combinatorial optimization; genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha operacional para coleta e entrega das encomendas (Unidades e Hub's)	17
Figura 2 - Malha operacional para coleta e entrega das encomendas (Hub's)	17
Figura 3 - Diagrama da estratégia operacional para coleta e entrega das encomendas	18
Figura 4 - Diagrama da estratégia operacional para transferência das encomendas entre unidades	20
Figura 5 - Representação da programação com o Gráfico de Gantt	23
Figura 6 - Representação das combinações com o Gráfico de Gantt	24
Figura 7 - Representação do cromossomo	27
Figura 8 - Representação do cruzamento de cromossomos	28
Figura 9 - Resultados por Geração	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Horários de Linhas de Transferência do Norte e Nordeste.....	22
Tabela 2 - Quantidade de combinações por veículo e dia da semana	24
Tabela 3 - Representação parcial da Tabela 1 com o Gráfico de Gantt	25
Tabela 4 - Representação da mudança de combinação com um movimento	25
Tabela 5 - Representação da mudança de combinação com dois movimentos	26
Tabela 6 - Representação da programação do Domingo e Segunda-feira.....	26
Tabela 7 - Representação do Filho 2 plotado na programação.....	29
Tabela 8 - Representação dos cálculos em Excel (dia: Domingo)	35
Tabela 9 - Representação dos cálculos em Excel (dia: Domingo e Segunda).....	35
Tabela 10 - Representação dos cálculos em Excel (Semana).....	36
Tabela 11 - Representação dos resultados em Excel (Semana).....	36
Tabela 12 - Resultado geral dos 1000 cromossomos	36
Tabela 13 - Representatividade do resultado dos 1000 cromossomos	37
Tabela 14 - Cromossomos com as melhores soluções do modelo	38
Tabela 15 - Quantidade de pacotes a carregar por dia e turno	39
Tabela 16 - Cromossomos com as melhores soluções do modelo	40
Tabela 17 - Definição dos horários dos carregamentos dos veículos.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
1.4	METODOLOGIA	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	ESTRATÉGIA DE TRANSPORTE DE PACOTES EM UM OPERADOR LOGÍSTICO	16
2.2	<i>CROSS-DOCKING</i> EM UM OPERADOR LOGÍSTICO.....	20
3	ESTUDO DE CASO	22
3.1	PROBLEMÁTICA DA PROGRAMAÇÃO DOS CARREGAMENTOS	22
3.2	O ALGORITMO GENÉTICO	27
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	29
3.4	RESTRIÇÕES DO MODELO	32
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	35
4.1	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	35
4.2	RESULTADOS ENCONTRADOS	36
4.3	RESULTADO DO HORÁRIO DO CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS	40
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A eficiência operacional desempenha um papel fundamental na saúde dos negócios. Além disso, proporciona oportunidades de redução de custos, aumento na produtividade da execução de seus processos, sejam eles de produção de um produto ou serviço, aumento da satisfação do cliente/consumidor por receber um produto/serviço mais rápido e com qualidade assegurada e, por consequência, desenvolvimento sustentável e consistente da marca, dos negócios e resultados.

O presente trabalho propõe-se a abordar de forma clara e objetiva um processo comum a todo operador logístico que presta serviço de movimentação de encomendas de uma origem para um ou mais destinos. O descarregamento dos veículos, a triagem das encomendas e o carregamento dos veículos são etapas dessa movimentação que ocorre dentro de um armazém que possui vão livre ou espaço totalmente aberto para movimentação de caixas, porém demarcado e identificado para que norteie as equipes operacionais em como utilizar, da melhor forma, a área disponibilizada.

As etapas supracitadas são regidas pela própria mercadoria, pois ela possui endereço certo para ser entregue, tendo partido de uma origem. Tal endereço também determina o caminho que essas mercadorias seguirão dentro do armazém que, por sua vez, é organizado de forma a deixar evidente todos os possíveis destinos os quais receberão suas mercadorias para que em seguida o processo de embarque/entrega seja realizado.

Neste trabalho, será utilizada uma modelagem matemática com algoritmo genético proposta por Holland (1992) para que seja encontrada a solução para o problema da programação dos carregamentos dos veículos contidos em uma tabela de horários pré-estabelecida e pensada para conectar ou reger as conexões entre as origens, destinos e hub's. Busca-se com a solução, a redução de custo da operação de carregamento de veículos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando a realidade mercadológica atual e a competitividade global, as empresas que pretendem se manter no mercado, precisam constantemente aprimorar seus processos

produtivos e buscar formas de reduzir custos, aumentar eficiência operacional e assegurar a qualidade de seus produtos/serviços.

Dentre os mais variados problemas encontrados, Gaudioso et al. (2021) conceitua o *cross-docking* como um método que tem por finalidade garantir que as mercadorias entrem e saiam do armazém com tempo de estocagem limitado ou nulo. E afirma que a gestão de um armazém que utiliza o *cross-docking* exige um nível de sincronização sofisticada dos processos de entrada e saída dos pacotes devido à limitação da área de armazenamento. Afirmam ainda que, dentre as áreas de pesquisa relevantes em nível operacional, está a programação dos veículos, ou seja, a programação dos descarregamentos e carregamentos.

Essa dissertação abordará especificamente como os operadores logísticos programam o carregamento dos veículos, evidenciando também o problema da simultaneidade ou concentração dos carregamentos e aplicará o algoritmos genéticos para solucioná-lo e minimizar o custo operacional. A modelagem matemática construída nessa dissertação para o problema da programação dos carregamentos possui diversas possibilidades de solução, devido ao horizonte da programação que se estende por uma semana e o intervalo de tempo (horário) para cada veículo ou destino. Sendo assim, o algoritmo genético foi escolhido por sua popularidade e eficiência em encontrar boas soluções de forma rápida quando comparado com outros métodos, de acordo com Hamdi (2020).

Tendo sido construída a modelagem, tem-se ao dispor de condições matemáticas para iniciar os cálculos e tornar conhecidas diversas soluções talvez antes desconhecidas, o que faz a busca ainda mais interessante e fascinante. Uma vez calculado, o modelo manipula toda uma programação que envolve diversos veículos para vários destinos, muitos pacotes de diferentes tamanhos e formatos, várias unidades operacionais e principalmente várias pessoas desde a construção ou ajuste da programação até a execução das tarefas necessárias. Isso demonstra a importância que o modelo proposto nessa obra tem para o processo e para a operação assim como para a empresa.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo da dissertação é identificar a menor quantidade possível de pessoas sugerida pelos algoritmos genéticos para executar a programação do carregamento dos veículos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Explicar o processo que dá origem a programação do carregamento dos veículos;
- Evidenciar o modelo/exemplo da programação utilizado;
- Desenvolver modelagem matemática com algoritmo genético;
- Efetuar os cálculos e tornar conhecida a quantidade mínima de pessoas sugerida pelo modelo.

1.4 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa tipo estudo de caso de cunho explicativo objetiva, fazendo uso da modelagem com Algoritmos Genéticos. Os dados por sua vez, são provenientes de variáveis quantitativas, embora o conhecimento da equipe de operações e algumas de suas opiniões possuam caráter qualitativo. Tais dados foram coletados utilizando-se das observações sistemáticas realizadas no sistema produtivo.

Tomou-se como referência o Algoritmos Genéticos sugerido por Holland (1992). Em seguida, tendo informações específicas e atualizadas, o processo foi esmiuçado em busca de identificar as oportunidades ainda inexploradas.

Tendo definido o tema e seu problema de estudo, utilizou-se de técnicas de documentação direta para coletar dados *in loco*, assim como de técnicas de observação direta intensiva para se aprofundar e provar a existência de detalhes talvez jamais vistos pelos responsáveis da operação. Por fim, o projeto em questão utilizou-se da técnica proposta por Holland (1992) para modelar o sistema de programação de carregamento de veículos com foco na carga de trabalho das pessoas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em 7 capítulos. Capítulo 1, denominado de “Introdução”, foram abordados as justificativas e a relevância e os objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2, “Fundamentação teórica”, são abordados os principais conceitos sobre *Cross-docking* e Algoritmo Genético através da fundamentação teórica da pesquisa.

O Capítulo 3, “Estudo de caso”, trata-se de da descrição da problemática enfrentada pelos Operadores Logísticos, o que fomentou o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 4, “Análise de resultados”, explana-se o resultado encontrado após os cálculos serem realizados, tendo obedecidas todas as restrições do modelo.

