UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ALESSANDRO DA SILVA SIMÃO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO NO NORTE DO BRASIL EM SITUAÇÕES DE CONTINGÊNCIA

RECIFE
2017

ALESSANDRO DA SILVA SIMÃO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO NO NORTE DO BRASIL EM SITUAÇÕES DE CONTINGÊNCIA

Dissertação Submetida ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional
Orientadora: Prof.ª Isis Didier Lins, DSc

RECIFE
2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

S588m Simão, Alessandro da Silva.

Modelagem e simulação do transporte de minério de ferro no norte do Brasil em situações de contingência / Alessandro Da Silva Simão - 2017.

48 folhas, Il. Tabs.

Orientadora: Prof.ª Drª Isis Didier Lins.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Inclui: Referências e Apêndices.

1. Engenharia de Produção. 2. : Minério de ferro. 3. Modais de transporte. 4. Contingência. 5. Problema do caminho mínimo. 6. Algoritmo de Dijkstra. I. Lins, Isis Didier (Orientadora). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2017-207

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO PROFISSIONAL DE

ALESSANDRO DA SILVA SIMÃO

"MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO NO NORTE DO BRASIL EM SITUAÇÕES DE CONTINGÊNCIA"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: **PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **ALESSANDRO DA SILVA SIMÃO, APROVADO.**

Recife, 09 de março de 2017.

_____

Prof.ª Isis Didier Lins, Doutor (UFPE) - orientadora

_____

Prof. Márcio José das Chagas Moura, Doutor (UFPE)

_____

Prof. Ricardo José Ferreira, Doutor (IFPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que me deram a vida, que me alfabetizaram, educaram e disseram que a vida é a maior escola. Meus pais em memória;

A minha orientadora Professora Isis por ensinar o caminho e trilhar junto, por me deixar sonhar em busca do conhecimento e ter o trato e o tato nos momentos difíceis de minha jornada;

Agradeço aos meus amigos de mestrado que nos momentos difíceis não só ajudaram mas também de uma forma ou de outra compartilharam os seus saberes pela diversificação das formações acadêmicas.

“Todos buscamos o melhor caminho em nossas escolhas, mas só a tomada de decisão apontará o caminho certo de nossas vidas, hoje sim, amanhã sim e sempre.”

Agradeço a todos os meus alunos que em algum momento entenderam que o conhecimento é o melhor caminho para a vida;

Aos meus amigos pessoais, que entenderam as minhas negativas, faltas em alguns eventos e o meu isolamento nos livros, artigos e periódicos;

A minha família pelo apoio, por entender as necessidades de estudo e as faltas em diversos momentos.

“A vida te escolhe de uma maneira simples e aí tudo se completa em uma contingência da realidade.”

E por último dizer que sem Deus nada disso seria possível.

RESUMO

Esta pesquisa investiga a possibilidade de transporte do minério de ferro na região Norte, com utilização de modais alternativos (ex. rodoviário e aquaviário), devido a contingências na Estrada de Ferro Carajás geralmente causadas por grupos étnicos e sociais. Inicialmente é entendido o cenário atual em questão, que mostra de um lado as jazidas da Província Mineral de Carajás, considerada como origem da matéria-prima e o porto Ponta da Madeira como o destino do minério de ferro. Em seguida, faz-se um levantamento das ligações alternativas entre esses pontos envolvendo rodovias, ferrovias e vias aquáticas levando-se em conta infraestrutura existente, porém não necessariamente utilizada, bem como planejada para entrar em operação nos próximos anos. A modelagem da rede de transporte tanto com infraestrutura atual como planejada é realizada por meio do problema do caminho mínimo. São utilizadas métricas de distância, tempo e custo para caracterizar a rede e diversos cenários de contingência são analisados. O algoritmo de Dijkstra é empregado como método de resolução em cada cenário e os caminhos ótimos são obtidos em termos de distância, tempo ou custo.

Palavras Chave: Minério de ferro. Modais de transporte. Contingência. Problema do caminho mínimo. Algoritmo de Dijkstra.

ABSTRACT

This research investigates the possibility of transportation of iron ore in the North region, using alternative modes (eg road and waterway), due to contingencies on the Carajás Railroad generally caused by ethnic and social groups. Initially the present scenario is understood, which shows, on the one hand, the deposits of the Carajás Mineral Province, considered as the source of the raw material and the port of Ponta da Madeira as the destination of the iron ore. Next, a survey is made of the alternative connections between these points involving highways, railways and waterways taking into account existing infrastructure, but not necessarily used, as well as planned to start operating in the coming years. The modeling of the transport network with both current and planned infrastructure is performed through the minimum path problem. Distance, time and cost metrics are used to characterize the network and several contingency scenarios are analyzed. The Dijkstra algorithm is used as the resolution method in each scenario and optimal paths are obtained in terms of distance, time or cost.

Keywords: Iron ore. Modes of transport. Contingency. Minimal path problem. Algorithm of Dijkstra.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Logística e cadeia produtiva 13
Figura 2.2 – Algoritmo de Dijkstra 23
Figura 3.1 – Mapa Geológico simplificado da Província Mineral de Carajás 25
Figura 3.2 – Fluxograma da cadeia de suprimento 26
Figura 3.3 – Caminhão fora de estrada 26
Figura 3.4 – Infraestrutura de transporte no Norte Brasileiro 27
Figura 3.5 – Locomotiva GE modelo C44-9WM da EFC, com rodagem C-C 28
Figura 3.6 – Equivalência transportada entre os modais 30
Figura 3.7 – Grafo com tempo, distância e custo de transporte por trecho e por modal 32
Figura 3.8 – Grafo da rede de transporte adaptado para utilização do algoritmo de Dijkstra 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Movimentação Brasileira em 2015 – cargas em cabotagem 16
Tabela 2.2 – Movimentação Brasileira em 2015 – cargas em navegação interior..... 16
Tabela 2.3 – Malha Rodoviária Nacional 18
Tabela 2.4 – Dados de comparação Região Norte e o Estado do Pará 20
Tabela 3.1 – Locomotivas Estrada de Ferro Carajás..... 28
Tabela 3.2 – Equivalência entre transportes 29
Tabela 4.1 – Cenário 0 – sem interrupções..... 37
Tabela 4.2 – Cenário 1 - Trecho ferroviário Carajás-Marabá interrompido..... 38
Tabela 4.3 – Cenário 2 – Trecho ferroviário Marabá-Açailândia interrompido..... 38
Tabela 4.4 – Cenário 3 - Trecho ferroviário Açailândia-Santa Inês interrompido 38
Tabela 4.5 – Cenário 4 - Trecho ferroviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompido..... 39
Tabela 4.6 – Cenário 5 – Trechos ferroviário e rodoviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompidos..... 39
Tabela 4.7 – Cenário 6 – Trechos ferroviário e rodoviário Açailândia-Santa Inês interrompidos 39
Tabela 4.8 – Cenário 7 – Trechos ferroviário e rodoviário Marabá-Açailândia interrompidos 39

Sumário

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Justificativa 11
1.2 Objetivos 11
1.2.1 Objetivo Geral 11
1.2.2 Objetivos Específicos 12
1.3 Método de Pesquisa 12
1.4 Estrutura da Dissertação 12
2 BASE CONCEITUAL 13
2.1 Logística e Cadeia de Suprimento 13
2.2 Modais de Transporte Logístico 14
2.2.1 Modal Aquaviário 15
2.2.2 Modal Ferroviário 16
2.2.3 Modal Rodoviário 17
2.3 Transportes Logístico no Brasil e Região Norte 18
2.4 Problema do Caminho Mínimo 20
2.5 Algoritmo de Dijkstra 22
2.6 Revisão da Literatura 23
3 MODELAGEM DA REDE DE TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO 25
3.1 Transporte de Minério de Ferro 35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
5 CONCLUSÃO 41
5.1 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros 41
REFERÊNCIAS 42
APÊNDICE 1 46
APÊNDICE 2 47
APÊNDICE 3 48

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro tem grande importância econômica para o Brasil, sendo uma das importantes *commodities* para exportação, pois representa 60,3% no comércio exterior da indústria extrativa mineral (DNPM, 2015), tendo como principais clientes países como a China. Grande parte da atividade de mineração é realizada no Pará e Amapá e a maior parcela do minério para exportação é transportada por meio do modal ferroviário. O minério produzido no sudeste do Pará é conduzido por vias ferroviárias da Serra de Carajás até o porto Ponta da Madeira no Maranhão, onde é feito o transbordo para grandes navios de carga responsáveis pelo transporte da *commodity* para Europa e Ásia.

As vias ferroviárias no sudeste do Pará são, muitas vezes, interrompidas por diversos motivos, dentre eles: movimentos sociais de etnias indígenas motivadas por reivindicações, baixa visibilidade no período chuvoso (novembro a março), queimadas próximas às linhas férreas no período seco (abril a outubro) e ainda descarrilamentos de trens decorrentes de baixa manutenção principalmente nas pontes.

Essas interrupções provocam atrasos no transporte do minério de ferro e as consequências são contabilizadas em milhões, dada a quantidade de minério transportada por trem (cerca de 31.800 toneladas). Além disso, esses atrasos geram aumento do estoque de minério na mina aguardando embarque nos trens e, consequentemente, os navios designados para complementar o transporte do minério para outros continentes precisam aguardar sua chegada, o que prejudica as atividades operacionais do porto e gera custos.

Há uma série de planos para o desenvolvimento da infraestrutura de transporte da região Norte que visam ao aumento da capacidade de escoamento de *commodities* nacionais que podem auxiliar à mitigação das interrupções citadas por meio da inclusão de alternativas para o transporte de minério de ferro. Por exemplo, no Programa de Investimento Logístico – PIL do Governo Federal está prevista uma aplicação de R$ 86,4 bilhões na construção, modernização e manutenção de 7,5 mil quilômetros de linhas férreas na região pesquisada. O modelo de concessão mantém as premissas de ferrovias em bitola larga, com alta capacidade de transporte de cargas, traçado geométrico otimizado e uma velocidade elevada. No Plano da Confederação Nacional do Transporte e Logística (2014), o investimento mínimo para a região Norte é da ordem de R$ 124 bilhões, para os modais rodoviário, aquaviário e ferroviário.

Nesse contexto, é interessante investigar maneiras alternativas de escoar a produção de minério de ferro para a construção de um plano de contingência a ser utilizado quando o

modal ferroviário encontrar-se indisponível. Assim, busca-se amenizar ou eliminar os efeitos negativos da indisponibilidade de partes da malha ferroviária nas cadeias de suprimentos das quais o minério de ferro do Norte brasileiro participa.

Para isso, inicialmente, é necessário analisar como o transporte no minério de ferro é realizado atualmente. Nessa etapa, identificam-se os pontos de suprimento, de demanda e de transbordo (ex.: minas, portos) assim como as ligações (linhas ferroviárias) e os volumes transportados entre eles. Essas informações permitem a modelagem da malha ferroviária corrente e a identificação dos efeitos das interrupções das linhas.

