

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE- FURG
CURSO DE GESTÃO EM OPERAÇÕES E LOGÍSTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**NOME COMPLETO: WAGNER COSTA VENTURINI
TÍTULO: MODELAGEM MATEMÁTICA E LOGÍSTICA MILITAR:
OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SUPRIMENTOS PARA O
GRUPAMENTO OPERATIVO DE FUZILEIROS NAVAIS**

PÓS-GRADUAÇÃO *LATO SENSU*

**RIO DE JANEIRO, RJ
2023**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO E APROVAÇÃO

AUTOR: WAGNER COSTA VENTURINI

TÍTULO: MODELAGEM MATEMÁTICA E LOGÍSTICA MILITAR: OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SUPRIMENTOS PARA O GRUPAMENTO OPERATIVO DE FUZILEIROS NAVAIS

Autorizo que o presente artigo científico apresentado ao Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* da FURG, como requisito parcial para obtenção do certificado de Especialista em Gestão de Operações e Logística, e aprovado pelos professores responsáveis pela orientação e sua aprovação, seja utilizado para pesquisas acadêmicas de outros participantes deste ou de outros cursos, a fim de aprimorar o ambiente acadêmico e a discussão entorno das temáticas aqui propostas.

TÍTULO: MODELAGEM MATEMÁTICA E LOGÍSTICA MILITAR: OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SUPRIMENTOS PARA O GRUPAMENTO OPERATIVO DE FUZILEIROS NAVAIS

AUTOR: WAGNER COSTA VENTURINI

ORIENTADOR: PROF^a. DR^a. CATIA MARIA DOS SANTOS MACHADO

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo matemático baseado em grafos para otimizar o transporte de suprimentos em operações terrestres durante conflitos armados, com ênfase no Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav). O objetivo principal é aprimorar a eficiência da logística militar, minimizando os custos logísticos associados ao transporte de suprimentos desde os nós de origem até os nós de destino. O modelo utiliza técnicas de programação linear, em particular o método simplex especializado para redes com particionamento primal. Para validar o modelo, é apresentada uma rede com super nós representando os veículos, e o problema é resolvido por meio do método simplex em uma planilha eletrônica. Embora reconheçamos as limitações e simplificações inerentes ao modelo proposto, ele serve como uma aproximação inicial para abordar a complexidade da logística militar em cenários de combate. O estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento na área de logística militar, oferecendo subsídios para a tomada de decisões relacionadas ao abastecimento de suprimentos nas operações de combate do Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem matemática, Logística militar, Otimização de transporte, Grafos, Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais.

MODELAGEM MATEMÁTICA E LOGÍSTICA MILITAR: OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE SUPRIMENTOS PARA O GRUPAMENTO OPERATIVO DE FUZILEIROS NAVAIS

Wagner Costa Venturini¹

Declaro que sou autor(a)¹ deste Trabalho de Conclusão de Curso. Declaro também que o mesmo foi por mim elaborado e integralmente redigido, não tendo sido copiado ou extraído, seja parcial ou integralmente, de forma ilícita de nenhuma fonte além daquelas públicas consultadas e corretamente referenciadas ao longo do trabalho ou daqueles cujos dados resultaram de investigações empíricas por mim realizadas para fins de produção deste trabalho.

Assim, declaro, demonstrando minha plena consciência dos seus efeitos civis, penais e administrativos, e assumindo total responsabilidade caso se configure o crime de plágio ou violação aos direitos autorais. (Consulte a 3ª Cláusula, § 4º, do Contrato de Prestação de Serviços).

RESUMO - Este trabalho apresenta um modelo matemático baseado em grafos para otimizar o transporte de suprimentos em operações terrestres durante conflitos armados, com ênfase no Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav). O objetivo principal é aprimorar a eficiência da logística militar, minimizando os custos logísticos associados ao transporte de suprimentos desde os nós de origem até os nós de destino. O modelo utiliza técnicas de programação linear, em particular o método simplex especializado para redes com particionamento primal. Para validar o modelo, é apresentada uma rede com super nós representando os veículos, e o problema é resolvido por meio do método simplex em uma planilha eletrônica. Embora reconheçamos as limitações e simplificações inerentes ao modelo proposto, ele serve como uma aproximação inicial para abordar a complexidade da logística militar em cenários de combate. O estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento na área de logística militar, oferecendo subsídios para a tomada de decisões relacionadas ao abastecimento de suprimentos nas operações de combate do Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem matemática, Logística militar, Otimização de transporte, Grafos, Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais.

¹ wagner.c.venturini@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Garantindo a obtenção e distribuição eficiente de recursos essenciais para as Forças Armadas, a logística militar possui grande relevância quanto ao suporte em relação às operações em um contexto de conflito armado. Em operações terrestres, como as realizadas pelos Grupamentos Operativos de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav), a logística desempenha um papel crucial na sustentação das capacidades de combate das unidades em primeiro escalão.

Nesse sentido, pode-se afirmar que o Apoio de Serviços ao Combate (ApSvCmb) exerce uma função especializada na logística militar, fornecendo o suporte necessário para manter as forças em condições de combate. O ApSvCmb abrange uma ampla gama de serviços essenciais, como abastecimento, saúde, transporte, manutenção de campanha, entre outros. Garantir o fornecimento oportuno e adequado desses serviços é fundamental para o sucesso das operações terrestres dos GptOpFuzNav.

No entanto, a logística em um ambiente operacional complexo apresenta desafios significativos, entre eles a necessidade de coordenar o abastecimento de suprimentos em diferentes locais e momentos, considerando as demandas específicas de cada componente do GptOpFuzNav. Além disso, é necessário otimizar o transporte desses suprimentos, levando em consideração a capacidade dos veículos bem como outras restrições logísticas que precisam ser consideradas.

Diante desse contexto, surge a necessidade de desenvolver modelos matemáticos e estratégias eficientes para otimizar o abastecimento de suprimentos em operações terrestres dos GptOpFuzNav. Esses modelos podem fornecer insights valiosos para a tomada de decisões estratégicas, permitindo um uso mais eficiente dos recursos disponíveis e melhorando o desempenho da logística no campo de batalha.