Por fim no Capítulo 5, “Conclusões”, faz-se um resumo geral sobre a pesquisa e demonstra as tendências e principais ganhos do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTRATÉGIA DE TRANSPORTE DE PACOTES EM UM OPERADOR LOGÍSTICO

No atual contexto em que calamidades na saúde assolam o mundo, fomenta-se cada vez mais o consumo on-line e faz crescer ainda mais o e-commerce em escala mundial segundo afirmações de Costa (2022). Tal cenário torna o desafio ainda mais competitivo para todas as empresas que se mantêm de pé, mesmo sendo impactadas pela pandemia COVID-19. Todos os tipos de negócio sofreram e/ou ainda sofrem com o impacto causado pelas impossibilidades de locomoção e contato das pessoas. Viram-se obrigadas a se reinventar e buscar a todo custo alternativas para sobreviver e prosseguir sem a menor certeza de que daria certo.

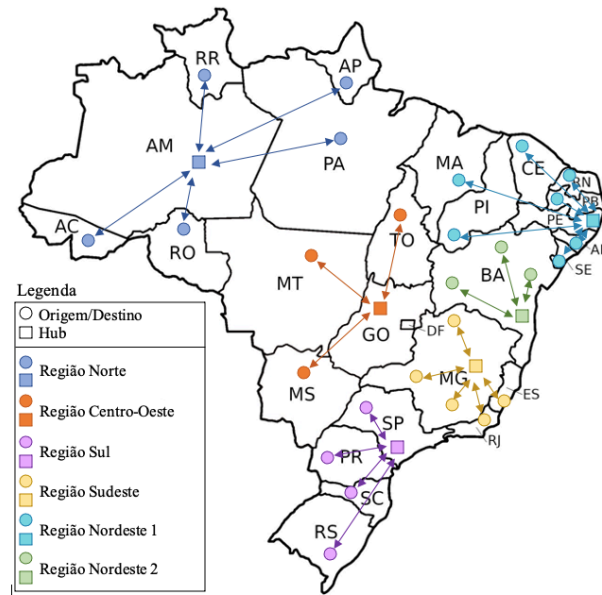
Costa (2022) afirma ainda que o impacto causou transformações importantes para a logística que jamais tornarão ao estado original. Um dos impactos expressivos, o e-commerce, subiu 27% em 2021 além de atingir 16,9% no aumento do número de pedidos o que resultou em 353 milhões de entregas. Para 2022 a tendência é de um crescimento de 9% e isso resultará no atingimento do recorde no faturamento anual na ordem de R\$ 174 bilhões.

Esse crescimento concentrado e acelerado exigiu ainda mais dos operadores logísticos a busca por meios de manter o bom funcionamento das operações, aumentar a produtividade nas entregas dos pacotes e principalmente a redução dos custos. Nesse contexto, a linha de raciocínio de Rushton et al. (2014) se encaixa, afirmando que o princípio principal é manter os pacotes em constante movimento.

Para levar adiante o raciocínio acima, se faz necessário uma estratégia para a malha operacional do Operador Logístico. Nesse contexto, Crainic et al. (2021) contribui acrescentando a importância dessa iniciativa, pois é através dela que se consegue manter ou vislumbrar o prazo de movimentação dos pacotes na cadeia de suprimentos da empresa.

Na Figura 1, visualiza-se uma representação de uma malha operacional composta, segundo Karimi-Mamaghan et al. (2020), por unidades de pequeno porte “círculo”, que representam unidades operacionais que efetuam coletas e entregas, denominadas respectivamente Origem e Destino. Além da origem e do destino, existem as unidades de consolidação ou Hub “quadrado”, que representam unidades operacionais que além de efetuar coletas e entregas, consolidam as encomendas oriundas de outras unidades para efetuar embarques.

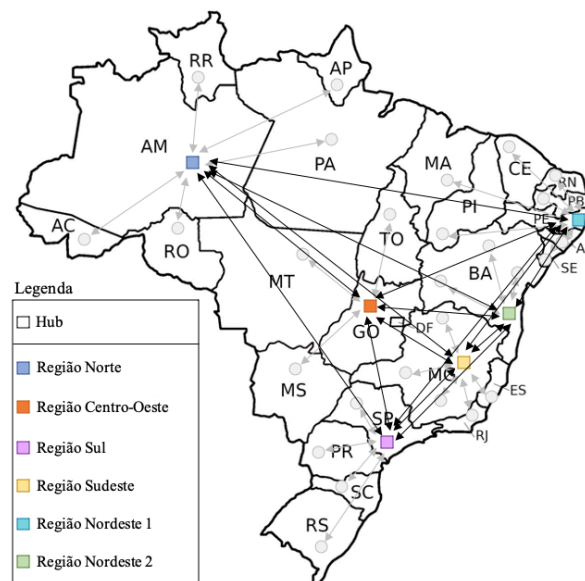
Figura 1 - Malha operacional para coleta e entrega das encomendas (Unidades e Hub's)



Fonte: O Autor.

Seguindo a mesma lógica de representação da Figura 1, a Figura 2 evidencia as operações de transporte executadas entre os Hub's. De acordo com Barsing et al. (2018), tais operações se justificam principalmente pela minimização de custos, aumento na produtividade e garantia da entrega dos pacotes aos destinatários além da melhoria no nível de atendimento ao cliente e relacionamento com fornecedores.

Figura 2 - Malha operacional para coleta e entrega das encomendas (Hub's)

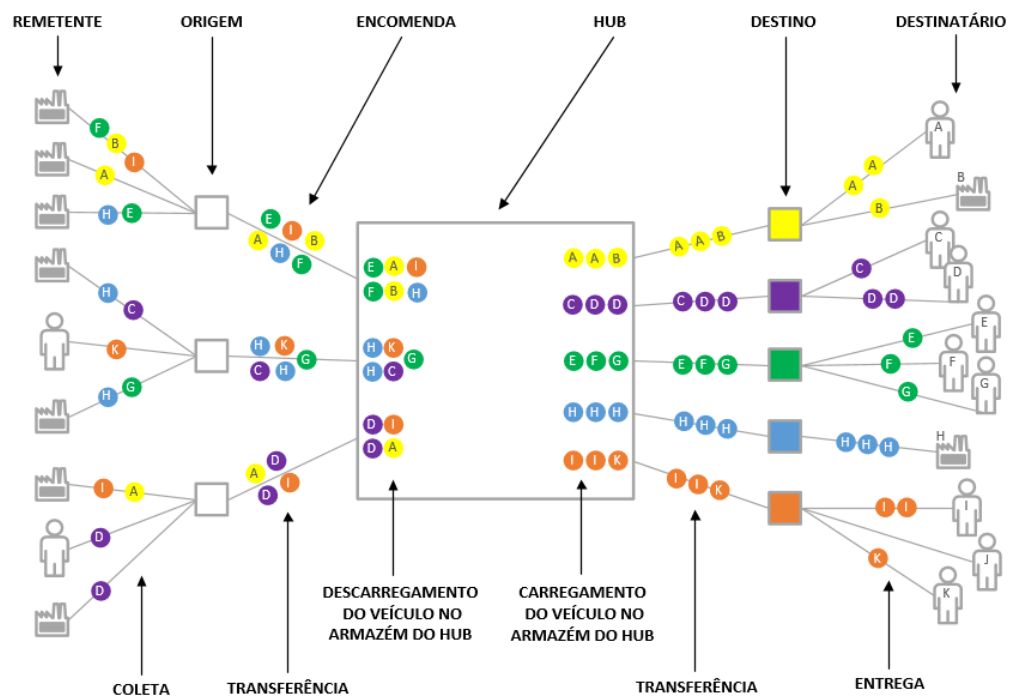


Fonte: O Autor.

Operações de transporte na malha dos Operadores Logísticos são desenhadas primeiramente para permitir um fluxo contínuo das encomendas, o que se aproxima da orientação de Rushton et al. (2014) e, além dessa rede, um método específico que garanta a velocidade dos pacotes na passagem da mercadoria pelos armazéns, sejam eles origem, durante a coleta e embarque, no destino, durante o descarregamento e entrega ao destinatário e, no hub, durante o descarregamento e carregamento dos pacotes.

No intuito de ilustrar como funciona uma operação logística do transporte rodoviário dentro de um armazém, na Figura 3, está representado o diagrama da estratégia operacional para atendimento das coletas e entregas das encomendas, tal diagrama se assemelha com a opinião de Mohammadzadeh et al. (2018) e Khalili-Damghani et al. (2017) que contribuem afirmando que as mercadorias devem entrar e imediatamente ser direcionada para a saída com custo mínimo de manuseio e armazenamento.