Em seguida avaliam-se as opções existentes (vias rodoviárias, por exemplo) as obras de infraestrutura planejadas para a região e que deverão entrar em operação nos próximos anos 2017 e 2018. Dessa maneira, propõe-se uma modelagem da malha de transporte do minério de ferro do Norte do país e a construção de um problema de programação matemática associado com base no problema de caminho mínimo (HILLIER, 2013). Também são simulados diversos cenários de contingência para avaliação de métricas de desempenho da rede.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento dessa pesquisa trará benefícios relacionados à identificação de alternativas para o escoamento do minério de ferro no Norte do país, possivelmente envolvendo múltiplos modais, por exemplo, ferroviário e aquaviário, ferroviário e rodoviário, rodoviário e aquaviário e ainda aquaviário, ferroviário e rodoviário. Além disso, os custos associados a cada alternativa também são estimados.

A elaboração de planos de contingência com base em modelos matemáticos quantitativos possibilita um melhor aproveitamento dos modais existentes. Os planos auxiliam a tomada de decisão para economia de recursos ou minimização das despesas ora elevadas pela utilização de alternativas onerosas, para cumprimento de contratos e escoamento da produção de minério de ferro em direção ao porto Ponta da Madeira no Maranhão.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem como objetivo modelar a rede de transporte para escoamento de minério de ferro atualmente utilizada por uma empresa mineradora no Norte do Brasil, a fim de avaliar as alternativas mais adequadas em situações de contingência.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos são definidos para se chegar ao objetivo geral:

- Identificar o cenário atual de como é realizado o escoamento do minério de ferro no Norte do país;
- Apresentar novas alternativas de ligação entre os pontos de suprimento e demanda;
- Modelar matematicamente a rede de transportes como um problema de caminho mínimo;
- Simular diversas situações de contingência e apontar alternativas.

1.3 Método de Pesquisa

Neste trabalho, são utilizados artigos científicos, *softwares*, dados bibliográficos. É proposta uma modelagem da malha de transporte do minério de ferro do Norte do país por meio de programação matemática. Esta modelagem permite a simulação de diversos cenários de contingência e a avaliação de métricas de desempenho associadas. Mais especificamente, serão utilizados dados e informações provenientes de órgãos governamentais dos Ministérios de Transporte, do Ministério de Minas e Energia, bem como de uma empresa mineradora que possui instalações na região considerada.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos o primeiro trata-se da introdução que contém os objetivos geral e específico e a metodologia utilizada no trabalho. O segundo capítulo apresenta a base conceitual da pesquisa envolvendo logística e seus modais, além do modelo do Problema de Caminho Mínimo. Este capítulo é finalizado com a revisão da literatura que estabelece uma ligação com conhecimento mais recente. No terceiro capítulo, desenvolve-se a modelagem da rede de transporte de minério de ferro no Norte do país, considerando infraestrutura atual e prevista para entrar em operação nos próximos anos. No quarto capítulo, é modelada a rede de transporte de minério levando em conta os modais ferroviário, rodoviário e aquaviário em função do tempo, distância e custo e há a apresentação dos resultados para os diversos cenários de contingência analisados. O quinto e último capítulo conclui o trabalho, bem como discute as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL

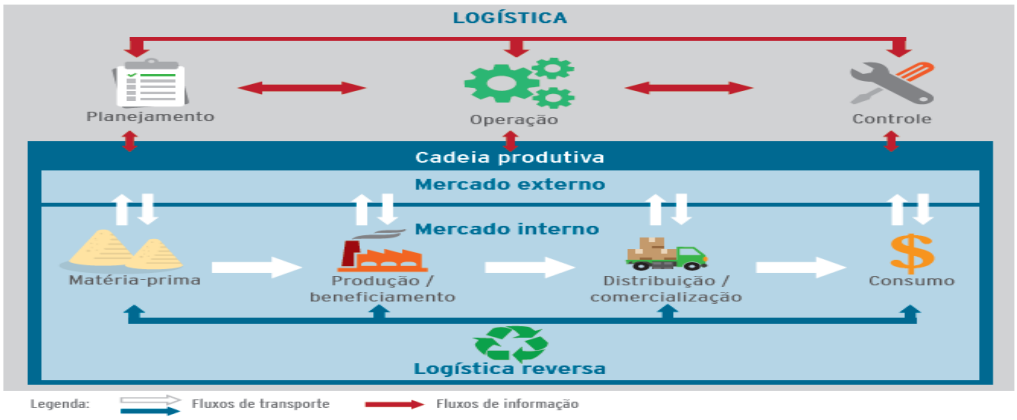
Este capítulo contém a fundamentação teórica com os conceitos e métodos necessários ao desenvolvimento e compreensão do trabalho, tais como: logística e cadeia de suprimento, modais de transporte, problema do caminho mínimo. Além disso, é apresentada uma revisão de literatura com artigos recentes relacionados ao tema desta dissertação.

2.1 Logística e Cadeia de Suprimento

Segundo a Council of Supply Chain Management Professionals - CSCMP norte-americana (NOVAES, 2007, p. 35), "logística é o processo de planejar, implementar e controlar de maneira eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor". Nesse contexto, a logística é uma atividade muito complexa que envolve tudo o que está relacionado com a movimentação de materiais desde o início da produção até a chegada do produto ao consumidor final.

Os autores Ballou (2006), Bowersox (2011) e Cristopher (2010) são pontuais no conceito de logística e cadeia de suprimentos os quais utilizam a mesma definição, afirmando que a cadeia de suprimento deve ser apresentada como sendo a ligação do produto inicial até o consumidor final, mesmo passando por diversas etapas (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Logística e cadeia produtiva



Fonte: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/logistica-reversa.

O CSCMP define ainda a Gestão da Cadeia de Suprimentos como "o planejamento e a gestão de todas as atividades associadas à logística interna e interorganizacional, bem como a

coordenação e colaboração entre todos os parceiros da cadeia, sejam eles fornecedores, prestadores de serviço ou consumidores".

2.2 Modais de Transporte Logístico

Os principais modais de transporte logístico, segundo Ballou (2010), são o aéreo, o aquaviário, o dutoviário, o ferroviário e o rodoviário. O modal aéreo utiliza aviões de pequeno e grande porte, helicópteros e em um futuro próximo os drones (ANAC, 2015). Uma de suas características é o frete de alto custo quando comparado com outros modais e isso o restringe aos produtos de alto valor agregado e que compensam o alto frete. Produtos normalmente transportados por via aérea são: peças e equipamentos eletrônicos, instrumentos óticos, confecções finas, flores e metais preciosos. O transporte aéreo é também utilizado quando há necessidade de rapidez na entrega.

Na região Norte, os aviões de pequeno porte sejam de passageiros ou de carga, são mais utilizados na Amazônia por não necessitar de grandes estruturas para pouso e decolagem. O modal aéreo não se aplica ao presente trabalho, já que o transporte aéreo de milhares de toneladas de minério de ferro, um produto de baixo valor agregado, por aviões, não é viável. Assim, o alto valor do frete torna essa modalidade totalmente inviável para a operação.

Outro modal que se tem pouca importância em nossa pesquisa é o modal dutoviário este é um meio de transporte que utiliza dutos para os transportes de materiais líquidos, sólidos, encapsulados ou não. Este permite que o tráfego de grandes quantidades de produtos seja deslocado de maneira segura, evitando o transporte de cargas perigosas por caminhões, trens ou por navios. Além disso, dispensa armazenamento, simplifica os processos de carga e descarga e ainda, apresenta alta confiabilidade, baixo consumo de energia e baixos custos operacionais (CNT, 2014).

As dutovias são classificadas de acordo com o tipo de produto transportado, a saber: gasoduto, mineroduto, oleoduto e poliduto. O mineroduto não se aplica ao presente trabalho, por se tratar de um transporte de toneladas de minério de ferro, apesar de ser um produto de baixo valor agregado, a implantação teria um custo muito elevado. Assim, o mineroduto não é considerado nesta pesquisa. Os modais aquaviário, ferroviário e rodoviário são discutidos com mais detalhes nas próximas seções.

2.2.1 Modal Aquaviário

O modal aquaviário é o meio de transporte que se utiliza de diversos tipos de embarcações: barcos, navios e balsas. Os barcos são divididos em pequenos e médios com poucas acomodações para passageiros e cargas. Este transporte é um dos mais utilizados pelas populações ribeirinhas. Os navios são mais adequados para transporte de passageiros e cargas na navegação interior, enquanto as balsas de baixo calado fazem apenas transposições e transporte de cargas na maioria em granel ou em contêiner. Calado é a distância vertical da quilha da embarcação à linha de flutuação, ou seja, corresponde à parte da embarcação dentro d'água (CNT, 2014).

O modal aquaviário é utilizado principalmente para o transporte de granéis sólidos e líquidos, sua principal característica é operar com grandes volumes, já que seu frete é bem inferior ao do transporte aéreo. No Brasil, o transporte aquaviário é efetuado em vias marítimas, tanto pela navegação de cabotagem (movimentação na costa marítima) como pela navegação de longo curso (para importação e exportação de produtos). O transporte aquaviário regulado pela Agência Nacional de Transporte Aquaviário – ANTAQ, no âmbito da navegação interior, divide-se em transporte de travessia e transporte longitudinal, podendo ainda ser subdividido em transporte de cargas, de passageiros e mistos.

A região Norte Amazônica destacou-se em 2013 com a maior quantidade de carga transportada na navegação interior, com 55,1% das cargas totais, em toneladas. A região Tocantins-Araguaia ficou com 24,8% das cargas totais (CNT, 2014). Com a necessidade constante de encontrar saída para alguns dos gargalos dos transportes de modais em grande quantidade, o modal aquaviário é a melhor solução no fator de transporte de grandes volumes a um baixo custo e ainda a entrega dependerá principalmente de um tempo relativamente alto em relação aos demais modais.

- Cabotagem

A ANTAQ define a cabotagem como a navegação realizada entre portos ou pontos do território brasileiro, utilizando a via marítima visando à costa e às vias navegáveis interiores. Observa-se na Tabela 2.1 que apesar de pouco divulgada a cabotagem é responsável pela movimentação de uma quantidade significativa de carga.

Tabela 2.1 – Movimentação Brasileira em 2015 – cargas em Cabotagem

Movimentação total de cargas – Cabotagem – 2015	
Granel líquido e gasoso	147.456.950t
Granel sólido	32.090.075t
Carga conteinerizada	21.306.086t
Carga geral	10.980.371t
Total	**211.833.482t**

Fonte: Adaptado do Anuário CNT 2016, principais dados aquaviários.

- Navegação Interior

A navegação interior é realizada com embarcações pequenas e médias, barcos e balsas principalmente de baixo calado. Na região Norte, a navegação interior é bastante utilizada devido à grande quantidade de vias navegáveis condizente com a realidade local. Apesar de ser entendida como de baixo volume não é vista assim pela CNT, pois os números da Tabela 2.2 expressam uma movimentação importante para este tipo de transporte e há uma busca por maior aplicabilidade, por se tratar de meio de transporte barato e de pouco impacto ambiental, apesar da baixa velocidade, mas que é compensatória quando se fala na quantidade expressiva em cada movimentação.