Assim, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a elaboração de um modelo matemático que represente o processo de abastecimento de suprimentos das Instalações de Logística Sumária (ILS) dos Batalhões de Infantaria de Fuzileiros Navais (BtlInfFuzNav) pelo Componente de Apoio de Serviços ao Combate (CASC). O foco do modelo é otimizar o transporte de suprimentos da Área de Apoio de Serviços ao Combate (AapSvCmb) até as ILS, minimizando os custos logísticos envolvidos.

Para atingir esse objetivo, uma modelagem matemática baseada em grafos será realizada, também a técnica de otimização que soluciona o modelo levando em consideração as demandas de cada BtlInfFuzNav, a capacidade dos veículos disponíveis e as restrições logísticas existentes será mostrada.

É importante salientar que a Teoria dos Grafos oferece ferramentas concretas, pois a partir de um modelo que representa parte do problema real da logística militar, uma técnica de solução é utilizada, e a melhor solução possível referente ao modelo é encontrada. Assim, o modelo determina a quantidade ideal de suprimentos a ser embarcada em cada veículo, de forma a minimizar os custos logísticos e garantir o fornecimento adequado dos suprimentos necessários para o sucesso das operações terrestres.

Além disso, este estudo visa contribuir para o avanço do conhecimento na área de logística militar, fornecendo subsídios para o aprimoramento das práticas operacionais e estratégicas nas operações terrestres dos GptOpFuzNav. Ao desenvolver um modelo matemático baseado em grafos, que representa parte da realidade complexa das operações de combate, é possível contribuir para a eficiência operacional e a tomada de decisões mais informadas no campo da logística militar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais

Os Grupamentos Operativos de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav) representam uma forma estruturada de organização das tropas de Fuzileiros Navais com o propósito de cumprir missões específicas. Essa abordagem organizacional é fundamentada no conceito de componentes, que agrupam elementos constituintes de acordo com a natureza de suas atividades, proporcionando flexibilidade na escolha da estrutura mais adequada para alcançar os objetivos atribuídos.

De acordo com o CGCFN-0-1 – Manual Básico Dos Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais (2020) a estrutura básica dos GptOpFuzNav é composta pelos seguintes componentes: Componente de Comando (CCmdo), Componente de Combate Terrestre (CCT), Componente de Apoio de Serviços ao Combate (CASC) e Componente de Combate Aéreo (CCA). Cada componente é liderado por um comando responsável por suas atividades específicas.

O Componente de Comando (CCmdo) é representado pelo Comandante do GptOpFuzNav e seu Estado-Maior (EM) Geral e Especial. O CCmdo também inclui destacamentos que executam tarefas específicas de comando e controle em apoio ao Comando do GptOpFuzNav. O Comandante do GptOpFuzNav exerce o papel de Comandante do CCmdo e é responsável pelas conexões externas com o Comando Superior, Forças Amigas e agências não militares.

O Componente de Combate Terrestre (CCT) centraliza os meios de combate e apoio de combate necessários para a conquista e manutenção do terreno, além do controle de áreas terrestres. Sua estrutura logística é mínima, focada exclusivamente no suporte às capacidades de combate. O Componente de Apoio de Serviços ao Combate (CASC) é responsável por fornecer o apoio logístico necessário para sustentar o CCT.

O Componente de Combate Aéreo (CCA) assume a responsabilidade pelo emprego e coordenação dos meios de apoio aéreo, controle aero-tático e defesa aérea do GptOpFuzNav como um todo. O CCA também desempenha o planejamento do emprego de todos os meios de aviação e exerce o controle sobre as aeronaves atribuídas por outros comandos.

O Componente de Apoio de Serviços ao Combate (CASC) é encarregado de prover o apoio logístico necessário ao GptOpFuzNav, exceto pelas atividades específicas de aviação. O CASC desempenha funções logísticas essenciais para a operacionalidade do GptOpFuzNav, garantindo que cada componente tenha as condições necessárias para realizar suas atividades.

A utilização de tropas de Fuzileiros Navais organizadas como GptOpFuzNav ocorre quando a escala, complexidade ou ênfase das tarefas demandam a unificação dos elementos constituintes sob um único comando. Essa modalidade de organização é válida em qualquer ambiente ou nível de intensidade de conflito, ficando a critério da autoridade responsável pelo emprego das tropas decidir pela ativação ou não de um GptOpFuzNav.

O objetivo principal do conceito de GptOpFuzNav é aliviar o Comandante das sobrecargas decorrentes da complexidade das atividades de manobra terrestre, apoio logístico e controle do espaço aéreo sob sua responsabilidade. Ademais, busca-se facilitar a coordenação e o controle da força, com o intuito de aumentar a eficiência operacional. Cada área de atuação, como comando e controle, manobra terrestre, espaço aéreo e logística, é liderada por um Comandante designado, responsável pelo

planejamento, coordenação e controle das ações de acordo com o plano do GptOpFuzNav.

O Comandante do GptOpFuzNav concentra-se na coordenação geral das ações, interagindo com os comandos superiores envolvidos na missão e mantendo constante acompanhamento da situação nos níveis operacional e tático, levando em consideração possíveis empregos futuros da força.

Deste modo, os Grupamentos Operativos de Fuzileiros Navais constituem estruturas organizacionais flexíveis e adaptáveis, que possibilitam a concentração de esforços e a coordenação eficiente das operações dos Fuzileiros Navais em diversos ambientes operacionais. Essa forma de organização visa maximizar a eficácia da força e facilitar o cumprimento das missões atribuídas, levando em consideração a complexidade e o ambiente específico no qual as tropas estão inseridas.

2.2 Logística E Apoio De Serviços Ao Combate Em Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais

A logística militar no que diz respeito as operações dos Grupamentos Operativos de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav), é compreendida como a logística responsável pela obtenção e distribuição de recursos de pessoal, material e serviços para atender às necessidades das Forças Armadas durante as operações de guerra. Em particular, o Apoio de Serviços ao Combate (ApSvCmb) é uma função especializada da logística militar, cujo objetivo é fornecer o suporte necessário para manter a Força em condições de combate.