Figura 3 - Diagrama da estratégia operacional para coleta e entrega das encomendas



Fonte: O Autor.

onde REMETENTE: é a pessoa física ou jurídica que possui uma encomenda, e que deseja entregá-la ao destinatário;

ORIGEM: é uma unidade operacional responsável por realizar a coleta da encomenda no endereço do remetente e embarcá-la em direção ao hub;

ENCOMENDA, PACOTE, CAIXA ou MERCADORIA: é o bem que foi coletado no remetente e será entregue ao destinatário;

HUB: é uma unidade operacional responsável por realizar a consolidação das encomendas provenientes de outras unidades e embarcá-las aos seus respectivos destinos;

DESTINO: é uma unidade operacional responsável por realizar a entrega da encomenda no endereço do destinatário;

DESTINATÁRIO: é a pessoa física ou jurídica que receberá a encomenda que foi enviada pelo remetente;

COLETA: é a operação cujo o objetivo é apanhar a encomenda no endereço do remetente e deslocá-la em direção a unidade origem;

TRANSFERÊNCIA: é a operação cujo objetivo é transferir as encomendas de uma unidade para outra. Ex.: transferência de encomenda da Origem para o Hub, do Hub para o Destino ou da Origem para o Destino;

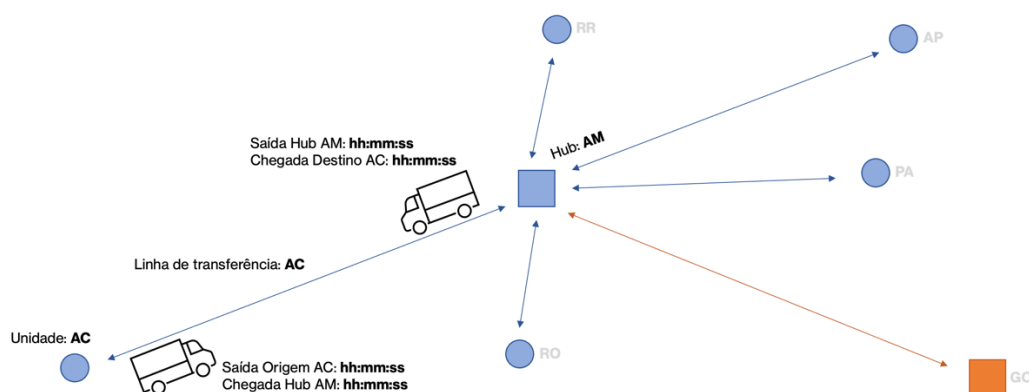
DESCARREGAMENTO DO VEÍCULO NO ARMAZÉM DO HUB: nessa operação, as encomendas são descarregadas e triadas de acordo com suas documentações e destinos;

CARREGAMENTO DO VEÍCULO NO ARMAZÉM DO HUB: nessa operação, as encomendas são carregadas de acordo com suas documentações;

ENTREGA: é a operação cujo objetivo é apanhar a encomenda na unidade destino e deslocá-la até o endereço do destinatário.

Segundo Novaes (2007), a operação ilustrada anteriormente possui um conceito de simples entendimento. Agentes realizam o processo de coleta das encomendas em diversos endereços onde estão localizados os Remetentes e deslocam-se em direção às unidades locais denominadas nesse projeto como sendo a Origem. Em seguida, essas encomendas são transferidas para uma unidade denominada Hub, conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama da estratégia operacional para transferência das encomendas entre unidades



Fonte: O Autor.

O hub é um tipo de unidade operacional que Rushton et al. (2014) afirma ser um centro de consolidação de encomendas, e para Richards (2018) é também um centro de triagem de encomendas. Além das características operacionais citadas, o hub é uma unidade estrategicamente pensada em todos os sentidos para proporcionar níveis de serviço satisfatórios aos seus clientes conforme afirma Kiani et al. (2020). Logo após a chegada do veículo nas instalações do hub, o mesmo é imediatamente direcionado para uma plataforma simultaneamente à preparação da área onde será descarregado. A equipe de operações viabiliza todos os recursos para iniciar a operação. Toda a operação é regida por um horário pré-definido tanto para a chegada do veículo na unidade quanto para a saída, o que pode ser visto na Figura 4.

2.2 CROSS-DOCKING EM UM OPERADOR LOGÍSTICO

Os centros de distribuição, em especial os grandes centros, operam com base em um método conhecido como *cross-docking*, que segundo Gelareh et al. (2020) e Konur e Golias (2017) é um método utilizado na logística onde o principal objetivo é minimizar ou zerar a armazenagem da carga, ou seja, os veículos estacionam nas docas de descarregamento, a carga é descarregada e separada e em seguida são direcionadas para o carregamento em outros veículos em direção a outra unidade operacional, seja ela seu destino final ou outra unidade hub.

Richards (2018), em concordância com Miao et al., (2019), afirma que o foco é aumentar o poder de entrega ao cliente final através do aumento da velocidade na cadeia de suprimentos. E Rushton et al. (2014) acrescenta que para que se possa lastrear essa estratégia

operacional, se faz necessário um planejamento de operações arrojado o que também se assemelha a opinião de Gaudioso et al. (2021).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 PROBLEMÁTICA DA PROGRAMAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

A problemática da programação dos carregamentos foi inicialmente estudada Cunha (2021) e Cunha e Moura (2022) e publicada no Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP nas edições de 2021 e 2022. Todo o conteúdo aqui exposto tem como lastro esses dois artigos publicados.

A Tabela 1, conforme Cunha (2021) e Cunha e Moura (2022), apresenta um exemplo de uma tabela de horários e contém a Origem, que será a unidade que carregará o veículo e o enviará ao destino, o qual é a unidade que receberá o veículo. O Horário Mínimo representa o menor horário para início do carregamento do veículo. O Horário Máximo evidencia o maior horário possível para a saída do veículo da origem. O Tipo de Veículo representa qual o tipo de veículo deverá ser contratado para executar aquela operação e é definido de acordo com a demanda da linha.

Por fim, a frequência em que essa operação se repetirá na unidade origem nos dias da semana. Para demonstrar a frequência utiliza-se uma marcação simples com a letra “X”, indicando que no referido dia haverá a operação. Nesta dissertação, o “X” será substituído pela quantidade de tempo necessário para se realizar o carregamento do veículo e os tempos de carregamento dos veículos serão considerados fixos. Evidentemente que esse tempo, em uma operação real, sofre interferências que o fazem variar, como por exemplo, o perfil da carga, as exigências de customização no sorteamento da carga, os equipamentos utilizados, a experiência dos colaboradores, a quantidade de espaço disponível assim como qualquer ocorrência envolvendo as variáveis inerentes ao processo.

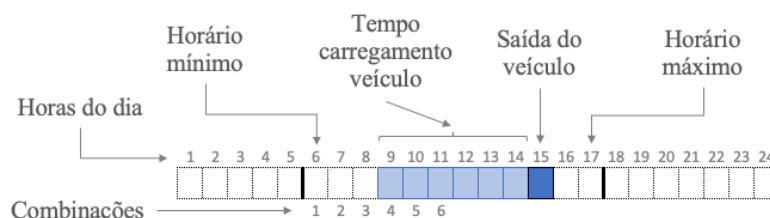
Tabela 1 - Horários de Linhas de Transferência do Norte e Nordeste

Origem	Destino	Horário		Tipo Veículo	Tempo de Carregamento por Dia						
		Mínimo	Máximo		Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab
REC	JPA	0:00	10:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
REC	JPA	15:00	20:00	Truck			4:00			4:00	
REC	MCZ	4:00	13:00	Truck	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00
REC	CPV	1:00	10:00	Carreta		8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
REC	NAT	9:00	20:00	Carreta	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00
REC	CAR	1:00	13:00	Carreta		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
REC	QBX	11:00	20:00	Truck	4:00		4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
REC	PNZ	1:00	11:00	Truck		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
REC	MVF	1:00	8:00	Truck		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	
REC	JDO	16:00	23:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	
REC	ITN	2:00	14:00	Carreta	6:00	6:00		6:00		6:00	
REC	AJU	10:00	20:00	Carreta		7:00	7:00		7:00	7:00	
REC	THE	6:00	13:00	Carreta		5:00		5:00		5:00	
REC	BEL	2:00	10:00	Carreta	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00
REC	AIR	1:00	7:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00

Fonte: O Autor.

Fazendo uso das informações contidas na Tabela 1, é possível representá-las na Figura 5 através de um Gráfico de Gantt, o que traz uma visualização bastante amigável e de fácil entendimento. Essa forma de representar a tabela de horários é amplamente utilizada por Pinedo (2016) e Brucker (2007) em suas obras, como recurso para claramente evidenciar o sequenciamento e simultaneidades entre tarefas assim como suas restrições. Na Figura 5, é apresentado um exemplo de como é a representação da programação de um veículo, suas restrições e seus componentes que foram detalhados anteriormente exceto as combinações, que por sua vez representam a quantidade de horários possíveis para o início do carregamento do veículo.