Tabela 2.2 - Movimentação Brasileira em 2015 de cargas em Navegação Interior

Movimentação total de cargas	
Granel sólido	22.128.108t
Granel líquido e gasoso	9.812.213t
Carga geral	6.414.495t
Carga conteinerizada	129.972t
Total	38.484.788t

Fonte: Adaptado do Anuário CNT 2016, principais dados aquaviários.

2.2.2 Modal Ferroviário

O modal ferroviário utiliza-se de trens com diversos tipos de bitolas e locomotivas, os quais são responsáveis por grandes transportes de cargas a granel e ainda por um expressivo volume de cerca de 331,7 bilhões de toneladas transportadas por quilômetro útil (TKU) (DNPM, 2015). Este modal facilita o transporte de grandes quantidades de carga principalmente as secas. Os custos fixos envolvidos no modal ferroviário são extremamente

altos, relativos à conservação da via permanente e à operação dos terminais de carga e descarga.

As bitolas são as medidas de espaçamento de faces entre eixos de acordo com linhas férreas construídas no país. A Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT, classifica as bitolas em duas: as estreitas medindo 1 m e as largas com 1,6 m. As linhas férreas que possuem esses tipos de bitolas somam em extensão segundo CNT (2016), 28.655 km, dividindo-se 77,20% em bitolas estreitas e 22,80% em bitolas largas.

As locomotivas são responsáveis pelo o deslocamento dos vagões no modal ferroviário. As primeiras informações sobre locomotivas são relativas às movidas a vapor ainda no século XVII. A locomotiva a vapor foi construída por Richard Trevithick no país de Gales, mas só se tornou comercial com a criação da primeira fábrica a partir da sociedade Robert Stephenson & Co. (ANTF, 2016). Na Estrada de Ferro Carajás – EFC, um grupo de três locomotivas é responsável por movimentar mais de 207 vagões por cada deslocamento.

2.2.3 Modal Rodoviário

Este modal é o responsável direto por mais de 60% (CNT, 2016) da distribuição e movimentação das cargas no território brasileiro sejam granéis, líquidos ou conteinerizados. Existe hoje no Brasil uma grande quantidade de empresas cadastradas, cooperativas e autônomos responsáveis pelo transporte rodoviário, seja por rodovias federais, estaduais ou municipais. A Tabela 2.3 descreve, em números, as rodovias pavimentadas e não pavimentadas e seus totais nas várias jurisdições. No entanto observa-se que as rodovias pavimentadas são cerca 12,24% do total da malha rodoviária, este percentual é ínfimo em relação aos quase dois milhões de quilômetros de rodovias. Enquanto que o restante compreende de rodovias não pavimentadas dentro dos municípios, com mais de um milhão de quilômetros.

Tabela 2.3 - Malha Rodoviária Nacional

Jurisdição	Rodoviária nacional (km)										
	Planejada	Não pavimentada					Pavimentada				Total
		Leito natural	Em obras de implantação	Implantada	Em obras de pavimentação	Total	Pista simples	Em obras de duplicação	Pista dupla	Total	
Federal	**43.963,80**	1.985,20	190,80	6.188,80	3.579,80	**11.944,60**	56.570,50	1.331,90	6.142,70	**64.045,10**	**119.953,50**
Estadual	**36.215,20**	56.741,70	4.171,20	34.091,70	10.596,00	**105.600,60**	114.766,10	304,40	4.676,50	**119.747,00**	**261.562,80**
Coincidente	-	2.139,50	39,00	2.291,30	389,80	**4.859,60**	18.273,50	9,00	2.140,60	**20.423,10**	**25.282,70**
Municipais	**77.381,90**	1.055.384,00	374,20	177.727,40	1.432,70	**1.234.918,30**	26.581,30	-	245,40	**26.826,70**	**1.339.126,90**
Total	**157.560,90**	**1.114.110,90**	**4.736,20**	**218.007,90**	**15.608,50**	1.352.463,50	**197.917,90**	**1.636,30**	**11.064,60**	**210.618,80**	**1.720.643,20**

Fonte: Anuário CNT 2016, principais dados rodoviários.

2.3 Transporte Logístico no Brasil e na Região Norte

Wanke (2010) descreve o transporte logístico do Brasil como atrasado em relação a outros países e em particular ao Canadá, China, EUA e Rússia, pois todos esses países possuem dimensões semelhantes ao território brasileiro e utilizam principalmente o modal ferroviário e não o rodoviário como acontece no Brasil. O transporte ferroviário apresenta a melhor relação custo/benefício quando grandes distâncias devem ser percorridas e o produto transportado possui baixa densidade de valor, como é o caso das *commodities*. O transporte rodoviário é mais caro e menos confiável se comparado ao modal ferroviário, mas mesmo assim é o mais utilizado no Brasil e é responsável por mais de 60% das cargas transportadas no país, enquanto o modal ferroviário responde por aproximadamente 20% do transporte de carga (CNT, 2016).

Segundo Gonçalves *et al.* (2014), o governo brasileiro tem envidado esforços na utilização de vários modais, para obter um maior desempenho logístico e econômico na busca da intermodalidade, principalmente entre os modais ferroviário e rodoviário. Os principais

projetos de obras de impacto no modal ferroviário e rodoviário, apesar de terem iniciado, não foram concluídos por diversos motivos, e o maior entrave de não cumprimento dos projetos das obras do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC do governo federal são as demoras de conclusão das obras, impactando de forma negativa o programa que possui grandes incentivos do governo e da iniciativa privada (CNT, 2016).

O transporte logístico na Região Norte é ainda mais precário em relação ao território nacional, pois essa região possui poucas rodovias federais e estaduais trafegáveis. Um exemplo dessa realidade é a rodovia BR 230 (Rodovia Transamazônica) que ainda possui trechos ainda não finalizados ou que demandam melhorias, tornando assim a logística na região impraticável em determinadas épocas do ano.

Ao falar em transporte aquaviário, o cenário é mais favorável devido à grande quantidade de rios na região estudada e com isso a exploração desse tipo de modal é de grande importância econômica. Os rios podem ser navegáveis, devido ao seu tamanho, volume das águas e profundidade.

Quando é dito que a navegação de rios com baixa profundidade, deve-se levar em consideração, o assoreamento por causas naturais devido ao acúmulo de detritos nos rios e ainda à degradação da vegetação de suas margens e nascentes, essa destruição do meio ambiente, tem impactos negativos para o uso do modal, mesmo com utilização de balsas de baixo calado ou embarcações pequenas.

Na região Norte existe também o extrativismo de areia e seixo para a construção civil que degrada não só os rios, mas, o meio ambiente de forma geral. Essas atividades tornam parte dos rios não navegáveis em determinadas épocas do ano.

A Tabela 2.4 apresenta alguns números relacionados à Região Norte. É uma região vasta em extensão territorial (cerca de 42,27% do território nacional), mas apresenta densidade demográfica de 4,12 habitantes / km², considerada baixa se comparada às densidades das demais regiões do país (34,15 - Nordeste, 8,75 - Centro-Oeste, 86,92 - Sudeste, 48,58 – Sul, em habitantes / km²). Mesmo com essas características, a região apresenta infraestrutura para os modais comumente utilizados no transporte de carga (aquaviário, ferroviário e rodoviário).

Da Tabela 2.1, em relação ao modal aquaviário, destaca-se a quantidade de terminais de navegação interior, responsáveis por uma movimentação de mais de 11 milhões de toneladas. Além disso, a movimentação de carga nos portos se aproxima de 52 milhões de toneladas. Em

relação ao modal ferroviário, observa-se a presença da ferrovia Estrada de Ferro Carajás, que é a única da região com extensão significativa de 971 km.

Tabela 2.4 – Dados de comparação Região Norte e o Estado do Pará

		Região Norte	***Pará***	***Relação Pará – Região Norte***
Área (km²)		3.853.676,90	1.247.954,70	0,32
População (hab)		15.864.454	7.581.051	0,48
Rodovias extensão pavimentada (km)	**Extensão total**	20.555	5.539	0,27
	Federal	8.235	2.139	0,26
	Estadual	11.205	3.287	0,29
	Municipal	1.115	113	0,10
Ferrovia extensão (km)		971	465	0,48
Portos (Unid)		6	3	0,50
Movimentação portos (ton)		27.889.405	21.987.019	0,79
Número de terminais (portos)		37	13	0,35
Movimentação nos terminais (ton)		51.984.443	26.645.507	0,51
Número de terminais (navegação interior) (Unid)		61	16	0,26
Número de eclusas		1	1	1,00
Movimentação de navegação		11.347.079	2.170.732	0,19
Número de aeroportos		15	6	0,40
Movimentação de passageiros em aeroportos		10.983.209	4.820.673	0,44
Movimentação de cargas (ton)		219.017.039	41.026.044	0,19

Fonte: Adaptado do Anuário CNT, 2014.

2.4 Problema do Caminho Mínimo

Esta pesquisa busca o melhor caminho para escoar a produção e neste caso o modelo de otimização utilizado é o do Problema do Caminho Mínimo (HILLIER, 2013). O problema se desenvolve em uma rede com uma ***origem*** e com ***destinos***. Busca-se a solução para o menor caminho possível em termos de distância. Nesta pesquisa busca-se ainda, utilizando a mesma abordagem, encontrar o caminho com o menor custo e o caminho com o menor tempo de deslocamento.

Neste trabalho serão considerados os modais aquaviário, ferroviário e rodoviário, pois são os mais utilizados pelo escoamento da produção de minério de ferro na região Norte e em particular no Estado do Pará. Cada modal tem as suas dificuldades, em função do tempo de deslocamento, distância percorrida e o custo, por exemplo:

- Modal aquaviário: poucos portos, poucas vias fluviais navegáveis em período de estiagem e transporte muito lento em relação aos demais modais.
- Modal rodoviário: alto custo em relação à quantidade transportada, transporte lento em relação às distâncias continentais e estradas em má condição.
- Modal ferroviário: transporte lento, pouca malha ferroviária.

Para uma rede G = (N, E), sendo N = {1, 2, ..., n} o conjunto de nós e E = {(i, j)| i, j ∈ N} o conjunto de arestas, o problema do caminho mínimo pode ser é matematicamente formulado como um problema de fluxo em rede como segue:

$$min \sum_{(i\ j) \in E} c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$s.a.$

$$\sum_{j \in S(s)} x_{sj} - \sum_{k \in P(s)} x_{ks} = n - 1, \tag{2}$$

$$\sum_{j \in S(i)} x_{ij} - \sum_{k \in P(i)} x_{ki} = -1, \qquad i = 1,2,\dots,n;\ i \neq s \tag{3}$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in E. \tag{4}$$

A resolução de (1-4) retorna os caminhos mínimos a partir do nó de origem s para todos os outros nós do grafo. A função objetivo (1) é o somatório do produto dos pesos c_{ij} pelas variáveis de decisão não negativas x_{ij} e seu valor ótimo é o custo relativo a todos os caminhos mínimos partindo de s para os demais nós. Os pesos c_{ij} representam a distância, o custo ou o tempo entre os nós i e j, a depender da métrica de desempenho considerada na modelagem do problema. Na solução ótima, a variável de decisão x_{ij} assume valores inteiros, devido a características do problema. Se o valor assumido é positivo, ele indica quantas vezes o arco (i,j) aparece nos vários caminhos mínimos encontrados. $S(s)$, $S(i)$, $P(s)$ e $P(i)$ indicam, respectivamente, os conjuntos de nós sucessores de s, sucessores de i, predecessores de s e predecessores de i.