A logística e Apoio de Serviços ao Combate (ApSvCmb) tem responsabilidade sobre os serviços essenciais, como abastecimento, saúde, transporte, manutenção de campanha, entre outros. Sua importância consiste no cumprimento da missão dos GptOpFuzNav, fornecendo apoio direto às operações em condições de combate. Enquanto o planejamento logístico geral concentra-se no desenvolvimento de meios próprios e na determinação das necessidades de apoio externo antes e depois das operações, o planejamento específico do ApSvCmb lida com as organizações, tarefas e responsabilidades de apoio interno à Força. Assim, o planejamento do ApSvCmb é uma parte integrante do planejamento logístico, voltado para garantir o apoio necessário para o combate, enquanto o planejamento logístico abrange aspectos externos relacionados ao desdobramento da Força.

Um dos desafios enfrentados na logística militar é o problema que consiste em fornecer os meios e recursos necessários, em termos de quantidade, qualidade, momento e localização adequados, conforme exigido pelo plano de operações. A resolução desse problema demanda um esforço logístico, envolvendo a definição e execução da solução. Nesse sentido, é fundamental investir em estudos de modelos matemáticos que se aproximam da modelagem de problemas reais logísticos militares. O estudo de modelos matemáticos e técnicas de solução permitem o desenvolvimento da capacidade de pensar estrategicamente, da capacidade de equacionar soluções e principalmente do desenvolvimento da capacidade de introduzir modificações necessárias em função de novas demandas e maior eficácia na operacionalização sobre as atividades logísticas desempenhadas dentro do Corpo dos Fuzileiros Navais.

A estrutura do ApSvCmb é composta por instalações de apoio e recursos logísticos operados por elementos especializados, provenientes das diversas unidades da Força de Fuzileiros da Esquadra (FFE). Esses elementos são organizados para fornecer apoio a partir de uma Área de Apoio Logístico (AApL). Existem quatro tipos de AApL, dependendo das circunstâncias e da natureza da operação: Área de Apoio de Praia (AApP), Área de Apoio de Zona de Desembarque (AApZDbq), Área de Apoio de Serviços ao Combate (AApSvCmb) e Instalação Logística Sumária (ILS).

A AApP é estabelecida próxima à Praia de Desembarque (PDbq) e é operada pelo Destacamento de Praia (DP). Ela possui instalações para o desembarque de tropas e material, além de oferecer apoio às Forças em terra. A AApZDbq, por sua vez, é organizada com um número mínimo de instalações e tem como finalidade apoiar os elementos de assalto desembarcados por helicópteros.

Já a AApSvCmb consiste em uma área em terra que abriga suprimentos, equipamentos, instalações e pessoal necessários ao ApSvCmb da Força durante a operação, podendo ser desenvolvida a partir da AApP. Por fim, a ILS é composta por recursos organizados em bases mínimas nos níveis de Unidade e Subunidade, visando garantir apoio contínuo e preservar a mobilidade.

2.2.1 Funções Logísticas

Nesta seção, abordaremos as principais funções logísticas adotadas na Marinha do Brasil, as quais são fundamentais para o apoio às operações militares dos Grupamentos Operativos de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav). Cada função é composta por atividades específicas que visam garantir o pleno funcionamento e a eficácia das operações. As funções logísticas explicitadas no CGCFN-33 – Manual De Operações Do Componente De Apoio De Serviços Ao Combate Dos Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais (2008), são as seguintes:

2.2.1.1 Abastecimento

A função de Abastecimento consiste em prever e prover, para os GptOpFuzNav e seus componentes, os materiais necessários para manter a eficiência das unidades militares. Os suprimentos englobam uma ampla variedade de itens, incluindo comestíveis, água potável, fardamentos, equipamentos, armamentos, munições, combustíveis, sobressalentes e máquinas. Esses suprimentos são classificados de acordo com sua natureza, essencialidade e emprego operativo.

Segundo à natureza, são classificados por símbolos de jurisdição (SJ) que agrupam suprimentos de mesma natureza e aplicação, como o SJ OSCAR para o material específico do Corpo de Fuzileiros Navais (CFN).

Em relação à essencialidade, os suprimentos são classificados como ordinários, extraordinários ou controlados/regulados, dependendo de seu grau de escassez, importância e valor intrínseco. Itens ordinários são aqueles constantes de tabelas de dotação e não exigem procedimentos especiais para fornecimento, como peças de reposição e rações operacionais. Itens extraordinários são aqueles não constantes de tabelas de dotação e requerem justificativa prévia para serem fornecidos, como soro antiofídico. Itens controlados ou regulados são itens críticos cujo fornecimento é controlado pelo comando, como combustíveis e baterias.

Quanto ao emprego operacional, os suprimentos recebem uma classificação de acordo com sua utilização pelos GptOpFuzNav. Eles são distribuídos em cinco classes, identificadas por algarismos romanos de I a V:

- Classe I: itens de subsistência, incluindo água e rações operacionais.

- Classe II: itens de natureza geral constantes de listas de dotação, como armamentos, veículos operacionais, roupas especiais, ferramentas, suprimentos e equipamentos de saúde.
- Classe III: itens relacionados a combustíveis e lubrificantes, exceto para aviação.
- Classe III-A: itens relacionados a combustíveis e lubrificantes de uso específico em aeronaves.
- Classe IV: itens de natureza geral não constantes de listas de dotação, como materiais de construção e fortificações de campanha.
- Classe V: itens relacionados a munição para armamentos de todos os tipos, exceto para aviação.
- Classe V-A: itens relacionados a munição de uso específico em aeronaves.

2.2.1.2 Saúde

O apoio de saúde tem como objetivo conservar o poder combatente das forças apoiadas. Isso é alcançado por meio de medidas de Medicina Preventiva e Reabilitação, garantindo o bem-estar e a prontidão do pessoal para o cumprimento das missões.

2.2.1.3 Transporte

A função de Transporte é responsável por prever e prover a movimentação de pessoal e material, atendendo às necessidades dos GptOpFuzNav em tempo e lugar adequados. Essa função é essencial para viabilizar as atividades das demais funções logísticas. O transporte abrange todas as modalidades, vias e classes de transporte, bem como os terminais de transporte.