Figura 5 - Representação da programação com o Gráfico de Gantt



Fonte: O Autor.

Utilizando-se das informações contidas na Tabela 1 e aplicando-se a equação abaixo, que tem o objetivo de calcular a quantidade de horários possíveis dado os limites estabelecidos pelos horários mínimo e máximo e o tempo de carregamento para cada destino contido na programação da referida tabela. Busca-se com essa equação apenas identificar quantas combinações cada veículo/destino assumirá.

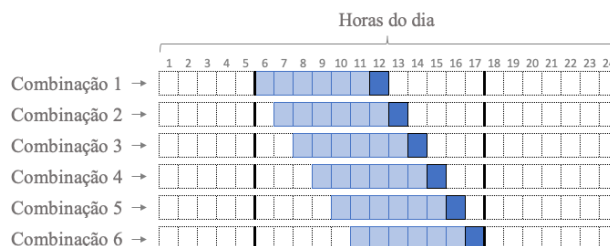
$$\text{Quantidade de horários} = \text{Horário máximo} - \text{Horário mínimo} - \text{Tempo carregamento veículo} + 1$$

Exemplo:

$$\text{Quantidade de horários} = 17 - 6 - 6 + 1 = 6$$

Mais uma vez utilizando-se da Figura 5, assim como o resultado do exemplo onde foi aplicada a equação sugerida, é possível identificar na Figura 6 a representação gráfica do que seriam as seis combinações. É notório que a diferença entre as combinações está no horário de início da operação assim como no horário da saída do veículo e os dois são limitados pelo horário mínimo e máximo respectivamente.

Figura 6 - Representação das combinações com o Gráfico de Gantt



Fonte: O Autor.

Aplicando a mesma equação, agora em todos os destinos contidos na Tabela 1, obtém-se o que está representado na Tabela 2, onde é possível visualizar a quantidade de combinações para todos os destinos em seus respectivos dias da semana. Para os casos onde não existem valores, não existe veículo programado na Tabela 1 para o referido destino e dia. Como por exemplo, não há veículo programado para sair de Recife-REC para o destino Campina Grande-CPV no Domingo, como por ser visto na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de combinações por veículo e dia da semana

Origem	Destino	Total de Combinações por Veículo e Dia						
		Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab
REC	JPA	7	7	7	7	7	7	7
REC	JPA			2			2	
REC	MCZ	4	4	4	4	4	4	4
REC	CPV		2	2	2	2	2	2
REC	NAT	5	5	5	5	5	5	5
REC	CAR		8	8	8	8	8	8
REC	QBX	6		6	6	6	6	6
REC	PNZ		6	6	6	6	6	6
REC	MVF		3	3	3	3	3	
REC	JDO	4	4	4	4	4	4	
REC	ITN	7	7		7		7	
REC	AJU		4	4	4	4	4	
REC	THE		3		3		3	
REC	BEL	3	3	3	3	3	3	3
REC	AIR	3	3	3	3	3	3	3

Fonte: O Autor.

Na Tabela 3, que é uma representação gráfica parcial da Tabela 1, o que se deseja demonstrar é como se torna visualmente mais intuitiva a programação com o gráfico de Gantt. No exemplo abaixo, adicionaram-se quatro linhas de transferência que partem da cidade de Recife (REC) para as cidades com destino a João Pessoa – JPA, Sobral – QBX, Belém – BEL e Arapiraca – AIR. Na tabela abaixo, diferentemente da Tabela 1, adicionou-se a “Hora Início da Operação” que representa o horário em que o carregamento do veículo se iniciará e o “Nº Combinação”, que especifica em qual combinação ou horário o veículo deverá iniciar o carregamento, tendo em vista que cada combinação representa um horário.

3.2 OS ALGORITMOS GENÉTICOS

Mediante conhecimento da problemática mencionada anteriormente, optou-se por um algoritmo largamente utilizado para problemas onde a alta quantidade de combinações inviabiliza a busca por uma solução ótima com os computadores atuais, de acordo com Pinedo (2009). Os Algoritmos Genéticos (AG) proposto por John H. Holland, Holland (1992), vem sendo utilizado em inúmeras áreas devido a sua eficiência em encontrar boas soluções, segundo Goldberg et al. (2016) e Wirsansky (2020), assim como Pinedo (2009) e Miao et al., (2019) que ainda acrescentam ser uma solução que se presume não estar longe da ideal.

Seguindo o procedimento funcional do algoritmo, define-se inicialmente o que Goldberg et al. (2016) chama de População de Partida, que representa uma solução viável para o problema. Na Figura 7, pode ser vista a representação de apenas um cromossomo ou solução inicial da semana para cada destino. Ainda na Figura 3, pode-se observar que cada número, denominado como gene dentro do algoritmo genético, representa uma combinação que será escolhida aleatoriamente e estará limitada à quantidade de combinações viáveis para o destino.

Figura 7 - Representação do cromossomo

Menor combinação	→	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maior combinação	→	4	2	5	6	9	8	6	6	4	4	5	5	2	4	3
Combinação escolhida no cromossomo	→	3	1	5	3	8	8	2	6	2	4	1	3	2	3	3
Destino	→	JPA	JPA	MCZ	CPV	NAT	CAR	QBX	PNZ	MVF	JDO	ITN	AUJ	THE	BEL	AIR

Fonte: O Autor.

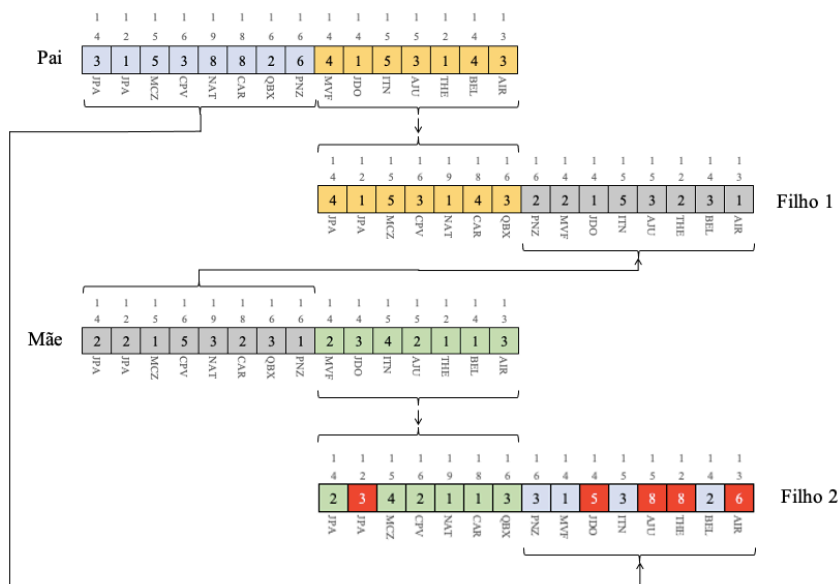
Logo após a solução inicial ser definida, o algoritmo executa a etapa de Cruzamento ou Crossover, segundo Goldberg et al. (2016). Nessa etapa, são combinados os genes de cada cromossomo Pai para formar sua prole. No problema aqui trabalhado, ao se realizarem os cruzamentos, encontram-se novas soluções que são frutos de novas combinações assumidas por cada destino ou linha de transferência, e que por consequência vão gerar suas respectivas necessidades de mão-de-obra, em cada horário, dentro dos turnos e dias da semana.

Após efetuarem-se os cruzamentos, obtém-se os cromossomos filhos, que também representam soluções para o problema. Logo após esse procedimento, avaliam-se as combinações assumidas em cada gene para verificar se obedeceu a restrição estabelecida. Conforme pode ser visto na Figura 8, o cruzamento do Pai com a Mãe deu origem aos Filhos 1 e 2. Na Figura 8, é também possível visualizar que a solução representada no Filho 1 é uma solução viável para o problema. No entanto, a solução do Filho 2 é inviável, porque as

combinações assumidas em alguns genes ultrapassaram as restrições de seus respectivos destinos.

Especificamente, a cidade de João Pessoa-JPA assumiu a combinação 3 e o limite é 2, Juazeiro do Norte-JDO assumiu a combinação 5 e o limite é 4, Aracajú-AJU assumiu 8 e o limite é 5, Teresina-THE assumiu 8 e o limite é 2 e, por fim, a cidade de Arapiraca-AIR que assumiu a combinação 6 e seu limite é 3. Logo, o cromossomo Filho 2 receberá uma nota alta, tornando-o uma solução de alto custo e, assim, ela não será selecionada dentre as soluções aptas a ser escolhida como possível solução ideal, visto que a função objetivo busca minimizar o custo com mão-de-obra através da redução das simultaneidades entre as operações de carregamento dos veículos.