A primeira restrição (2) indica o balanço de fluxo no nó de origem s. Esse nó é caracterizado por ser um nó de suprimento com capacidade $n-1$, já que a diferença entre os fluxos de saída e os fluxos de entrada em s deve ser justamente $n-1$. O segundo grupo de restrições (3) modela o balanço de fluxo em cada um dos nós da rede, com exceção de s. Os nós contemplados com uma restrição do tipo (3) são caracterizados por serem nós de demanda e cada um deles tem demanda por uma unidade de fluxo, já que a diferença entre os fluxos de saída e de entrada em cada um deles é justamente -1. Por convenção, o balanço de fluxo em nós de suprimento é positivo e, em nós de demanda, tal balanço é negativo (AHUJA *et al*., 1993). As restrições (4) indicam a natureza das variáveis de decisão.

De forma resumida, o nó de origem deve mandar $n-1$ unidades de fluxo para os demais nós da rede, e esses, por sua vez, devem ser supridos com uma unidade de fluxo cada. A resolução do problema (1-4) fornece o caminho com o menor peso total associado. Apesar de poder ser resolvido por métodos genéricos de programação linear inteira binária como o *branch-and-bound* (HILLIER, 2013), o problema do caminho mínimo pode ser resolvido de forma bastante eficiente pelo algoritmo de Dijkstra descrito a seguir.

2.5 Algoritmo de Dijkstra

Para resolver o problema do caminho mínimo usa-se o algoritmo de Dijkstra apresentado na Figura 2.2. Este algoritmo é de simples entendimento e utilização. O caminho mínimo pode ser em termos de tempo, distância ou custo, a depender dos pesos incluídos na matriz de adjacências A. A ideia do algoritmo é identificar sucessivamente o caminho mais curto para cada um dos nós da rede na ordem ascendente de menor peso a partir da origem s e, assim, encontra a solução quando todos os nós do grafo são visitados (rotulados). Sabendo-se o nó de destino de interesse (t), recupera-se o caminho mínimo de s a t a partir de operações recursivas envolvendo t e seus predecessores. O predecessor do i-ésimo nó do grafo é armazenado em $pred(i)$. Na Figura 2.2., considera-se, sem perda de generalidade, $t = n$, em que n é o último nó da rede. O peso associado ao caminho mínimo de s a um nó i qualquer da rede é dado por $dist(i)$. Se o nó destino de interesse é n, o peso mínimo relativo ao caminho ótimo de s a n é obtido a partir de $dist(n)$.

Figura 2.2 – Algoritmo de Dijkstra

```
DIJKSTRA (A, n, s, M)
    R ← ∅                                                    inicialização
    NR ← {1, 2, ..., n}
    dist (s) ← 0
    pred(s) ← 0
    Para cada j ∈ NR – {s}                                   parte principal do algoritmo
      dist(j) ← M
      pred(j) ← n + 1
    Enquanto |NR| > 0:
      i ← j ∈ NR associado à mínima distância, min_{j ∈ NR}{dist(j)}
      R ← R ∪ {i}
      NR ← NR - {i}
      Para j = 1, ..., n
      Se dist(j) > dist(i) + A (i, j):                       atualização de distância
          dist(j) ← dist(i) + A (i, j)                       atualização de predecessor imediato
          pred(j) ← i
    cam ← n                                                  recuperação do caminho de s a n
    k ← n
    Enquanto k ≠ s
      k ← pred(k)
      cam ← {k} ∪ cam
    Retornar dist e cam
```

Fonte: Adaptado de Arenales (2015)

2.6 Revisão da Literatura

Nesta pesquisa, busca-se produzir possibilidades para os eventos de contingências que são consequências de movimentos sociais na área da região estudada e para escoar a produção de minério de ferro na Estrada de Ferro Carajás. Sendo assim, para escolher um novo caminho ou rota alternativa, escolhe-se o aquele que apresenta o menor valor em termos de algum critério (ex. custo, distância, tempo) por meio do algoritmo de Dijkstra.

Dijkstra (1959) analisa o problema do caminho mínimo entre dois nós de um grafo e, neste trabalho, o autor propõe o algoritmo do caminho curto que ficou conhecido como algoritmo de Dijkstra. Esse algoritmo tem sido utilizado em diversos contextos como na produção (Xi, 2012), em redes de computadores (Murthy & Olson, 1991; Peyer, 2009, Wu *et al*., 2011; Peng *et al*., 2012) em transportes urbanos para escolhas de rotas (Niksirat *et al*., 2012; Wu *et al*., 2011), no transporte logístico (Vivaldini *et al*., 2009; Hu, 2011) e ainda em redes sociais Viana (2012). Silva *et al*. (2010) fazem a roteirização dos caminhos turísticos na cidade de Ouro Preto. Os autores obtêm o caminho mínimo entre a cidade e pontos turísticos selecionados também utilizando o algoritmo de Dijkstra.

Camelo *el at*. (2009) testa, modela e remodela, se necessário for, o sistema de carregamento do minério de ferro inserindo para tal a teoria das filas para alocação de chegada e embarque do produto nos três píeres existentes. Com o uso de técnicas de teoria das

filas os autores simularam tal carregamento em diversas áreas de estudo (Porto Ponta da Madeira, Estrada de Ferro Carajás). Apesar de contexto de aplicação similar, esta pesquisa está relacionada ao transporte de minério e não à etapa de carregamento do minério em pontos específicos da rede.

Hu (2011) afirma que a logística de emergência surge como uma forma de sanar deficiências do sistema logístico analisado no que se refere à recuperação após a ocorrência de uma contingência. A contingência reporta a vulnerabilidade do sistema de transporte (Mattsson, 2015). A vulnerabilidade no sistema de transporte é uma suscetibilidade a incidentes que podem resultar em reduções consideráveis no que diz respeito à continuidade do processo de transporte, além de poder afetar a durabilidade da infraestrutura dos modais envolvidos. Nesta pesquisa as contingências estão associadas a interrupções por movimentos sociais e é avaliada a viabilidade de escolha de rota e modal alternativos para escoar a produção de minério de ferro.

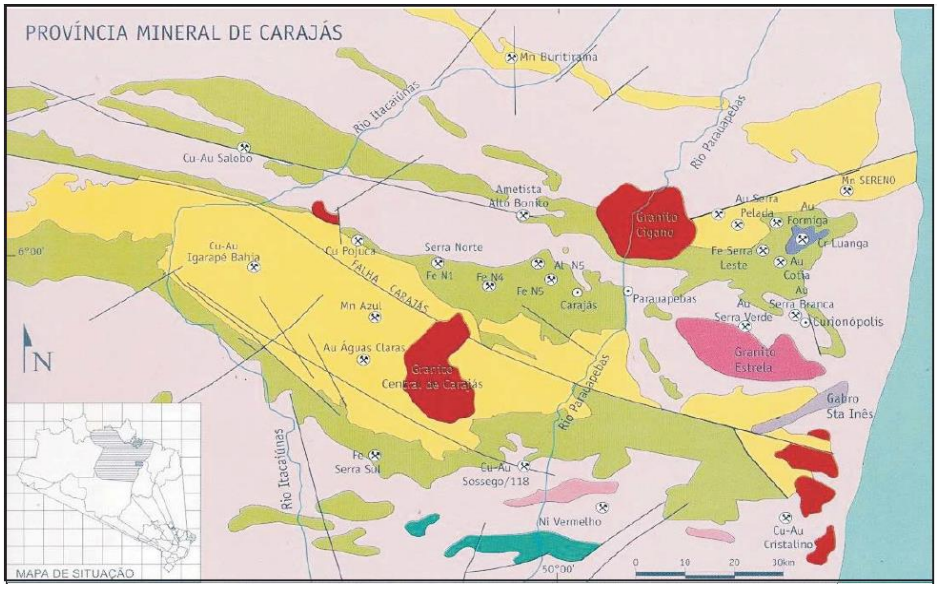
Para Chandrasheker (2013), a escolha de destinos dentro da rede por mais simples que seja, deve levar em conta parâmetros de conectividade, capacidade e demora. A conectividade refere-se à escolha pelo modal adequado para o trecho a ser usado; a capacidade está associada à substituição do principal modal por um alternativo após ocorrência de contingência para a continuidade do processo; a demora está associada a análises de custo-benefício, já que modais mais rápidos, em geral, são mais caros.

Vugrin & Turnquist (2012) dizem que a estrutura de uma rede envolve três capacidades relacionadas, sendo elas: capacidade absortiva, relacionada à capacidade de resistir a contingências; a capacidade adaptativa, associada às formas em que os fluxos da rede podem ser acomodados por caminhos alternativos; e a capacidade restaurativa, relativa à rápida recuperação após a ocorrência de uma contingência. Este trabalho, portanto, está associado à capacidade adaptativa da rede de transporte de minério de ferro no Norte do Brasil, já que busca sugerir rotas alternativas, envolvendo diferentes modais quando há ocorrência de interrupções nas vias por conta de movimentos sociais.

3 MODELAGEM DA REDE DE TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO

A Província Mineral de Carajás (Figura 3.1), descoberta ainda na década de 1960 e explorada até os dias de hoje por diversas companhias mineradoras que possuem logísticas distintas para o escoamento do minério de ferro. O minério de ferro retirado das minas passa por uma série de etapas de beneficiamento o qual permitirá ter os requisitos necessários à exportação, quando então é transportado aos portos por modais ferroviários (até o porto Ponta da Madeira) e rodoviários (até o porto Vila do Conde). A movimentação do beneficiamento, interna às minas, não será considerada na modelagem.

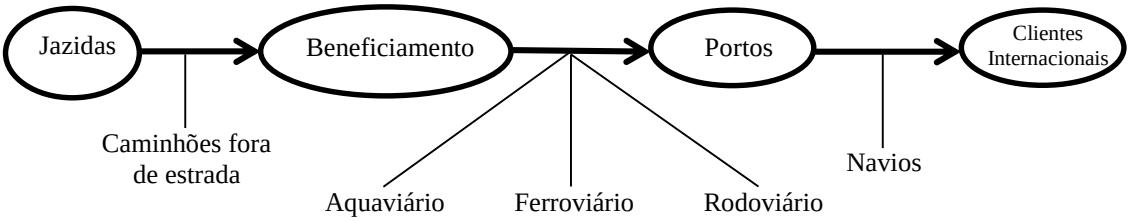
Figura 3.1 – Mapa Geológico simplificado da Província Mineral de Carajás



Fonte: Província Mineral de Carajás

Esta pesquisa apresenta uma versão simplificada da cadeia de suprimento do minério de ferro o qual está representada na Figura 3.2. A cadeia do minério de ferro se divide no material que é extraído nas **jazidas** por máquinas de grande capacidade e logo são transportados para **beneficiamento** por meio de caminhões fora de estrada (Figura 3.3). Nesse processo são retiradas as impurezas na composição do minério de ferro. Em seguida é realizado o **transporte** por modais até o porto, que distribuirá o minério de ferro ao **consumidor final** (principalmente clientes da Europa e Ásia) por modal aquaviário.