O transporte é uma função essencial para o funcionamento das atividades logísticas dos GptOpFuzNav (Grupos de Operações de Fuzileiros Navais). Essa função tem como objetivo prever e fornecer a movimentação adequada de pessoal e material, de acordo com as necessidades dessas operações.

O transporte é considerado principalmente como um serviço logístico e está presente em todo o processo logístico, não se limitando apenas à fase de distribuição.

Ele abrange todas as modalidades, vias e classes de transporte, incluindo os terminais de transporte que são os pontos de origem e destino do processo.

No contexto do ApSvCmb (Apoio de Serviço de Combate), o transporte envolve duas ações distintas: a movimentação tática e/ou administrativa de pessoal, equipamentos e suprimentos na área de operações; e a operação e controle dos meios de transporte.

Quanto à movimentação de pessoal e cargas, as necessidades de transporte dos GptOpFuzNav são determinadas pelo caráter das operações a serem apoiadas e pelos tipos e quantidades de carga a serem movimentadas na área de operações.

Operações ofensivas e movimentos retrógrados geralmente exigem maior mobilidade das unidades de combate e um fluxo maior de suprimentos, aumentando assim as necessidades de transporte em termos de quantidade e variedade de meios. Por outro lado, a defesa em posição, que é mais estática e realizada em ambientes de dimensões reduzidas, requer menos transporte, concentrando-se principalmente no período de preparação da posição.

Independentemente do tipo de operação, o sistema de transporte estabelecido deve atender às demandas táticas e logísticas de forma ágil. Isso pode ser alcançado ao observar os princípios e atributos essenciais relacionados à movimentação de cargas e pessoal.

Esses princípios incluem o controle e unidade de comando, onde a responsabilidade pelo controle da movimentação é atribuída ao Comandante da organização responsável pelo ApSvCmb. A coordenação é fundamental para regular e coordenar os movimentos e evitar congestionamentos e conflitos de trânsito nas vias de transporte. A flexibilidade é necessária para garantir um fluxo contínuo de cargas, permitindo ajustes às mudanças de situação. Por fim, a economia é importante para maximizar a capacidade de transporte, evitando desperdícios e considerando as condições mecânicas, ambientais e táticas.

A operação e controle do sistema de transporte são influenciados pelo desdobramento e dispositivos adotados pelos elementos de ApSvCmb na área de operações. As vias de transporte existentes, a localização das instalações de ApSvCmb, os meios de transporte disponíveis e a quantidade de recursos a serem transportados são elementos fundamentais para estabelecer o sistema de transporte adequado.

2.2.1.4 Manutenção E Salvamento

A função de Manutenção e Salvamento visa conservar o material dos GptOpFuzNav em condições operativas adequadas ou, caso necessário, restituí-los a essas condições. A manutenção é fundamental para garantir o funcionamento adequado do equipamento e a prontidão das forças.

2.2.1.5 Pessoal

A função de Pessoal tem como propósito prever e prover os efetivos necessários ao emprego dos GptOpFuzNav. Isso envolve a determinação quantitativa e qualitativa das necessidades de efetivos, bem como sua obtenção, preparação e distribuição para as unidades.

As funções logísticas desempenham um papel crítico no apoio às operações de Fuzileiros Navais, garantindo que as unidades estejam devidamente equipadas, preparadas e sustentadas para cumprir suas missões com eficácia. A coordenação e o gerenciamento eficientes dessas funções são essenciais para o sucesso das operações militares e a segurança das forças envolvidas.

2.2.2 Abastecimento De Suprimentos No Apsvcmb Em Operações Terrestres

No contexto das operações terrestres, o abastecimento é uma etapa crucial que envolve a solicitação, distribuição e fornecimento de suprimentos. A distribuição é realizada de acordo com as necessidades das unidades e pode ser feita por unidade ou por pontos de distribuição. A água e as rações são separadas e distribuídas às subunidades, utilizando-se veículos de transporte adequados.

No caso dos suprimentos de classe III, os Batalhões de Infantaria de Fuzileiros Navais (BtlInfFuzNav) possuem uma viatura cisterna em suas instalações logísticas que pode se deslocar até a área de abastecimento para reabastecimento. As unidades enviam relatórios diários de situação para estimar as necessidades futuras de suprimentos.

Já para os suprimentos da Classe V, são utilizados veículos específicos para o transporte. As unidades solicitam os itens necessários, que podem ser retirados nas instalações logísticas ou entregues diretamente pela unidade responsável pelo

abastecimento. O controle e distribuição de munições são realizados pela companhia de abastecimento (CiaAbst) do BtlLogFuzNav.

Caso o nível de suprimentos esteja próximo do limite de segurança, é feito um pedido de reabastecimento à AApSvCmb. Nesse caso, uma ou mais viaturas são enviadas à AApSvCmb para coletar a munição necessária. A CiaAbst do BtlLogFuzNav é responsável pelo controle e distribuição de munições para todas as unidades.

Desta forma, o abastecimento nas operações terrestres do Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais envolve a solicitação, distribuição e controle de suprimentos de diferentes classes, garantindo que as unidades estejam devidamente abastecidas para realizar suas missões.

3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Em um contexto de conflito armado, particularmente em operações terrestres, a logística exerce função na sustentação das capacidades de combate das unidades em primeiro escalão. Um dos desafios enfrentados é garantir a entrega eficiente dos suprimentos necessários para que as peças de manobra possam cumprir suas missões. Portanto, é de extrema importância contar com uma logística eficiente que seja capaz de atender às demandas requeridas.

No caso específico de um Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav), essa eficiência logística é representada pela capacidade do Componente de Apoio de Serviços ao Combate (CASC) em suprir as necessidades solicitadas pelos demais componentes do grupamento operativo. Uma forma de aumentar o desempenho dessa logística é otimizar o transporte de suprimentos da Área de Apoio de Serviços ao Combate (AapSvCmb) até as Instalações de Logística Sumária (ILS) dos Batalhões de Infantaria de Fuzileiros Navais (BtlInfFuzNav).

Considerando as solicitações de ressuprimento de cada BtlInfFuzNav, a otimização nessa cadeia de abastecimento pode ser alcançada através da determinação da quantidade de suprimentos de cada classe que será embarcada em cada veículo da AapSvCmb. Esse planejamento visa minimizar os custos inerentes ao transporte dessas demandas, levando em consideração diversos aspectos logísticos.