Figura 8 - Representação do cruzamento de cromossomos



Fonte: O Autor.

Plotando o cromossomo Filho 2 representado na Figura 8, gerado do cruzamento dos cromossomos Pai e Mãe, no formato da programação, obtém-se a Tabela 7, onde é possível identificar exatamente o que foi descrito no parágrafo anterior, que demonstra que os genes das cidades João Pessoa-JPA, Juazeiro do Norte-JDO, Aracajú-AJU, Teresina-THE e Arapiraca-AIR assumiram um número de combinação que não obedece a restrição estabelecida e que faz com que todos eles ultrapassem a restrição de Horário Máximo para a Saída do veículo, ou seja, o carregamento de todos eles foram iniciados além do Horário Mínimo para início do carregamento. Logo, esse cromossomo produziu uma solução inviável para o modelo.

Tabela 7 - Representação do Filho 2 plotado na programação

Origem	Destino	Horário Mínimo	Horário Máximo	Tipo Veículo	Tempo Carregamento	CROMOSSOMO Filho 2	Sexta-feira																							Sábado					
							1º turno							2º turno							3º turno									1º turno					
REC	JPA	0:00	10:00	Truck	4:00	2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4
REC	JPA	15:00	20:00	Truck	4:00	3																													
REC	MCZ	4:00	13:00	Truck	6:00	4																													
REC	CPV	1:00	10:00	Carreta	8:00	2																													
REC	NAT	9:00	20:00	Carreta	7:00	1																													
REC	CAR	1:00	13:00	Carreta	5:00	1																													
REC	QBX	11:00	20:00	Truck	4:00	1																													
REC	PNZ	1:00	11:00	Truck	5:00	3																													
REC	MVF	1:00	8:00	Truck	5:00	1																													
REC	JDO	16:00	23:00	Truck	4:00	5																													
REC	ITN	2:00	14:00	Carreta	6:00	3																													
REC	AJU	10:00	20:00	Carreta	7:00	8																													
REC	THE	6:00	13:00	Carreta	5:00	8																													
REC	BEL	2:00	10:00	Carreta	6:00	2																													
REC	AIR	1:00	7:00	Truck	4:00	6																													
Total de veículos carregando por hora >							0	3	4	6	7	6	5	6	5	5	2	3	3	3	2	1	3	2	2	3	2	2	2	1	1	0	0	0	
Quantidade máxima de veículos carregando simultaneamente por turno >							7							5							3							1							

Fonte: O Autor.

Seguindo o procedimento natural do algoritmo, a fase subsequente avaliará se algum gene deverá ou não sofrer alguma mutação, e segundo Wirsansky (2020), essa etapa pode ser importante na evolução da espécie adicionando mudanças que podem resultar, eventualmente, em um avanço. Goldbarg et al. (2016) acrescentam ainda que nessa etapa estão envolvidos os seguintes elementos:

- 1) A seleção dos cromossomos a sofrer mutação;
- 2) A probabilidade de a mutação ocorrer;
- 3) O número de posições que sofrerão mutação no cromossomo. Especificando o que a etapa de mutação fará no problema em questão, ela poderá modificar ou não uma ou mais combinações em um ou mais cromossomos.

Logo em seguida, o cromossomo será avaliado mediante restrição do número máximo que poderá ser assumido em cada gene que representa um destino. Após a etapa de mutação, novas soluções são conhecidas e assim a população de cromossomos é atualizada e o ciclo se reinicia. Uma nova seleção é feita, novos cruzamentos e mutações são realizadas e a população é novamente atualizada até que se encontre o critério de parada do algoritmo, de acordo com Goldbarg et al. (2016).

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção do artigo formula um modelo matemático sugerido por Cunha (2021) para solução do problema de carregamento de veículos. Essa formulação será aplicada logo após a

geração da população inicial criada pelo algoritmo genético e fará a avaliação da viabilidade do cromossomo calculado.

Considerando a abordagem utilizada no entendimento do problema e em como o AG se apresenta como possível solucionador, a modelagem apresentada a seguir, evidencia o que se busca com cada equação desenvolvida. A equação 1 representa a Função Objetivo Z, que busca minimizar a quantidade de colaboradores que deverão ser contratados para operacionalizar os carregamentos dos veículos em seus respectivos turnos A_j , quando j varia de 1 a 3.

Z: somatório da quantidade de colaboradores necessários na semana

$$\min Z = \sum_{j=1}^3 A_j \quad (1)$$

A_j : quantidade máxima de colaboradores necessários no turno j ($j = 1, 2, 3$)

$$A_1 = \max(B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}, B_{17}) \quad (2)$$

$$A_2 = \max(B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, B_{25}, B_{26}, B_{27}) \quad (3)$$

$$A_3 = \max(B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{34}, B_{35}, B_{36}, B_{37}) \quad (4)$$

B_{jk} : quantidade máxima de veículos carregando no turno j e no dia k . ($j = 1, 2, 3$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

$$B_{jk} = \max_{1 \leq l \leq 8} C_{jkl} \quad (5)$$

C_{jkl} : somatório da quantidade de veículos carregando no turno j , no dia k e na hora l . ($j = 1, 2, 3$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$) ($l = 1, 2, 3, \dots, 8$)

$$C_{jkl} = \sum_{i=1}^{15} D_{ijkl} \quad (6)$$

D_{ijkl} : verificação se o veículo i está carregando no turno j , no dia k , na hora l . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($j = 1, 2, 3$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$) ($l = 1, 2, 3, \dots, 8$)

$D_{ijkl} \begin{cases} 0: \text{quando o veículo } i \text{ não estiver carregando no turno } j, \text{ no dia } k \text{ e na hora } l. \\ 1: \text{quando o veículo estiver carregando no horário } l. \end{cases}$

$$D_{ijkl} = E_{ik} + F_{ik} - l \quad (7)$$

Em que:

E_{ik} : horário inicial do carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

F_{ik} : tempo para carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

l : horário em verificação ($l = 1, 2, 3, \dots, 8$)

E_{ik} : horário inicial do carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

$$E_{ik} = LI + G_{ik} - 1 \quad (8)$$

Em que:

LI : horário mínimo para início do carregamento do veículo

G_{ik} : combinação escolhida para o veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

3.4 RESTRIÇÕES DO MODELO

Restrição 1:

A restrição número 1 especifica que D_{ijkl} assumirá o valor 0 (zero) quando a hora l for menor que o limite inferior LI , onde de fato não haverá carregamento. O LI é a restrição de horário mínimo para início do carregamento do veículo.

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall \quad l < LI \quad (9)$$

Em que:

LI : horário mínimo para início do carregamento do veículo

Restrição 2:

A restrição 2 evidencia que D_{ijkl} assumirá o valor 0 (zero) quando a hora l for maior ou igual ao limite superior LS . O LS é a restrição de horário máximo para a saída do veículo de forma a garantir o cumprimento da tabela de horários.

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall \quad l \geq LS \quad (10)$$

Em que:

LS : horário máximo para a saída do veículo

Restrição 3:

Em seguida, na restrição 3, D_{ijkl} assume o valor 0 (zero) quando seu resultado for menor ou igual a 0 (zero).

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall \quad D_{ijkl} \leq 0 \quad (11)$$

Restrição 4:

A restrição 4 por sua vez, especifica que D_{ijkl} deverá assumir o valor 0 (zero) quando o horário de início do carregamento for menor que o LI . Essa restrição garante que o horário mínimo seja obedecido.

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall E_{ik} < LI \quad (12)$$

Em que:

E_{ik} : horário inicial do carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

LI : horário mínimo para início do carregamento do veículo

Restrição 5:

Buscando ganhar velocidade na execução do algoritmo, a restrição 5 já especifica que D_{ijkl} deverá assumir o valor 0 (zero) se a hora em verificação l for menor que o horário de início do carregamento E_{ik} , ou seja, o algoritmo não precisará realizar todo o cálculo porque já está explícito que, se o horário que está sendo verificado for menor que o horário de início da operação, está garantido que nesse horário não haverá carregamento.