Figura 3.2 – Fluxograma da cadeia de suprimento



Fonte: esta pesquisa (2016)

O minério de ferro utiliza-se pouco do modal rodoviário para o transporte, o qual se limita, frequentemente, a pequenos percursos para os deslocamentos dentro das minas, quando geralmente são usados caminhões de grande porte denominados “fora de estrada” (Figura 3.2). Já os utilizados fora das minas são caminhões comerciais de grande capacidade tais como as carretas “bitrem” (ABNT-NBR 7501.2003), esse tipo de caminhão é utilizado no transporte de certa quantidade de minério ferro no trecho de Marabá até o porto Vila do Conde por uma das mineradoras existentes e pesquisadas neste trabalho.

Os caminhões comuns são aqueles que podem trafegar dentro e fora das minas, transportando a matéria bruta, material acabado e/ou beneficiado. Já os “fora de estrada” possuem tal denominação por apenas trafegarem dentro das minas a baixa velocidade. Devido à grande quantidade de minério que transportam, estes veículos são divididos em dois grupos: os de 240 e 400 toneladas.

Figura 3.3 – Caminhão fora de estrada

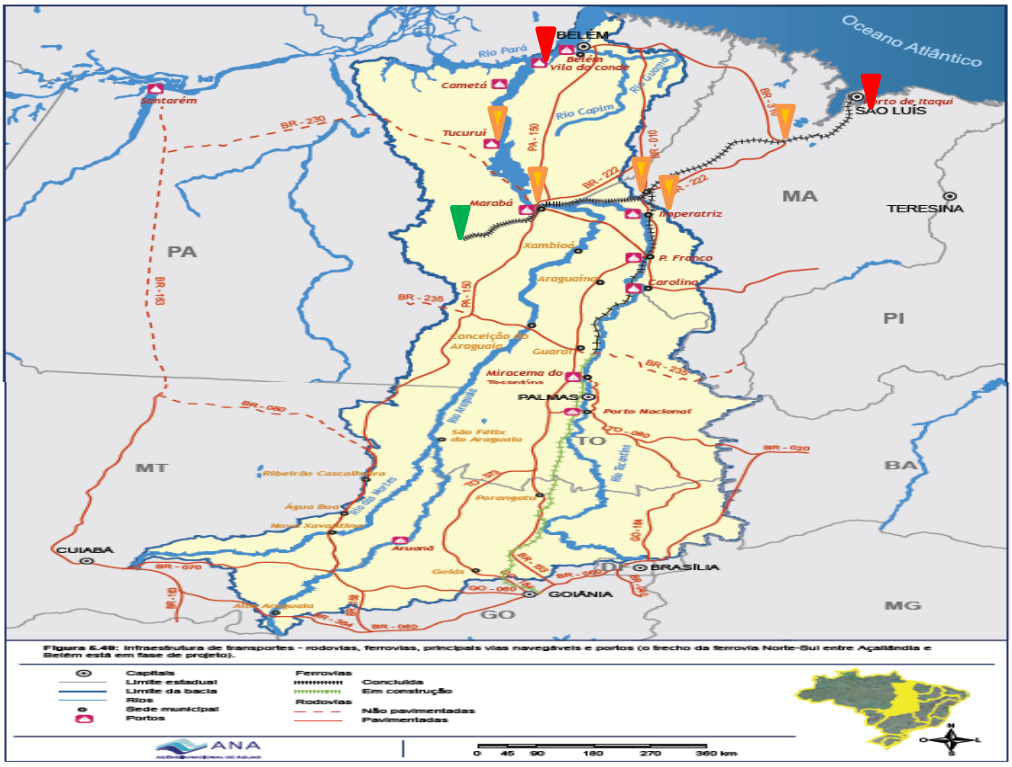
Fonte: Relatório Vale (2015)

Entende-se então, que no deslocamento de uma origem para o destino na cadeia de suprimento é necessário utilizar um ou vários modais. No deslocamento da jazida para o local de beneficiamento é utilizado o modal rodoviário mesmo sendo um pequeno deslocamento de poucos quilômetros. Do beneficiamento até o porto é possível realizar o transporte por diversas combinações de modais, ou simplesmente por apenas um modal, sejam eles ferroviário, rodoviário ou aquaviário.

Observa-se na Tabela 2.4, a dimensão da região Norte, bem como os modais envolvidos no escoamento de *commodities*, sejam grãos ou minérios extraídos na região. A Figura 3.3, mostra o cenário de estudo e exemplifica quais caminhos e modais estão em utilização e que existem, mas não são utilizados. Por exemplo, visualiza-se trecho da ferrovia atualmente utilizada para o transporte de minério de ferro de Marabá ao Porto Ponta da Madeira, que apesar de não estar indicado no mapa, é bastante próximo do Porto de Itaqui no Maranhão. Um exemplo para uma dessas situações reais é a estrada de ferro existente entre a cidade de Imperatriz e Açailândia, porém não é utilizada para o transporte de minério de ferro.

Nota-se que o mapa da Figura 3.4 não discrimina informações de distância, tempo ou custo por trecho. Essas informações estão detalhadas no Capítulo 3. Nota-se ainda que, quando diferentes modais são considerados, deve-se levar em conta a intermodalidade e o transbordo entre eles. Mesmo entendendo que transbordo envolve o armazenamento e a movimentação do produto nos pátios ou nos armazéns, esta pesquisa não considerou os custos e tempos envolvidos nessas atividades em nenhuma das etapas.

Figura 3.4 – Infraestrutura de Transporte no Norte Brasileiro



Fonte: Relatório da ANA (2015).

Hoje a mineradora responsável pelo transporte do minério possui mais de 284 locomotivas e 18.690 vagões (CNT, 2016). As locomotivas em operação na EFC são de vários modelos e dois fabricantes: GE (Figura 3.4) e EMD, com potências variadas de 3300

HP a 6000 HP, conforme dados descritos na Tabela 3.1. Nessa tabela há também o tempo de vida em operação de cada locomotiva.

Tabela 3.1 - Locomotivas Estrada de Ferro Carajás

Locomotivas				
Modelo	**Fabricante**	**Potência (HP)**	**Idade de uso (anos)**	**Quantidade em uso**
C36	**GE**	**3950**	25	37
Dash 8		**4000**	22	4
Dash 9		**4400**	6	89
ES58ACI		**6000**	1	36
SD40	**EMD**	**3300**	25	27
SD60		**4100**	19	2
SD70		**4300**	5	55
SD80		**5800**	0	7
TOTAL				**257**

Fonte: Adaptado revista ANTF, 2013.

Figura 3.5 - Locomotiva GE modelo C44-9WM da EFC, com rodagem C-C

Fonte:http://www.antf.org.br/images/stories/informacoes-do-setor/material-rodante /Locomotiva -C44-9WM-EFC-808.jpg

A empresa do Norte do país que transporta o minério de ferro possui o seu próprio método de embarque por empilhadeiras com mais de 15 m de altura que são capazes de fazer montanhas de estocagem. No desembarque é utilizado um viradouro que gira 180º em torno do próprio eixo despejando em silos todo o minério que será transportado por esteiras até a área de armazenagem (NOVAES, 2007).

Quando se faz uso do modal ferroviário utiliza-se a estrada de ferro Carajás que compreende o itinerário de origem em Carajás passando por Marabá, Açailândia, Santa Inês até chegar ao destino de porto Ponta da Madeira. Ao utilizar o modal rodoviário levam-se em

consideração as rodovias federais e municipais que compreendem o itinerário de origem em Carajás passando por Marabá até chegar ao destino de porto de Vila do Conde.

O itinerário existente e não utilizado para transporte de minério de ferro nas ferrovias compreende o trecho existente entre Imperatriz e Açailândia. Menciona-se que existe um planejamento do governo federal de ampliar esta via ferroviária de Açailândia até o porto Vila do Conde (ANTT, 2016) que compreende 477 quilômetros da Ferrovia Norte-Sul. O estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental dessa obra já foi concluído.

Na região de estudo há muitas rodovias nos cenários do trabalho, mas que hoje existem e não são utilizadas por diversos motivos, dentre entre eles o mais comum é a má conservação das rodovias principalmente as municipais e estaduais: 1) Marabá a Tucuruí, 2) Marabá a Imperatriz, 3) Marabá a Açailândia, 4) Tucuruí ao porto Vila do Conde, 5) Açailândia a Imperatriz, 6) Açailândia ao porto Vila do Conde, 7) Açailândia a Santa Inês, 8) Santa Inês ao porto Vila Conde, 9) Santa Inês ao porto Ponta da Madeira e 10) porto Ponta da Madeira ao Porto Vila do Conde.

No cenário aquaviário, todo o trajeto de origem em Marabá e destino ao porto Vila do Conde com passagem em Tucuruí por conta da eclusa é um planejamento para o transporte de minério de ferro e grãos previsto pela Agência Nacional de Água – ANA, 2009. Esse projeto estende-se desde a região Centro-Oeste. Dessa maneira, todas as vias aquáticas consideradas nesta pesquisa ainda não são existentes. Serão analisadas as situações em que há interrupção das vias externas às minas (ferrovias e rodovias) usadas no escoamento de minério até os portos Ponta da Madeira e Vila do Conde.

Os parâmetros necessários para modelagem da rede de transporte estão na Tabela 3.2. Na Tabela 3.2 equiparam-se os três modais quanto ao tipo de equipamento utilizado e o custo. Essa equivalência de custo demostra de uma forma simples qual terá um melhor aproveitamento em relação ao tipo de equipamento usado.

Tabela 3.2 – Equivalência de transportes

Modais	***Aquaviário***	***Ferroviário***	***Rodoviário***
Quantidade de equipamento para transportar 1000ton	**1 empurrador e 1 balsa**	**1 locomotiva e 50 vagões**	**17 cavalos mecânicos Bitrem**
Custo (R$/km) Tonelada por km transportado	**0,009**	**0,016**	**0,147**

Fonte: Adaptado do Guia log Art 383 - Dergo, Valec, Ahitar/MT

O principal modal utilizado para transportar o minério é a ferrovia e as alternativas são os modais aquaviário e rodoviário. Segundo Branco (2015), um barco autopropelido de 4400t

transporta o equivalente a 110 vagões com 40t cada ou 220 caminhões de 20t cada. Deve-se ainda considerar o congestionamento causado por tamanha coluna de caminhões que podem chegar a 22 km de extensão. Após se analisar a Figura 3.2, que ilustra a equivalência transportada entre os modais, o meio alternativo de transporte mais adequado seria o aquaviário. Além disso, é menos poluente.

Figura 3.6 – Equivalência transportada entre os modais

Fonte:http://www.tecnologistica.com.br/portal/artigos/69038/o-transporte-aquaviario-brasileiro/

Atualmente são utilizados quatro locomotivas para o deslocamento de 307 vagões que transportam cerca de 31.800t, de acordo com a proporção da Figura 3.6. Para o transporte dessa carga realizado pela balsa, seriam necessárias oito balsas. E estendendo esse cálculo, para o mesmo quantitativo de minério de ferro transportado em caminhões, seriam necessários 558 caminhões.