Através de estudos e análises aprofundadas, é possível desenvolver estratégias e modelos matemáticos que auxiliam na tomada de decisões para otimizar o transporte de suprimentos. Dessa forma, é possível maximizar a eficiência da logística, reduzir custos e garantir o fornecimento oportuno e adequado dos suprimentos necessários para o sucesso das operações terrestres do Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais.

Portanto, o trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo matemático baseado em grafos, que representa parte do processo de abastecimento de suprimentos das ILS dos BtlInfFuzNav pela AApSvCmb do CASC, buscando assim contribuir para a eficiência da logística em operações de combate. A modelagem do problema foca nas demandas de cada BtlInfFuzNav, com o intuito de minimizar os custos logísticos de transporte dos suprimentos desde os nós de origem até os nós de destino.

Dessa forma, serão utilizadas técnicas de otimização para desenvolver um modelo que leve em consideração a capacidade dos veículos disponíveis e as restrições logísticas existentes. Através da aplicação desse modelo, será possível determinar a quantidade ideal de suprimentos de cada classe a ser embarcada em cada veículo, de forma a minimizar os custos logísticos envolvidos no transporte. Espera-se que o modelo proposto possa fornecer insights valiosos para a tomada de decisões estratégicas relacionadas ao abastecimento de suprimentos nas operações de combate, permitindo um uso mais eficiente dos recursos disponíveis e, conseqüentemente, melhorando o desempenho da logística no campo de batalha.

Com base nas análises e resultados obtidos através da aplicação desse modelo matemático, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de logística militar, proporcionando subsídios para o aprimoramento das práticas operacionais e estratégicas nas operações terrestres.

3.1 Formulação E Modelagem Matemática

O problema apresentado pode ser modelado como um grafo orientado $G = (N, E)$, em que N é o conjunto de nós (pontos a serem atendidos pelo BtlInfFuzNav) e E o conjunto de arestas. O nó de oferta representa a AApSvcmb, onde os veículos são abastecidos para que os produtos sejam transportados até os consumidores finais. O objetivo proposto é minimizar o custo total do transporte dos produtos desde

o nó de origem até os consumidores finais dos BtlInfFuzNav, respeitando a capacidade dos veículos.

A formulação matemática para o modelo de rede na sua forma geral é:

$$\text{Min } Z = \sum_k C_k^T x_k \quad (1)$$

s. a.

$$A_k x_k = r_k, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_k D_k x_k \leq b \quad (3)$$

$$l_k \leq x_k \leq u_k, \forall k \quad (4)$$

Onde:

x_k	vetor de fluxos do produto k ;
Z	custo total de distribuição de todos os produtos (função objetivo);
A_k	matriz de incidência nó-arco associada ao produto k ;
D_k	matriz de coeficientes das restrições de agregação para as capacidades dos veículos
b	vetor de capacidades dos veículos associadas às restrições de agregação;
C_k^T	vetor de custos associados ao produto k ;
r_k	vetor de ofertas e demandas associados ao produto k ;
u_k	capacidade máxima de fluxo nos arcos associadas ao produto k ;
l_k	capacidade mínima de fluxo nos arcos associadas ao produto k .

A equação (1) representa a função objetivo remetendo ao custo total envolvido para realização do transporte de todos os produtos por todos os veículos utilizados.

A equação (2) representa a restrição de rede para cada produto k .

A equação (3) representa as restrições agregadas respeitando a capacidade dos veículos.

A equação (4) representa as capacidades mínimas e máximas dos arcos da rede.

A Figura 1, representa o grafo que modela o problema. São transportados dois produtos em dois veículos desde o nó de origem O até os nós de demanda final (C1,

C2 e C3). Esse grafo é representado por super nós que são compostos por nós elementares associados aos produtos. Importante salientar que, nessa modelagem, para que a restrição de capacidade dos veículos (restrição agregada) seja satisfeita, dois super nós representando os veículos foram criados.

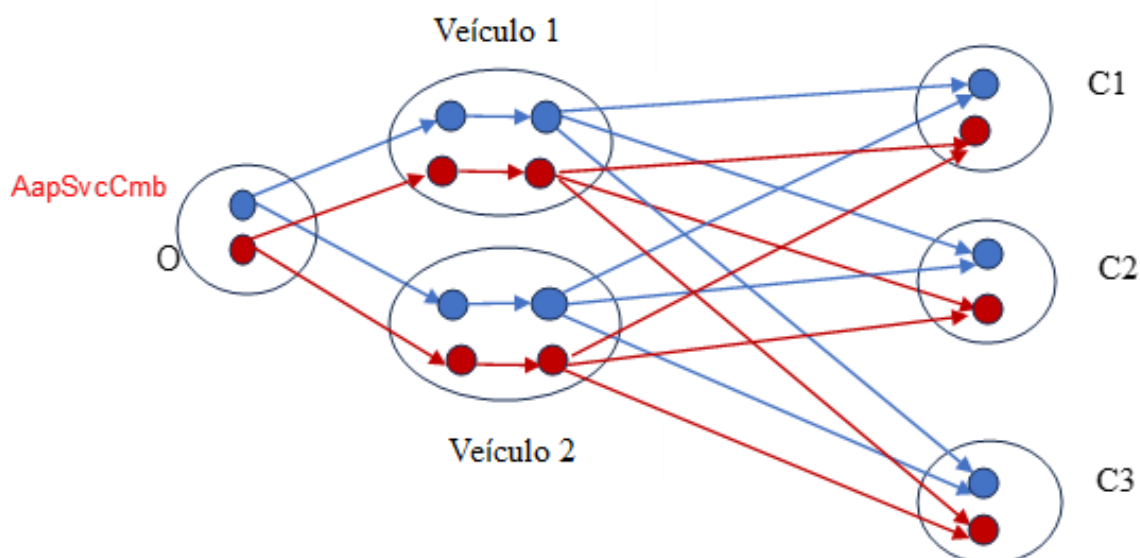


Figura 1: Modelo lógico representando dois produtos transportados por dois veículos distribuídos em uma rede que poderá ser capacitada ou não. Nesta figura se observa (a) produto A - azul ; (b) produto B - vermelho, super nó veículos 1 e super nó veículo 2.