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall E_{ik} > l \quad (13)$$

Em que:

E_{ik} : horário inicial do carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

l : horário em verificação ($l = 1, 2, 3, \dots, 8$)

Restrição 6:

Na restrição 6, o LS , ou horário máximo subtraído do tempo de carregamento do veículo F_{ik} , resulta no horário limite para início do carregamento do veículo o que também é resultado da escolha da maior combinação para esse veículo. Quando o início do carregamento E_{ik} é maior, significa dizer que a restrição LS foi ultrapassada. Logo, D_{ijkl} deverá assumir o valor 0 (zero).

$$D_{ijkl} = 0 \quad \forall E_{ik} > (LS - F_{ik}) \quad (14)$$

Em que:

E_{ik} : horário inicial do carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

LS : horário máximo para a saída do veículo

F_{ik} : tempo para carregamento do veículo i no dia k . ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$) ($k = 1, 2, 3, \dots, 7$)

Restrição 7:

Uma vez executadas e obedecidas todas as restrições anteriores, a restrição 7 é executada e D_{ijkl} assume o valor 1 (um) quando seu resultado for maior que 0 (zero).

$$D_{ijkl} = 1 \quad \forall \quad D_{ijkl} > 0 \quad (15)$$

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

Tendo em vista a metodologia criada por Holand (1992) e a formulação matemática sugerida nesta dissertação, utilizou-se na etapa de cálculo o desenvolvimento do código no software Microsoft Excel, fazendo uso de fórmulas e programação em VBA – Visual Basic for Applications, ambos disponíveis nativamente no software. De igual modo, serão utilizadas imagens do próprio software para demonstrar os resultados encontrados.

As Tabelas 8, 9 e 10 representam de forma sequenciada como a Tabela 1 “Programação de carregamentos Norte e Nordeste” foi utilizada para que os cálculos fossem realizados e visivelmente os resultados fossem exibidos. É importante perceber que a coluna denominada “Combinação”, em cor laranja, representa o cromossomo. Uma vez que algum gene é alterado, imediatamente a representação com o Gráfico de Gantt é modificada dando visibilidade de fácil entendimento aos cálculos efetuados e, em seguida, aos resultados conhecidos.

Tabela 8 - Representação dos cálculos em Excel (dia: Domingo)

Origem	Destino	Horário Mínimo	Horário Máximo	Tipo Veículo	Combinação	Horário Início Carregamento	TEMPO CARREGAMENTO							Domingo																							
							D	S	T	Q	Q	S	S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
REC	JPA	0	10	Truck	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4																							
REC	JPA	15	20	Truck	1	15																															
REC	MCZ	4	13	Truck	1	4	6	6	6	6	6	6	6	6																							
REC	CPV	1	10	Carreta	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8																							
REC	NAT	9	20	Carreta	1	9	7	7	7	7	7	7	7	7																							
REC	CAR	1	13	Carreta	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5																							
REC	QBX	11	20	Truck	2	12	4																														
REC	PNZ	1	11	Truck	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5																							
REC	MVF	1	8	Truck	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5																							
REC	JDO	16	23	Truck	1	16	4	4	4	4	4	4	4	4																							
REC	ITN	2	14	Carreta	2	3	6	6																													
REC	AJU	10	20	Carreta	1	10	7	7	7	7	7	7	7	7																							
REC	THE	6	13	Carreta	3	8	5																														
REC	BEL	2	10	Carreta	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6																							
REC	AIR	1	7	Truck	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4																							
Máximo do turno >>>							1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
							3			3			1																								

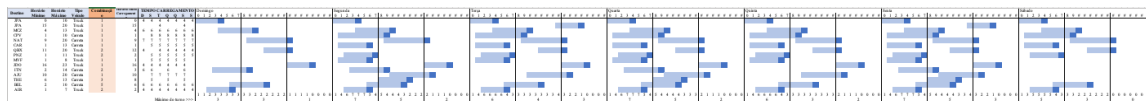
Fonte: O Autor.

Tabela 9 - Representação dos cálculos em Excel (dia: Domingo e Segunda)

Origem	Destino	Horário Mínimo	Horário Máximo	Tipo Veículo	Combinação	Horário Início Carregamento	TEMPO CARREGAMENTO																								Domingo																								Segunda																								Terça																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
							D	S	T	Q	Q	S	S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
REC	JPA	0	10	Truck	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

Fonte: O Autor.

Tabela 10 - Representação dos cálculos em Excel (Semana)



Fonte: O Autor.

Uma vez modificado o cromossomo, os cálculos são efetuados e o resultado é conhecido através da Tabela 11 demonstrada logo abaixo. No exemplo, vê-se um resultado com total a contratar igual a 15. É possível também verificar a quantidade necessária por dia da semana e turno.

Tabela 11 - Representação dos resultados em Excel (Semana)

MÁXIMO DOS TURNOS	D	S	T	Q	Q	S	S	
1 turno >>>	7	3	7	6	7	6	7	5
2 turno >>>	5	3	5	4	5	3	5	3
3 turno >>>	3	1	2	3	2	2	3	0
Contratar >>>	15	7	14	13	14	11	15	8

Fonte: O Autor.

4.2 RESULTADOS ENCONTRADOS

Fazendo uso do algoritmo genético definiu-se a quantidade máxima de cromossomos que se desejava simular e conhecer seus resultados. Sendo assim, definiram-se 1000 cromossomos como critério de parada do algoritmo genético divididos em gerações de 200 cromossomos, os quais podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado geral dos 1000 cromossomos

GERAÇÃO	QUANTIDADE DE CROMOSSOMOS	QUANTIDADE DE MUTAÇÕES	QUANTIDADE DE SOLUÇÕES VIÁVEIS	QUANTIDADE DE SOLUÇÕES INVIÁVEIS	MAIOR RESULTADO	MENOR RESULTADO
População inicial	200	77	200	0	22	19
Reprodução 1	200	61	99	101	20	19
Reprodução 2	200	99	183	17	20	18
Reprodução 3	200	45	5	195	19	14
Reprodução 4	200	52	42	158	18	14
TOTAL >>	1000	334	529	471	22	14

Fonte: O Autor.

Tendo calculado as 1000 possíveis soluções, conforme Tabela 12, o algoritmo encontrou 471 soluções inviáveis para o modelo assim como 529 viáveis, das quais os resultados foram colhidos. Os menores resultados podem ser vistos logo abaixo em forma de gráfico na Figura 9, onde é possível ver que o algoritmo converge para encontrar boas soluções.

Figura 9 - Resultados por Geração



Fonte: O Autor.

Considerando os 1000 cromossomos, independente se a solução foi viável ou não, na Tabela 13, todos os resultados e a quantidade total de cromossomos em cada um deles são demonstrados. É possível verificar que 82,3% das soluções estão concentradas entre 16 e 19 contratações; logo em seguida, o algoritmo gerou mais 62 soluções com resultado em 15 contratações e apenas 8 soluções com 14, e que por sinal foram todas viáveis, conforme pode ser visto ainda na Tabela 13.

Tabela 13 - Representatividade do resultado dos 1000 cromossomos

RESULTADOS ENCONTRADOS	QUANTIDADE DE CROMOSSOMOS	%
14	8	1%
15	62	6%
16	177	18%
17	257	26%
18	228	23%
19	161	16%
20	81	8%
21	25	3%
22	1	0%
TOTAL >>	1000	100%

Fonte: O Autor.

Considerando que foram gerados 1000 cromossomos, apenas 8 deles com 0,8% de representatividade geraram as melhores soluções do modelo; soluções essas que podem ser vistas na Tabela 14. Cada cromossomo citado abaixo possui uma solução viável dentro do

modelo e o melhor é que são soluções diferentes umas das outras e podem ser exploradas da melhor forma possível. Essas soluções diferentes são obtidas através das iterações realizadas pelo AG e avaliadas pelas equações e restrições sugeridas nessa dissertação.

Tabela 14 - Cromossomos com as melhores soluções do modelo

CROMOSSOMO														RESULTADO																									
														1 turno					2 turno					3 turno					TOTAL										
JPA	JPA	MCZ	CPV	NAT	CAR	QBX	PNZ	MVF	JDO	ITN	AJU	THE	BEL	AIR	D	S	T	Q	Q	S	S	MAX	D	S	T	Q	Q	S	S	MAX	D	S	T	Q	Q	S	S	MAX	
2	2	2	1	1	1	2	6	1	2	6	1	3	3	1	3	6	6	6	6	6	5	6	4	6	4	6	4	6	4	6	1	1	2	1	1	2	0	2	14
1	2	4	2	1	4	1	1	1	4	7	1	1	2	2	3	6	6	6	6	6	5	6	4	6	4	6	4	6	4	6	1	1	2	1	1	2	0	2	14
1	2	4	2	4	5	1	6	2	4	1	3	3	1	1	4	6	5	6	5	6	5	6	3	5	4	5	4	5	4	5	1	2	3	2	2	3	1	3	14
1	1	2	1	1	1	6	1	2	4	7	3	2	1	2	3	7	7	7	7	7	6	7	3	4	3	4	2	4	2	4	2	1	3	2	2	3	1	3	14
1	2	2	1	5	2	1	2	3	2	6	1	2	1	1	3	7	7	7	7	7	6	7	2	4	3	4	3	4	2	4	2	2	3	2	2	3	1	3	14
7	1	4	1	1	3	2	2	2	3	6	1	2	1	2	4	7	6	7	6	7	5	7	4	5	4	5	4	5	3	5	1	1	2	1	1	2	0	2	14
1	2	1	1	1	3	1	1	2	4	7	2	3	1	2	3	7	7	7	7	7	6	7	3	4	3	5	3	5	2	5	1	1	2	1	1	2	0	2	14
1	1	3	2	5	3	2	2	2	4	7	1	2	1	1	3	7	7	7	7	7	6	7	3	4	4	4	3	4	2	4	2	2	3	2	2	3	1	3	14

Fonte: O Autor.