Na Figura 3.7, são mostrados, para cada trecho, o tempo em horas, a distância em quilômetros e ainda o custo em reais. Também é observado que cada aresta é representada pela cor correspondente ao modal utilizado e o tipo de linha indica se a ligação é existente ou não existente, porém sem uso atual para transporte de minério de ferro ou planejada.

Para se encontrar os valores de tempo e custo da Figura 3.7 foram utilizadas as fórmulas a seguir com o auxílio da Tabela 3.2, a qual apresenta os valores de custo, em reais, de transporte de uma tonelada por quilômetro por modal:

- **Fórmula do tempo:**

$$t_{ij}^{m} = \frac{d_{ij}}{v_m},$$

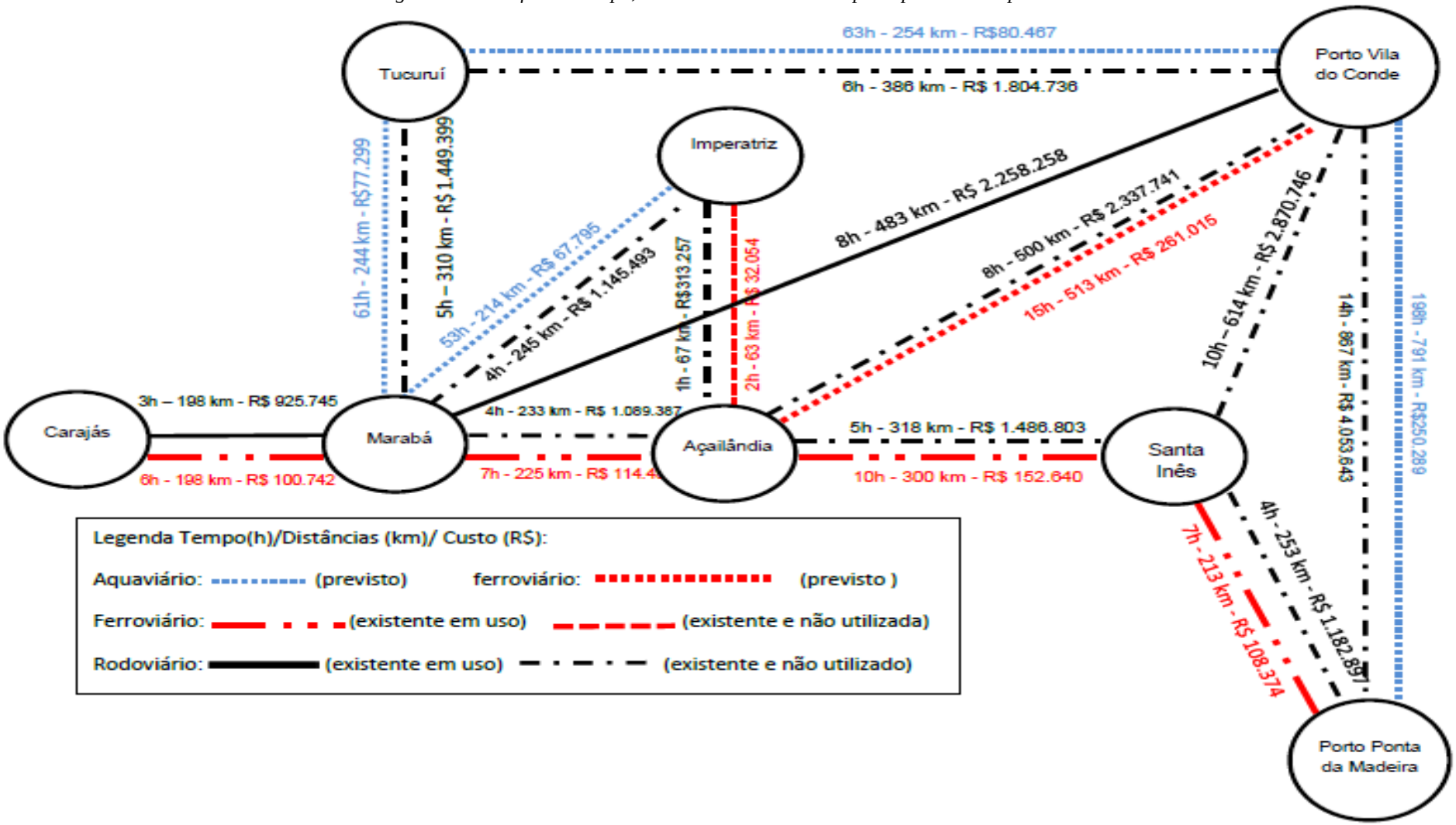
em que t_{ij}^{m} é o tempo de deslocamento do trecho (i,j) por meio do modal m, em que m é A, F, ou R, para aquaviário, ferroviário ou rodoviário, respectivamente; d_{ij} é a distância entre os nós i e j; v_m é a velocidade média do modal m, para m = A, F ou R.

- **Fórmula do custo:**

  $c_{ij}^{m} = d_{ij} \cdot c_m \cdot 31.800$,

  em que c_{ij}^{m} é o custo de transportar 31.800 toneladas de minério de ferro utilizando o modal m = A, F, ou R no trecho (i,j) e é dado em R$; c_m é o custo de transportar uma tonelada de minério de ferro por um quilômetro utilizando o modal m. Os valores de c_m estão apresentados na Tabela 3.1.

Figura 3.7 – Grafo com tempo, distância e custo de transporte por trecho e por modal



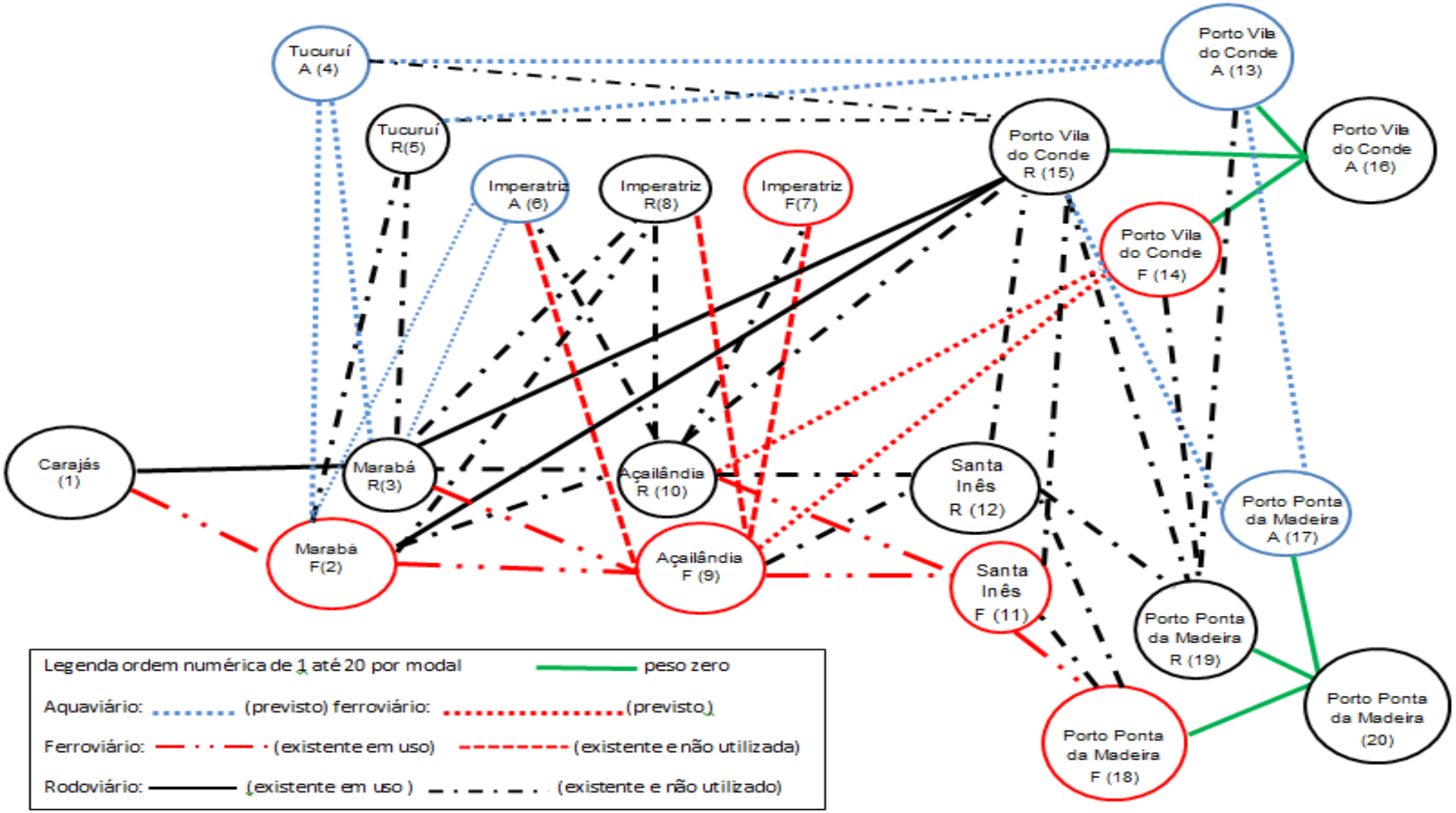
Fonte: esta pesquisa (2016)

O grafo apresentado na Figura 3.7 apresenta arestas distintas com o mesmo par de nós inicial e final. Por exemplo, de Carajás a Marabá, há duas alternativas: ferrovia ou rodovia. Com o intuito de adequar o grafo para utilização no algoritmo de Dijkstra, nós fictícios foram criados para que cada par de nós estivesse associado a uma única aresta. O grafo resultante após esse tratamento está apresentado na Figura 3.8.

Os nós referentes a Marabá, Tucuruí, Açailândia, e Santa Inês foram transformados em dois nós e os nós associados a Imperatriz, Porto Vila do Conde e Porto Ponta da Madeira foram transformados em três. As letras A, F e R em cada nó indicam os modais aquaviário, ferroviário e rodoviário, respectivamente. O número entre parênteses em cada nó indica o rótulo do nó para o algoritmo de Dijkstra e também para codificação dos resultados no Capítulo 4. Os nós de destino de interesse, porto Ponta da Madeira (20) e porto Vila do Conde (16), estão ligados aos três nós correspondentes (13, 14, 15) e (17, 18, 19). O valor da distância, tempo e custo nessas ligações é nulo e são usadas apenas para efeitos de modelagem. Tome-se como exemplo a aresta correspondente aos nós (3) e (6), ou seja a ligação aquaviária entre Marabá e Imperatriz: parte-se de um ponto de transbordo do modal rodoviário para aquaviário em Marabá para Imperatriz por via aquática. Ou, de forma inversa, parte-se de Imperatriz, por via aquática até um ponto de transbordo do modal aquaviário para rodoviário localizado em Marabá. Ressalta-se que, se o caminho ótimo envolver dois ou mais modais, não são computados os custos e os tempos de transbordo.