3.1.1 Considerações Sobre O Modelo Proposto

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho busca fornecer uma solução aproximada para o problema de otimização do transporte de suprimentos em operações terrestres durante um conflito armado. É importante ressaltar que o modelo apresentado é uma simplificação da realidade complexa e dinâmica de um campo de batalha, considerando um conjunto limitado de variáveis e restrições logísticas.

Devido à natureza desafiadora e imprevisível das operações de combate, é inviável obter um resultado exato que represente precisamente todas as nuances e interações presentes no contexto real. No entanto, por meio da aplicação de técnicas de programação matemática, teoria dos grafos e Pesquisa Operacional (PO), é possível buscar algoritmos eficientes para resolver problemas logísticos e obter soluções aproximadas.

É importante reconhecer que o modelo proposto possui limitações e simplificações inerentes. O objetivo é fornecer uma aproximação da realidade, considerando uma estrutura mais simples e gerenciável para análise e tomada de

decisões. Portanto, é essencial ter em mente que o modelo não abrange todos os aspectos e variáveis presentes em um cenário de conflito armado.

No entanto, o modelo desenvolvido pode servir como base para a solução de problemas logísticos similares e pode ser atualizado e aprimorado continuamente. A partir da incorporação de informações mais precisas, dados em tempo real e considerações adicionais, é possível tornar o modelo cada vez mais fidedigno e adaptado às necessidades específicas de um determinado contexto operacional.

4 EQUACIONAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

O modelo proposto pode ser solucionado pelo método de programação linear, o método simplex especializado para redes. O método com particionamento primal é apresentado por Castro e Nabona (1996), para resolver problemas de grande porte de redes de transporte de múltiplos produtos (MP). Toda fundamentação matemática do método particionado especializado e demonstrações podem ser encontrados em detalhes no trabalho de MACHADO, C.M.S. et.al (2010).

Basicamente o método utiliza a estratégia de dividir o conjunto das variáveis de decisão do problema em variáveis do tipo básicas, não básicas e superbásicas. E pela adição de variáveis artificiais e de folgas (s), ao problema formulado anteriormente, na seção 3.1, obtém-se um problema com restrições de igualdade, como:

$$\text{Min } Z = \sum_k C_k^T x_k \quad (5)$$

$$s. a. \\ A_k x_k + e_{a_k}^i = r_k, \forall k \quad (6)$$

$$\sum_k D_k x_k + s = b \quad (7)$$

$$l_k \leq x_k \leq u_k, \forall k \quad (8)$$

onde, a_k é o arco enraizado e l o nó raiz para o grafo G que está associado ao produto k , com isso garantindo que $[A_k | e^l]$ seja uma matriz com posto completo.

A matriz de restrição associada com (6) e (7) pode ser colocada sob a seguinte forma

$$\hat{A} = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} A|e^j & & & & \\ \hline & A|e^j & & & \\ \hline & & \ddots & & \\ \hline & & & A|e^j & \\ \hline D_1|0 & D_2|0 & \cdots & D_k|0 & I \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \bar{A}_1 & & & & \\ \hline & \bar{A}_2 & & & \\ \hline & & \ddots & & \\ \hline & & & \bar{A}_k & \\ \hline \bar{D}_1 & \bar{D}_2 & & \bar{D}_k & I \end{array} \right] \quad (9)$$

A partir da matriz \hat{A} , é possível obter uma matriz básica particionada com a seguinte estrutura

$$\bar{B} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|c} B_1 & & & R_1 & & & 0 \\ & \ddots & & & \ddots & & \\ & & B_k & & & R_k & \\ \hline P_1 & \cdots & P_k & T_1 & \cdots & T_k & 0 \\ \hline S_1 & \cdots & S_k & U_1 & \cdots & U_k & I \end{array} \right] \quad \left. \begin{array}{l} \text{q} \\ \text{p} \end{array} \right\} \quad (10)$$

com

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & B_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & B_K \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \cdots & 0 & | & 0 \\ 0 & R_2 & \cdots & 0 & | & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_K & | & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \cdots & P_K \\ S_1 & S_2 & \cdots & S_K \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & \cdots & T_K & | & 0 \\ U_1 & U_2 & \cdots & U_K & | & I \end{bmatrix}$$

onde

- B_k uma matriz básica de incidência nó-arco para \bar{A}_k associada ao produto k ;
- R_k matriz de incidência nó-arco associada aos arcos superbásicos¹ definidas para o produto k ;
- P_k matriz de coeficientes associados aos arcos básicos do produto k , nas restrições ativas de agregação de fluxo;
- S_k matriz de coeficientes associados aos arcos básicos do produto k nas restrições não ativas de agregação de fluxo;

- T_k matriz de coeficientes associados aos arcos superbásicos do produto k , nas restrições ativas de agregação de fluxo;
- U_k matriz de coeficientes associados aos arcos superbásicos do produto k , nas restrições não ativas de agregação de fluxo;
- I matriz identidade associada as folgas nas restrições não ativas de agregação.

A partição q representa restrições de agregação ativas (variáveis de folga não básicas). A partição p representa restrições de agregação não ativas (variáveis de folga básica).

É apresentado a seguir, o modelo desacoplado para o problema proposto. Cada rede representará um produto k , onde a matriz básica particionada poderá ser colocada conforme (10).

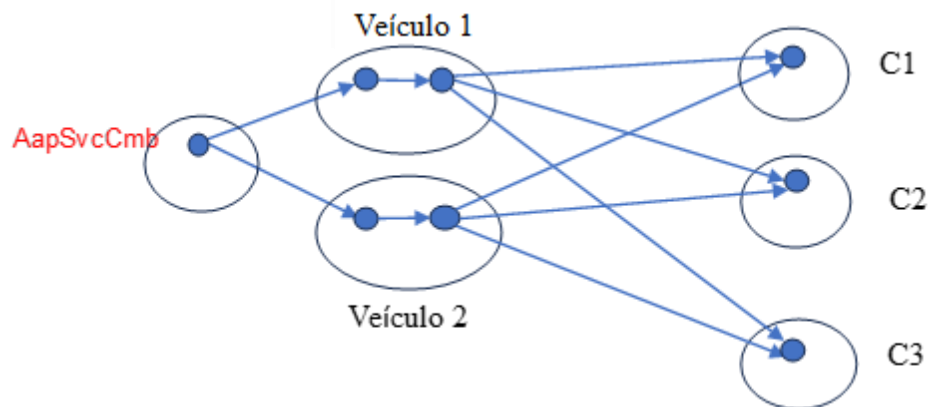


Figura 2: Modelo lógico representando um produto A – azul sendo transportado em dois veículos distribuídos em uma rede que poderá ser capacitada ou não.