No intuito de avaliar a qualidade ou diferenciar as 8 melhores soluções que obtiveram resultado de contratação de 14 pessoas, assumiu-se uma quantidade de pacotes por tipo de veículo para que se pudesse evidenciar o comportamento da demanda entre os dias, turnos e horários. Para o tipo de veículo denominado Carreta e Truck, assumiram-se 2000 e 1000 pacotes para carregar, respectivamente.

Na Tabela 15, estão a quantidade de pacotes a serem carregados nos dias e turnos, distribuídos de acordo com o horário sugerido pelo algoritmo para cada veículo. Nessa tabela, é possível identificar onde estão as concentrações de carregamento de pacotes dentre os dias e turnos das 8 melhores soluções do modelo. De igual modo, é também possível identificar a quantidade de pacotes distribuídas entres os turnos.

A demanda concentrada de pacotes, evidenciada pelo mapa de calor, implica diretamente na necessidade de mais recurso para operar essa demanda; isso significa que serão necessários mais pessoas, equipamentos e principalmente mais espaço dentro do armazém para que seja possível manusear os pacotes, ou seja, é um cenário desfavorável para a empresa.

Dentre as 8 soluções com resultado de 14 contratações, uma delas se destaca quando se compara a concentração de pacotes a carregar. O Cromossomo com final 1331, a primeira opção na Tabela 15, indica um equilíbrio mais coerente dentre as demandas distribuídas entre os turnos, 48% 1º turno, 45% 2º turno e 8% no 3º turno.

Tabela 15 - Quantidade de pacotes a carregar por dia e turno

Cromossomo: 222111261261331									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	58.063	4.166	9.316	8.983	9.316	8.983	9.316	7.983	48%
2 turno >>>	54.498	5.834	9.396	6.729	10.396	6.729	10.396	5.018	45%
3 turno >>>	9.430	1.000	1.286	2.286	1.286	1.286	2.286	-	8%
Total >>>	121.991	11.000	19.998	17.998	20.998	16.998	21.998	13.001	
Cromossomo: 124214111471122									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	58.824	3.832	9.732	8.932	9.732	8.932	9.732	7.932	48%
2 turno >>>	53.729	6.168	8.979	6.779	9.979	6.779	9.979	5.066	44%
3 turno >>>	9.430	1.000	1.286	2.286	1.286	1.286	2.286	-	8%
Total >>>	121.983	11.000	19.997	17.997	20.997	16.997	21.997	12.998	
Cromossomo: 124245162413311									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	60.767	6.168	10.268	8.265	10.268	8.265	10.268	7.265	50%
2 turno >>>	42.951	2.978	7.019	6.019	8.019	6.019	8.019	4.878	35%
3 turno >>>	18.281	1.858	2.713	3.713	2.713	2.713	3.713	858	15%
Total >>>	121.999	11.004	20.000	17.997	21.000	16.997	22.000	13.001	
Cromossomo: 112111612473212									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	66.193	4.499	10.649	10.249	10.649	10.249	10.649	9.249	54%
2 turno >>>	38.013	4.501	7.493	4.141	7.493	3.891	7.743	2.751	31%
3 turno >>>	17.790	2.000	1.858	3.608	2.858	2.858	3.608	1.000	15%
Total >>>	121.996	11.000	20.000	17.998	21.000	16.998	22.000	13.000	
Cromossomo: 122152123261211									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	67.525	4.832	10.982	10.249	10.982	10.249	10.982	9.249	55%
2 turno >>>	37.036	4.024	6.587	4.321	7.587	4.321	7.587	2.609	30%
3 turno >>>	17.433	2.144	2.429	3.429	2.429	2.429	3.429	1.144	14%
Total >>>	121.994	11.000	19.998	17.999	20.998	16.999	21.998	13.002	
Cromossomo: 714113222361212									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	61.687	3.998	10.148	9.415	10.148	9.415	10.148	8.415	51%
2 turno >>>	51.363	6.002	8.562	6.546	9.562	6.296	9.812	4.583	42%
3 turno >>>	8.930	1.000	1.286	2.036	1.286	1.286	2.036	-	7%
Total >>>	121.980	11.000	19.996	17.997	20.996	16.997	21.996	12.998	
Cromossomo: 121113112472312									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	66.162	4.666	10.416	10.416	10.416	10.416	10.416	9.416	54%
2 turno >>>	44.975	5.334	8.012	5.010	9.012	5.010	9.012	3.585	37%
3 turno >>>	10.860	1.000	1.572	2.572	1.572	1.572	2.572	-	9%
Total >>>	121.997	11.000	20.000	17.998	21.000	16.998	22.000	13.001	
Cromossomo: 113253222471211									
TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
1 turno >>>	63.524	4.332	10.232	9.832	10.232	9.832	10.232	8.832	52%
2 turno >>>	41.538	4.524	7.338	4.987	8.338	4.737	8.588	3.026	34%
3 turno >>>	16.933	2.144	2.429	3.179	2.429	2.429	3.179	1.144	14%
Total >>>	121.995	11.000	19.999	17.998	20.999	16.998	21.999	13.002	

Fonte: O Autor.

Comparando um exemplar dentre as menores soluções apresentadas na Tabela 13 e analisando-se a Tabela 15, é possível identificar que quanto mais pessoas, maior é a concentração de processamento dos pacotes dentro do armazém. O pico de concentração identificado no cromossomo com final 1331 é 10396, no cromossomo 2123 sobe para 11100 e o cromossomo 3333 sobe 9,80% e alcança 11415 pacotes no primeiro turno dos dias Segunda, Quarta e Sexta-feira.

Tabela 16 - Cromossomos com as melhores soluções do modelo

RESULTADO	Cromossomo: 222111261261331									
14	TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
	1 turno >>>	58.063	4.166	9.316	8.983	9.316	8.983	9.316	7.983	48%
	2 turno >>>	54.498	5.834	9.396	6.729	10.396	6.729	10.396	5.018	45%
	3 turno >>>	9.430	1.000	1.286	2.286	1.286	1.286	2.286	-	8%
	Total >>>	121.991	11.000	19.998	17.998	20.998	16.998	21.998	13.001	
RESULTADO	Cromossomo: 113215153212123									
18	TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
	1 turno >>>	63.197	6.000	11.100	8.299	11.100	8.299	11.100	7.299	52%
	2 turno >>>	48.430	4.000	7.326	7.376	8.326	7.126	8.576	5.700	40%
	3 turno >>>	10.360	1.000	1.572	2.322	1.572	2.322	-	-	8%
	Total >>>	121.987	11.000	19.998	17.997	20.998	16.997	21.998	12.999	
RESULTADO	Cromossomo: 421123313123333									
19	TOTAL DE PACOTES	D	S	T	Q	Q	S	S		
	1 turno >>>	68.160	5.665	11.415	9.750	11.415	9.750	11.415	8.750	56%
	2 turno >>>	38.044	3.799	6.439	4.856	7.189	4.856	7.189	3.716	31%
	3 turno >>>	15.787	1.536	2.143	3.393	2.393	3.393	3.393	536	13%
	Total >>>	121.991	11.000	19.997	17.999	20.997	16.999	21.997	13.002	

Fonte: O Autor.

4.3 RESULTADO DO HORÁRIO DO CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS

Por fim e não menos importante, a Tabela 17 é um complemento da Tabela 1 “Programação de carregamentos Norte e Nordeste”, contendo as informações ou definições encontradas pelo AG e para o qual foi construído, que era identificar qual o horário de saída de cada veículo, em lilás, para que todas as restrições fossem obedecidas e ao menor custo possível, considerando as premissas da meta-heurística, que não garante o ótimo mas encontra boas soluções.