As matrizes de adjacências com distância, custo e tempo utilizadas como entrada para o algoritmo de Dijkstra estão nos Apêndices 1, 2 e 3, respectivamente. Essas matrizes estão relacionadas ao cenário sem contingências e os valores altos (10.000 ou mais) indicam a inexistência de ligação entre os nós correspondentes.

Figura 3.8 – Grafo da rede de transporte adaptado para utilização do algoritmo de Dijkstra



Fonte: esta pesquisa (2016)

3.1 Cenários de contingência analisados

Atualmente, o transporte segue o seu percurso normal do pátio de estocagem na Serra de Carajás – PA, por meio do modal ferroviário até o porto Ponta da Madeira – MA. Durante o trajeto existe a possibilidade de interdição pelos movimentos sociais indígenas e movimentos sociais dos Sem Terra – MST, apesar de serem movimentos diferentes, agem da mesma maneira bloqueando a ferrovia com troncos, pneus e pessoas que na sua maioria são mulheres e crianças. Quando isso ocorre o prejuízo é contabilizado pela mineradora em milhões.

Os eventos de interdição ocorrem normalmente em Marabá-PA e Parauapebas-PA (MST) e Bom Jesus do Tocantins – PA (Índios – kyikatejê, denominado Gaviões) e Alto Alegre do Pindaré – MA (Índios Guajajara). Quando ocorrem antes de Marabá não é possível planejar o escoamento por modal aquaviário. Após Marabá, o modal aquaviário pode ser considerado como alternativo, desde que exista a implantação do projeto da Hidrovia Araguaia-Tocantins. Dessa maneira, será possível usar o modal aquaviário com balsas de baixo calado no rio Tocantins a partir da Cidade de Marabá até o porto Vila do Conde., passando pela eclusa de Tucuruí. Essa será uma rota prevista para o escoamento de minério de ferro, caso haja manifestações na EFC, atualmente administrada pela mineradora que tem autorização e licença do Governo Federal para exploração do minério de ferro e utilização da ferrovia. Os cenários a seguir são analisados neste trabalho:

- Cenário 0 – Sem contingências, ou seja, não há trechos interrompidos na rede.
- Cenário 1 – Trecho ferroviário Carajás-Marabá interrompido
- Cenário 2 – Trecho ferroviário Marabá-Açailândia interrompido
- Cenário 3 – Trecho ferroviário Açailândia-Santa Inês interrompido
- Cenário 4 – Trecho ferroviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompido
- Cenário 5 – Trechos ferroviário e rodoviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompidos
- Cenário 6 – Trechos ferroviário e rodoviário Açailândia-Santa Inês interrompidos
- Cenário 7 – Trechos ferroviário e rodoviário Marabá-Açailândia interrompidos

Para a simulação de possíveis contingências, representadas pela interrupção de determinado trecho ligando dois nós, os valores de distância, tempo e custo correspondentes

são substituídos por um valor muito grande (10000 ou mais) nas respectivas matrizes de adjacências. Essa substituição representa a interrupção e garante que o caminho ótimo não conterá o trecho interrompido, pois o programa R-Studio visa o caminho mais curto conforme já descrito algoritmo de Dijkstra Figura 2.2.

A análise dos cenários em questão dá-se pela facilidade de possível transbordo nas cidades para o modal alternativo. Apesar do transbordo não ter sido colocado na análise do custo e no tempo de execução do trabalho de transbordo, foi vista a melhor condição para a mudança se necessária.

Existem diversos cenários para serem analisados, mas não foram, analisados por se tornarem repetitivo. Um cenário em especial deveria ser usado e não foi que seria o de não funcionamento do porto Ponta da Madeira, este cenário reformularia todo o contexto, logo seria necessário a criar os cenários alternativos para que todos os resultados determinasse o Porto Vila do Conde.

Quando se quer analisar a tomada de decisão no tempo zero do deslocamento este deve ser visto em cada ponto de possível transbordo. Exemplo, analisarmos quando vamos deslocar de Carajás para Marabá, seja ferroviário ou rodoviário. Esta análise é possível devido ao sistema em tempo real de comunicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente, o principal modal utilizado é o ferroviário, que requer um tempo de 30 horas de Carajás até o porto Ponta da Madeira para percorrer uma distância de 936 km ao custo de R$ 476.246,00 por cada trem cargueiro que transporta 31.800 toneladas por viagem. Esse caminho é ótimo em termos de distância, conforme mostra a Tabela 4.1. Os resultados dessa tabela correspondem ao cenário sem contingências e em função de cada critério (tempo, distância ou custo).

Tabela 4.1 – Cenário 0 – sem interrupções

Critérios	Caminho	Modal	Tempo (h)	Distância (km)	Custo (R$)
Tempo	1, 3, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	16	1.002	4.684.802,00
Distância	1, 2, 9, 11, 18, 20	Ferroviário	30	936	476.246,00
Custo	1, 2, 6, 9, 11, 18, 20	Ferroviário – Aquaviário	78	988	461.605,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Nesta Tabela 4.1 o qual representa o cenário 0 que trata sobre a pesquisa em seu estado sem interrupções, ou seja, sem contingência. O critério distância é o transporte nos dias de hoje com o tempo e custo real para o modal ferroviário. Nesta Tabela 4.1 verifica-se com o uso do programa R-Studio encontra cada caminho em função do critério aplicado, e aponta um caminho diferente possibilitando a análise e tomada de decisão para o todo.

Como base nos resultados obtidos, tem-se a necessidade de fazer a contingência dos modais para a utilização nos dias de necessidades, ou ainda, planejar se necessário for uma forma alternativa de escoamento do minério de ferro para atender a necessidade do consumidor final na Europa ou Ásia.

Quando a escolha é com base no critério tempo, o caminho será percorrido por caminhões (1, 3, 10, 12, 19, 20) com origem em Carajás passando em Marabá, Açailândia, Santa Inês e chegando ao destino porto Ponta da Madeira, cumprindo o deslocamento em 16 horas. Já quando se escolhe o critério tempo, o custo associado é praticamente 10 vezes o custo relativo ao caminho de menor custo, porém a distância aumenta para 1002 km, resultando uma diferença de 66 km adicionais, se o critério escolhido for a distância, e 14 km a mais se o critério escolhido for o custo.

Se o critério selecionado for a distância, o transporte de minério será realizado por modal ferroviário, conforme comentado anteriormente. O caminho de menor distância é 14

horas mais lento quando comparado ao caminho de critério de tempo e 48 horas mais rápido se o critério fosse o custo.

Quando o custo é o critério adotado, o caminho será realizado pelos modais ferroviário, e aquaviário (1, 2, 6, 9, 11, 18, 20) com origem em Carajás passando em Marabá, Imperatriz, Açailândia, Santa Inês e chegando ao destino porto Ponta da Madeira, perfazendo um tempo de 78 horas sendo 48 horas a mais em relação ao critério distância e 62 horas a mais se o critério fosse tempo. Fazendo a comparação de distância, este caminho é 52 km maior em relação ao caminho mais curto e 14 km maior que o caminho de menor tempo.

As Tabelas 4.2 a 4.8 descrevem os cenários de contingência listados na Seção 3.1. A interpretação de cada uma delas pode ser feita de forma análoga à descrita anteriormente para a Tabela 4.1. No entanto, cada tabela transmite a importância e a sua particularidade referente de interdição ocorrido.

Tabela 4.2 - Cenário 1 - Trecho ferroviário Carajás-Marabá interrompido

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	16	1002	4.684.802,00
Distância	1, 3, 9, 11, 18, 20	Rodoviário - Ferroviário	27	936	1.301.239,00
Custo	1, 3, 6, 9, 11, 18, 20	Rodoviário – Ferroviário – Aquaviário	75	988	1.286.608,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.3 - Cenário 2 – Trecho ferroviário Marabá-Açailândia interrompido

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	16	1002	4.684.802,00
Distância	1, 2, 10, 11, 18, 20	Ferroviário – Rodoviário	27	944	1.451.143,00
Custo	1, 2, 6, 9, 11, 18, 20	Ferroviário – Aquaviário	78	988	461.605,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.4 - Cenário 3 - Trecho ferroviário Açailândia-Santa Inês interrompido

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	16	1002	4.684.802,00
Distância	1, 2, 9, 12, 18, 20	Ferroviário - Rodoviário	29	954	2.884.892,00
Custo	1, 2, 4, 13, 17, 20	Ferroviário - Aquaviário	328	1.487	508.797,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.5 - Cenário 4 - Trecho ferroviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompido

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	16	1002	4.648.802,00
Distância	1, 2, 9, 11, 19, 20	Ferroviário - Rodoviário	27	976	1.550.759,00
Custo	1, 2, 4, 13, 17, 20	Ferroviário - Aquaviário	328	1.487	508.797,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.6 - Cenário 5 – Trechos ferroviário e rodoviário Santa Inês-Porto Ponta da Madeira interrompidos

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 15, 19, 20	Rodoviário	25	1.548	7.237.646,00
Distância	1, 2, 15, 17, 20	Ferroviário - Rodoviário - Aquaviário	212	1.472	2.609.289,00
Custo	1, 2, 4, 13, 17, 20	Ferroviário - Aquaviário	328	1.487	508.797,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.7 - Cenário 6 – Trechos ferroviário e rodoviário Açailândia-Santa Inês interrompidos

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 15, 19, 20	Rodoviário	25	1.548	7.237.646,00
Distância	1, 2, 15, 17, 20	Ferroviário - Rodoviário - Aquaviário	212	1.472	2.609.289,00
Custo	1, 2, 4, 13, 17, 20	Ferroviário - Aquaviário	328	1.487	508.797,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

Tabela 4.8 - Cenário 7 – Trechos ferroviário e rodoviário Marabá-Açailândia interrompidos

Critérios	***Resultado da rota***	***Modal***	***Tempo(h)***	***Distância (km)***	***Custo (R$)***
Tempo	1, 3, 8, 10, 12, 19, 20	Rodoviário	17	1081	4.654.195,00
Distância	1, 2, 6, 9, 11, 18, 20	Ferroviário – Aquaviário	78	988	461.605,00
Custo	1, 2, 6, 9, 11, 18, 20	Ferroviário – Aquaviário	78	988	461.605,00

Fonte: esta pesquisa (2016)

No cenário 1, de acordo com o critério **tempo**, encontra-se a rota (1, 3, 10, 12, 19, 20) a ser realizada pelo modal rodoviário. Nota-se que esta é a mesma rota ótima do cenário 0 para o mesmo critério. De fato, ela permanece inalterada nos cenários 1 a 4 porque trechos ferroviários não fazem parte da rota ótima segundo o **tempo** quando não há contingências (ver Tabelas 4.2 a 4.5 para critério **tempo**). Ao se considerar a tomada de decisão com base no **tempo**, os cenários 5 e 6 são os que se destacam de forma negativa, pois eles possuem o maior tempo (25 h) para conclusão do transporte do minério de ferro.