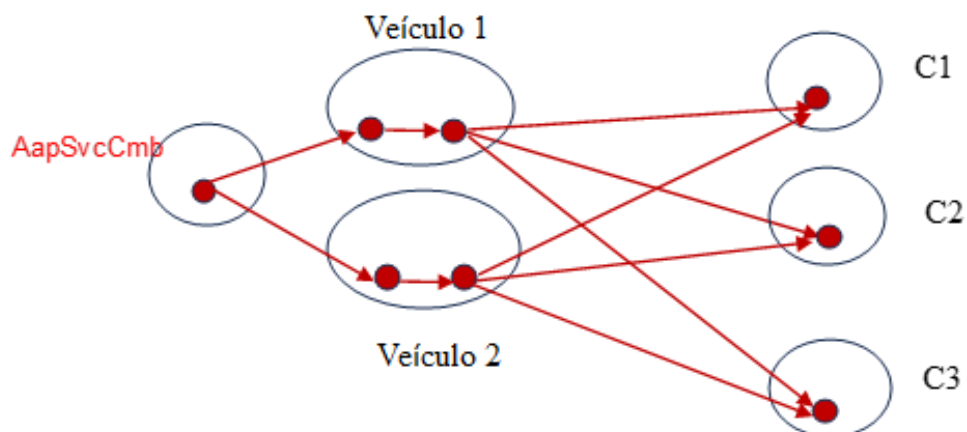
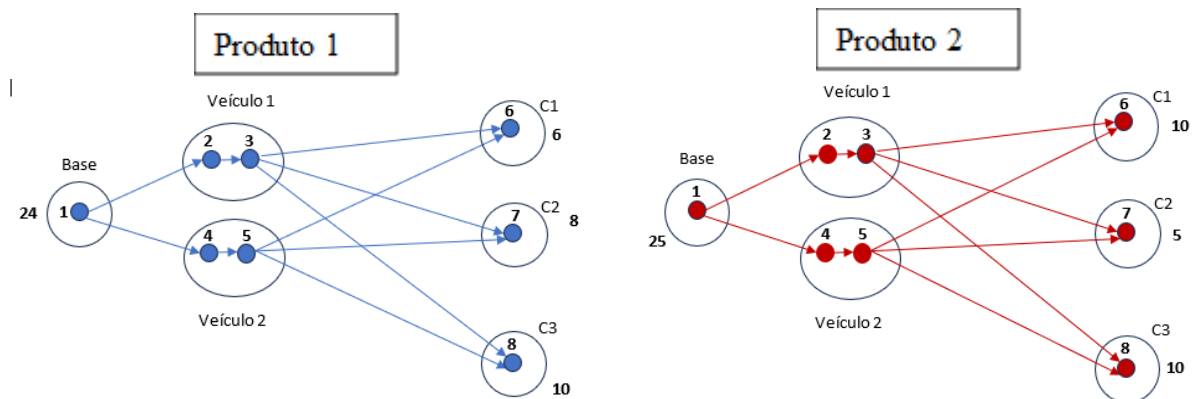


Figura 3: Modelo lógico representando um produto B – vermelho sendo transportado em dois veículos distribuídos em uma rede que poderá ser capacitada ou não.

As restrições de capacidade dos veículos (restrições de agregação) são colocadas sobre os arcos representados nos super nós da Figura 2 e 3.

4.1 Rede Com Super Nó Para Validar O Modelo Proposto

A rede utilizada como exemplo, para validar o modelo proposto, utilizará os super nós representando os dois veículos conforme mostrado no modelo anteriormente. No entanto é preciso destacar que, na medida em que o número de veículos aumenta o tamanho do problema também aumenta.



Custo dos arcos da Rede - Produto 1

x121	x231	x361	x371	x381	x141	x451	x561	x571	x581
5	0	8	4	5	6	0	6	4	8

Custo dos arcos da Rede - Produto 2

x122	x232	x362	x372	x382	x142	x452	x562	x572	x582
4	0	3	6	9	6	0	6	4	8

Solução Inicial- Fluxo de Produto 1

x121	x231	x361	x371	x381	x141	x451	x561	x571	x581
24	24	6	8	10	0	0	0	0	0

Solução Inicial- Fluxo de Produto 2

x122	x232	x362	x372	x382	x142	x452	x562	x572	x582
12	12	10	0	2	13	13	0	5	8

No apêndice do trabalho é mostrada a matriz (9) e o equacionamento para o modelo. O problema pressuposto, foi resolvido em planilha eletrônica utilizando o método simplex. O método exato simplex permite obter a solução ótima para o problema, ou seja, o custo da função objetivo não poderá ser melhorado a partir das variáveis de decisão encontradas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho, desenvolvemos um modelo matemático baseado em grafos para otimizar o transporte de suprimentos em operações terrestres durante conflitos armados, com foco na logística de um Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais (GptOpFuzNav). Nosso objetivo principal foi contribuir para a eficiência da logística em operações de combate, minimizando os custos logísticos envolvidos no transporte de suprimentos desde os nós de origem até os nós de destino.

O modelo proposto utiliza técnicas de programação linear, especificamente o método simplex especializado para redes com particionamento primal. Essa abordagem permite dividir o conjunto das variáveis de decisão em variáveis do tipo básicas, não básicas e superbásicas, adicionando variáveis artificiais e de folgas ao problema para obter restrições de igualdade.