Tabela 17 - Definição dos horários dos carregamentos dos veículos

Origem	Destino	Horário	Horário	Tipo Veículo	Tempo de Carregamento por Dia							Cromossomo	Horário para início do carregamento do veículo	Horário da saída do veículo	
		Mínimo	Máximo		Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab				
REC	JPA	0:00	10:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	2		01:00	05:00
REC	JPA	15:00	20:00	Truck			4:00				4:00	2		16:00	20:00
REC	MCZ	4:00	13:00	Truck	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	2		05:00	11:00
REC	CPV	1:00	10:00	Carreta		8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	1		01:00	09:00
REC	NAT	9:00	20:00	Carreta	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	1		09:00	16:00
REC	CAR	1:00	13:00	Carreta		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	1		01:00	06:00
REC	QBX	11:00	20:00	Truck	4:00		4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	2		12:00	16:00
REC	PNZ	1:00	11:00	Truck		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00	6		06:00	11:00
REC	MVF	1:00	8:00	Truck		5:00	5:00	5:00	5:00	5:00		1		01:00	06:00
REC	JDO	16:00	23:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00		2		17:00	21:00
REC	ITN	2:00	14:00	Carreta	6:00	6:00		6:00		6:00		6		07:00	13:00
REC	AJU	10:00	20:00	Carreta		7:00	7:00	7:00	7:00	7:00		1		10:00	17:00
REC	THE	6:00	13:00	Carreta		5:00		5:00		5:00		3		08:00	13:00
REC	BEL	2:00	10:00	Carreta	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	3		04:00	10:00
REC	AIR	1:00	7:00	Truck	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	1		01:00	05:00

Fonte: O Autor.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação evidenciou a problemática da programação de carregamento de veículos que é um desafio para qualquer operador logístico com terminais de carga regidos por um Cross-docking e que possuem linhas de transferência contidas em uma tabela de horários que inicialmente é instituída considerando alinhamentos com outros centros de distribuição. Sendo assim, tendo identificado uma oportunidade de redução de custos, objetivou-se a construção deste estudo, de modo que uma solução matemática fosse modelada e inicialmente calculada em Excel para posteriormente migrar para uma aplicação mais robusta e de performance à altura do desafio aqui estudado.

O modelo proposto tende a resultar nos seguintes impactos:

- Redução de custo operacional com a contratação correta da quantidade de funcionários;
- Aumento da eficiência e produtividade com a redução dos atrasos na contratação de veículos;
- Possibilidade de discussão da programação no horizonte semanal e com antecedência envolvendo todas as pessoas necessárias;
- Possibilidade de ajustar as restrições da programação junto as unidades em que os veículos são enviados;
- Possibilidade de negociação antecipada com frotistas para garantir a programação e barganhar de preço;
- Satisfação de clientes e fornecedores;
- Possibilidade de montar orçamento mensal ou em outro período que a empresa desejar mediante assertividade da programação.

O modelo em questão limitou-se especificamente em modificar os horários dos veículos sem levar em consideração como e onde alocar cada funcionário ou em qual horário as encomendas chegariam para assim iniciarem os carregamentos. Essa última limitação por padrão já é assumida como nula devido ao estabelecimento dos horários que são mandatórios para a execução das operações, o que obriga os gestores a aproveitar a janela de horário de cada veículo mediante a programação sugerida pelo modelo.

Limitou-se também a calcular apenas 1000 iterações no Excel, onde no Python essa quantidade subiria bastante por ser uma linguagem de programação preparada para processar grandes quantidades de cálculo e isso pode evidenciar outras soluções ainda não conhecidas, e com isso existe a expectativa de que surjam soluções ainda melhores.

Tendo em vista que o modelo demonstra ser eficaz para solucionar o problema, pretende-se seguir em frente para um desenvolvimento mais robusto envolvendo a entrada dos pacotes no armazém até a sua saída no carregamento, além de contribuir com o fluxo constante entre as unidades operacionais. Além do desafio da programação dos carregamentos, um outro desafio é alocar as equipes que carregarão os veículos aqui programados, tendo como objetivo garantir a saída dos veículos dentro do estabelecido e que a alocação balanceie a carga de trabalho entre as equipes. Um outro desafio é aplicar a metodologia aqui proposta nessa dissertação para a programação dos descarregamentos dos veículos, que também exige tanto ou mais dos gestores operacionais para garantir o fluxo permanente e o mínimo ou zero de permanência da carga dentro do terminal logístico.

REFERÊNCIAS

- BARSING, P., DAULANI, Y., VAIDYA, O. S., & KUMAR, S. (2018). Cross-docking centre location in a supply chain network: A social network analysis approach. **Global Business Review**, 19(3_suppl), S218-S234.
- BRUCKER, M. L. (2007). *Scheduling Algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., & GENDRON, B. (Eds.). (2021). *Network Design with Applications to Transportation and Logistics*. Springer.
- COSTA, Mariana. **Com pandemia, vendas pela internet crescem 27% e atingem R\$ 161 bi em2021**. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2022/02/02/internas_economia,1342064/com-pandemia-vendas-pela-internet-crescem-27-e-atingem-r-161-bi-em-2021.shtml> Acesso em: 04 de julho 2022.
- CUNHA, Reginaldo. (2021). Modelo de algoritmo genético para o problema da programação de carregamento de veículos. XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP
- CUNHA, Reginaldo. MOURA, Márcio. (2022). Algoritmo Genético: um estudo de caso do problema da programação de carregamento de veículos. XLII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP
- GAUDIOSO, M., MONACO, M. F., SAMMARRA, M. (2021). A Lagrangian heuristics for the truck scheduling problem in multi-door, multi-product Cross-Docking with constant processing time. *Omega*, v. 101, p. 102255.
- GELAREH, S., GLOVER, F., GUEMRI, O., HANAFI, S., NDUWAYO, P., & TODOSIJEVIC, R. (2020). A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem. *Omega*, 91, 102015.
- GOLDBARG, M. C., GOLDBARG E. G. e LUNA, H. P. L. (2016). *Otimização Combinatória e Meta-heurísticas: Algoritmos e Aplicações*, Rio de Janeiro.
- HAMDI, I., & TEKAYA, M. F. (2020). A genetic algorithm to minimize the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem. *Journal of the Operations Research Society of China*, 8(3), 457-476.
- HILL, Napoleon. *A lei do triunfo*. Editora José Olympio, 2015.
- HOLAND, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. MIT Press Edition, Massachusetts.
- KARIMI-MAMAGHAN, M., MOHAMMADI, M., PIRAYESH, A., KARIMI-MAMAGHAN, A. M., & Irani, H. (2020). Hub-and-spoke network design under congestion: A learning based metaheuristic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102069.

- KHALILI-DAMGHANI, K., TAVANA, M., SANTOS-ARTEAGA, F. J., & GHANBARZAD-DASHTI, M. (2017). A customized genetic algorithm for solving multi-period cross-dock truck scheduling problems. *Measurement*, 108, 101-118.
- KIANI MAVI, R., GOH, M., KIANI MAVI, N., JIE, F., BROWN, K., BIERMANN, S., & A KHANFAR, A. (2020). Cross-docking: a systematic literature review. *Sustainability*, 12(11), 4789.
- KONUR, D., & GOLIAS, M. M. (2017). Loading time flexibility in cross-docking systems. *Procedia Computer Science*, 114, 491-498.
- MIAO, Z., ZHANG, J., LAN, Y., & Su, R. (2019). A Two-Stage Genetic Algorithm for the Truck-Door Assignment Problem with Limited Capacity Vehicles and Storage Area. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 28(3), 285–298.
- MOHAMMADZADEH, H., SAHEBJAMNIA, N., FATHOLLAHI-FARD, A. M., & HAJIAGHAEI-KESHTLI, M. (2018) New approaches in metaheuristics to solve the truck scheduling problem in a cross-docking center. *International Journal of Engineering*, v. 31, n. 8, p. 1258-1266.
- NOVAES, A. G. (2007) *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. 11. Re. Rio de Janeiro: Elsevier.
- PINEDO, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer Science, New York.
- PINEDO, M. L. (2009). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer Science, New York.
- RICHARDS, G. (2018). *Warehouse management: a complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse*. Kogan Page, New York.
- RUCHTON, A., CROUCHER P. e BAKER P. (2014). *The handbook of logistics and distribution management: understanding the supply chain*. Kogan Page, Philadelphia.
- WIRSANSKY, E. (2020). *Hands-On Genetic Algorithms with Python: Applying genetic algorithms to solve real-world deep learning and artificial intelligence problems*. Packt Publishing, Birmingham.