Apesar das limitações e simplificações inerentes ao modelo, ele representa uma aproximação da realidade complexa e dinâmica de um campo de batalha. Sabemos que a natureza desafiadora e imprevisível das operações de combate impossibilita obter uma solução exata que leve em consideração todas as nuances e interações presentes. No entanto, por meio de técnicas matemáticas e de Pesquisa Operacional, pudemos buscar algoritmos eficientes e soluções aproximadas.

A validação do modelo foi realizada por meio de uma rede com super nós representando os veículos, e o problema foi resolvido utilizando o método simplex em uma planilha eletrônica. Esse processo demonstrou a aplicabilidade e eficiência do modelo em fornecer uma solução ótima para o problema, possibilitando a minimização dos custos logísticos e a otimização do transporte de suprimentos.

A relevância deste trabalho para a área de logística militar e operações terrestres advêm do modelo desenvolvido poder servir como base para a solução de problemas logísticos similares, e aprimoramentos contínuos podem ser realizados incorporando informações mais precisas, dados em tempo real e considerações adicionais para torná-lo ainda mais fidedigno às necessidades específicas de um cenário de combate.

É importante destacar que o presente estudo é apenas um passo inicial para abordar a complexidade do transporte de suprimentos em um cenário de conflito armado. Novas pesquisas e análises podem ser realizadas para aprimorar ainda mais a eficiência logística, considerando outros aspectos logísticos, táticos e operacionais que possam influenciar o desempenho da cadeia de abastecimento.

No que diz respeito aos trabalhos futuros, este estudo abre caminho para várias possibilidades de aprimoramento. Uma das principais considerações é a incorporação de variáveis dinâmicas, representando a volatilidade do cenário de combate. Seria relevante explorar como variações nas demandas de suprimentos e mudanças nas capacidades dos veículos em diferentes momentos da operação podem impactar as decisões logísticas.

Outro aspecto importante a ser abordado é a análise de riscos e incertezas inerentes ao ambiente de conflito armado. Estudos adicionais podem incluir análises de risco e a consideração de medidas para mitigá-los, buscando desenvolver estratégias logísticas mais robustas e adaptáveis aos imprevistos do campo de batalha.

Além disso, a abordagem multicritério pode ser adotada para a tomada de decisões logísticas. Isso significa considerar não apenas os custos logísticos, mas também outros fatores relevantes, como a segurança das rotas de transporte e a prontidão operacional das tropas.

Validações empíricas em cenários reais ou simulados também são fundamentais para tornar o modelo mais robusto. Coletar dados logísticos reais de operações militares pode fornecer insights valiosos para calibrar e aprimorar o modelo.

Por fim, a aplicação do modelo a estudos de casos reais pode ser uma forma de avaliar sua eficácia e identificar eventuais ajustes necessários. Trabalhos futuros podem abordar diferentes contextos de conflitos armados para verificar a aplicabilidade do modelo em cenários variados, garantindo sua relevância e

aplicabilidade prática, o que pode resultar em melhorias tangíveis no suporte logístico às tropas em combate.

6 REFERÊNCIAS

BRASIL. Marinha do Brasil. **CGCFN-0-1 – Manual Básico Dos Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **CGCFN-33 – Manual De Operações Do Componente De Apoio De Serviços Ao Combate Dos Grupamentos Operativos De Fuzileiros Navais**. Rio de Janeiro, 2008.

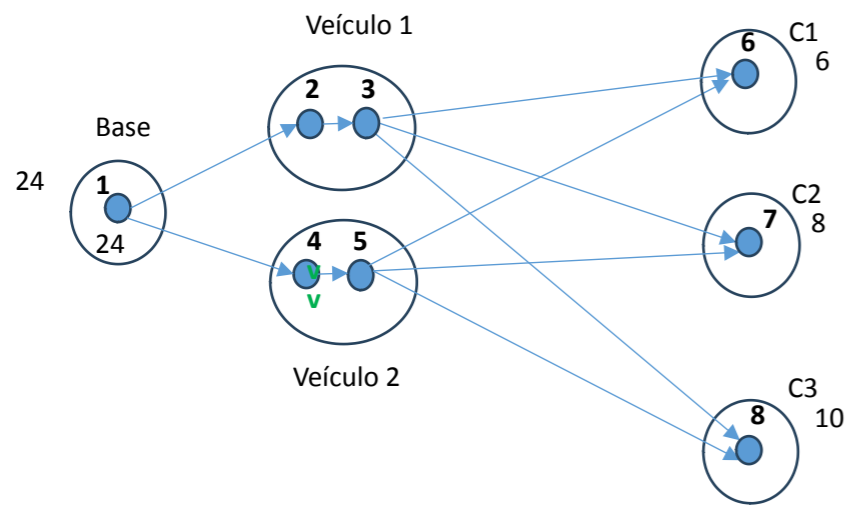
MACHADO, CATIA.M.S.; Mayerle, Sergio F; Trevisan, Vilmar. **A linear model for compound multicommodity network flow problems**. *COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH* **JCR**, v. 37, p. 1075-1086, 2010.

CASTRO, J. e NABONA, N. (1996). An Implementation of Linear and Nonlinear Multicommodity Network Flows, *European Journal of Operational Research* **92**, 37-53.

ANEXO A

	x121	x231	x361	x371	x381	x141	x451	x561	x571	x581	x122	x232	x362	x372	x382	x142	x452	x562	x572	x582			
1	1						1															24	24
2	-1	1																				0	0
3		-1	1	1	1																	0	0
4						-1	1															0	0
5							-1	1	1	1												0	0
6			-1					-1														-6	-6
7				-1																		-8	-8
8					-1																	-10	-10
1											1					1						25	25
2											-1	1										0	0
3												-1	1	1	1							0	0
4																-1	1					0	0
5																	-1	1	1	1		0	0
6													-1					-1				-10	-10
7														-1								-5	-5
8															-1							-10	-10
capaC		1										1										30	30
							1										1					19	30
Sotima	18	18	0	8	10	6	6	6	6	0	0	12	12	10	0	2	13	13	0	5	8	F0	502
Custo	5	0	8	4	5	6	0	6	4	8	4	0	3	6	9	6	0	6	4	8			
SI	24	24	6	8	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	10	5	10		

Produto 1



Produto 2