Já quando o critério no cenário 1 for **distância,** a rota sugerida é (1, 3, 9, 11, 18, 20) e são necessários dois modais, o rodoviário e ferroviário, para realização da mesma tarefa do cenário 0. Observa-se que a distância percorrida é a mesma quando comparada à do cenário 0, já que os trechos ferroviário e rodoviário Carajás-Marabá têm a mesma extensão. A rota ótima, segundo o critério **distância**, muda em todos os cenários, com exceção dos cenários 5 e 6 que apresentam a mesma sequência de cidades e modais. Isso significa que, para esse critério, as contingências analisadas têm efeito sobre a melhor rota. Ainda, os cenários 5 e 6 (Tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente) apresentaram a maior rota, aproximadamente 57% maior que a rota ótima do cenário 0 para o mesmo critério. Além disso, ela requer os três modais para ser executada.

O **custo** é o critério mais comumente adotado no meio empresarial. Nesse sentido, os cenários 2 e 7 apresentaram o mesmo caminho ótimo em termos de **custo** que o cenário sem contingências (cenário 0), já que os trechos interrompidos em 2 e 7 não alteraram a configuração do caminho ótimo obtido no cenário 0. Quando analisada qual decisão será a melhor para o transporte de minério de ferro, a utilização do modal aquaviário em conjunto com os outros modais considerados foi apontado como uma opção interessante em termos de custo. O cenário de contingência que apresenta o caminho ótimo em termos de **custo** com o maior valor é o cenário 1 (cerca de 2,7 vezes o **custo** da rota ótima para o mesmo critério no cenário 0). Isso indica que a interrupção do trecho ferroviário Carajás-Marabá tem alto impacto sobre o **custo** do transporte de minério de ferro. Todos esses fatores só são possíveis de comparar devido ao melhor cenário constante na Tabela 4.1, que apresenta as rotas de menor tempo, distância e custo.

Além desses cenários mencionados nas Tabelas 4.1 até 4.8, se fosse levado em consideração às demais cidades envolvidas nos trajetos, seriam possíveis outros cenários de contingências para o modal aquaviário, rodoviário e ferroviário. Mas essas demais cidades não foram consideradas, por não serem entroncamentos de rodovias importantes e possíveis áreas de transbordo.

5 CONCLUSÃO

Com a análise de todos os parâmetros da pesquisa sobre a logística em casos de contingências nas interrupções do caminho em função do modal principal para o transporte de minério de ferro, aplicou-se o problema do caminho mínimo. A escolha do caminho mínimo para a aplicação da modelagem se dá por meio do processo de identificações dos nós e arestas. Nesse caso, cada nó foi representado por uma cidade ou um porto, a saber: Carajás, Marabá, Imperatriz, Açailândia, Tucuruí, Santa Inês, porto Vila do Conde e porto Ponta da Madeira. Após essa primeira etapa de identificação dos nós, foram observadas as possíveis ligações entre eles levando-se em conta infraestrutura existente e planejada, além do tipo de modal (aquaviário, ferroviário ou rodoviário).

Diferentes situações de contingência foram analisadas. Propôs-se inicialmente a interrupção de um trecho e depois por mais de um trecho. Verificou-se que os modais se alternam em função dos critérios analisados de tempo, distância e custo.

A utilização dos modais aquaviário, ferroviário e rodoviário, será possível dentro de diversas escolhas de critério, tempo de transporte, distância percorrida e custo. No entanto, o modal aquaviário não necessariamente é o mais aceitável por conta da sazonalidade em recursos de navegação pelo rio Tocantins (ANA, 2015) e por conta da demora de deslocamento do modal.

5.1 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Das limitações encontradas ao realizar esta pesquisa, pode-se mencionar a falta de dados públicos, pois as empresas que exploram a extração e o transporte do minério de ferro são privadas, porém com autorização do Governo Federal, DNPM (2015), o que dificulta uma melhor precisão em dados coletados atuais para a pesquisa.

A desconsideração dos custos de transbordo nesta pesquisa é também uma limitação e levar em conta esses custos é uma possibilidade de tornar a modelagem da rede de transporte mais próxima da realidade. Para tanto, pode-se modificar a função objetivo para que ela incorporar o custo de espera e de transbordo quando há mais de um modal envolvido no transporte de minério de ferro. Além disso, uma abordagem multi-objetivo seria interessante, já que os critérios analisados individualmente são claramente conflitantes.

REFERÊNCIAS

AHUJA, Ravindra K.; MAGNANTI, Thomas L.; ORLIN, James B. Network flows: theory, *algorithms, and applications.* 1993.

Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC disponível em: http://www.anac.gov.br/A_Anac/o-que-fazemos. Acessado em 28 de julho de 2016.

Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC drones disponível em: http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones. Acessado em 01 de setembro.

Agência Nacional de Transporte Terrestre. Disponível em http://www.antt.gov.br /index.php/content/view/4734.html

Agência Nacional de Transporte Aquaviário - ANTAQ disponível em: http://www.antaq. gov.br/Portal/PDF/RegimentoInterno2014.pdf. Acessado em 30 de julho de 2016.

ANUÁRIO CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE 2016. – ESTATÍSTICAS CONSOLIDADAS. Disponível em http://anuariodotransporte.cnt.org.br/Aquaviario/3-1- /Principais-dados. Acessado em 04/06/2016.

ARENALES, Marcos; ARMENTANO, Vinicius; MORABITO, Reinaldo; YANASSE, Horácio Hideki. *Pesquisa Operacional, 2ª Edição: Para Cursos de Engenharia*. Elsevier Brasil, 2015.

ARAÚJO, Maria da Penha S.; BANDEIRA, Renata Albergaria de Mello; CAMPOS, Vania Barcellos Gouvea. Costs and freights charged in road cargo transportation: a comparative analysis between owner operators and companies. *Journal of Transport Literature*, 2014, 8.4: 187-226.

BALLOU, Ronald H. *Gerenciamento da cadeia de suprimento*. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BALLOU, Ronald H. *Gerenciamento da cadeia de suprimento/ logística empresarial* / Ronald H. BALLOU; tradução Raul Rubenich. – 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.

BALLOU, Ronald H. *Logística empresarial: Transportes, Administração de materiais e distribuição física/* Ronald H. BALLOU; tradução Hugo T. Y. Yoshizaki – 1. ed. – 27. reimpr. – São Paulo: Atlas, 2012.

BRANCO, Adriano Murgel, and M. H. Martins. *"Navegação fluvial no estado de São Paulo."* (2006).

B.V. Cherkassky, A.V. Goldberg, T. Radzik, Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation, Math. Prog. 73 (1996) 129–174.

CAROLA Jonesa, Jorge Mottab y María Verónica Alderetec. *Gestión estratégica de tecnologías de información y comunicación y adopción del comercio electrónico en Mipymes de Córdoba, Argentina* / Estudios Gerenciales 32 (2016) 4–13

COSTA, Marcondes Lima da. FERNANDEZ, Oscar Jesus Choque. REQUELME, Marlis Elena Ramirez. *O deposito de maganes do azul, carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. Capítulo v*

AMBROSINO. Daniela. & SCIOMACHEN Anna, Um Vigamento Algorítmico para Computação Route mais Curtos em Redes de Multimodal Urbanas com Critérios Diferentes, Procedia - Social e Ciências do comportamento, Volume 108, 2014, Páginas 139-152, ISSN 1877-0428, http://dx.doi.org /10.1016 /j.sbspro.2013.12.827.

DUTOVIÁRIO. Disponível em http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4964/ Dutoviario.html acessado em 13/12/2015.

ELETRONORTE Eclusas. Disponível em http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/ geracao/estados/tucurui/eclusas/ficha_tecnica/ acessado em 01/11/2015.

G. GALLO, S. Pallottino, Shortest paths algorithms, Annals of Operations Research 13 (1988) 3–79.

GONÇALVES, B., D'Agosto, M., Leal Jr., I. and Silva, F. (2014) Evaluating the modal split of overland transportation of general cargo

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. *Introdução à pesquisa operacional*. McGraw Hill Brasil, 2013.

HU, Zhi-Hua. A container multimodal transportation scheduling approach based on immune affinity model for emergency relief. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38.3: 2632-2639.

INFORME MINERAL. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. Janeiro-Junho.2015.

INTERDIÇÃO ESTRADA DE FERRO CARAJÁS http://g1.globo.com/ma/maranhao/ noticia/2015/08/indios-no-maranhao-interditam-estrada-de-ferro-carajas.html acessado em 13/12/2015.

ISHFAQ, Rafay. Resilience through flexibility in transportation operations.*International Journal of Logistics Research and Applications*, 2012, 15.4: 215-229.

WU Jigang, , et al. "Algorithm for time-dependent shortest safe path on transportation networks." Procedia Computer Science 4 (2011): 958-966.

K.T. Vivaldini, G. Caurin, M. Becker, “Automatic Routing of Forklift robots in warehouse applications” in 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2009), Gramado, Brazil.

Legislação ambiental . Disponível em : http://www.portosdoparana.pr.gov.br/ arquivos/File/LegislacaoAmbiental/ABNT/ABNTNBR7501.pdf. Acessado em 05 de julho de 2016.

LUSTOSA. Leonardo [et al]. *Planejamento e controle da produção* – Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

M. NIKSIRAT et al. / Applied Mathematical Modelling 36 (2012) 5709–5726

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de metodologia científica.* 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

Material rodante Locomotivas e vagões. Disponível em: http://www.antf.org.br /index.php/informacoes-do-setor/material-rodante. Acessado em 03 de julho de 2016.

MATTSSON, Lars-Göran; JENELIUS, Erik. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research. 2015.

MELO et al. – Knowledge management for improving business processes: an analysis of the transport management process for indivisible exceptional cargo. Pesquisa Operacional, v.30, n.2, p.305-330, Maio a Agosto de 2010.

Ministério dos Transporte disponível em: http://www.transportes.gov.br/conheca-a-identidade-digital-do-governo.html acessado em 26 de julho de 2016.

MOREIRA. D. A. *Pesquisa Operacional: curso introdutório.* 2. ed rev e atu. São Paulo. Cengage Learning, 2010.

M. Niksirat, M. Ghatee, S. Mehdi Hashemi, Multimodal K-shortest viable path problem in Tehran public transportation network and its solution applying ant colony and simulated annealing algorithms, Appl. Math. Model. 36 (11) (2012) 5709–5726.

NOVAES, Antônio Galvão. *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Rio de Janeiro : Elsevier, 2007. 13ª reimpressão.

ORLIN, James B., et al. "A faster algorithm for the single source shortest path problem with few distinct positive lengths." *Journal of Discrete Algorithms* 8.2 (2010): 189-198.

PEYER, Sven, Dieter Rautenbach, and Jens VYGEN. "A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing." *Journal of Discrete Algorithms* 7.4 (2009): 377-390.

PLANO DA CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. 2014. – Brasília: CNT, 2014. Disponível em http://www.cnt.org.br/Paginas/Plano-CNT-de-Log%C3% ADstica.aspx. Acessado em 01/11/2015.

PLANO ESTRATÉGICO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS TOCANTINS E ARAGUAIA: relatório síntese / Agência Nacional de Águas . Brasília: ANA; SPR, 2009. Disponível em http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/Tocantins Araguaia.aspx. Acessado em 01/11/2015.

RAZZOLINI FILHO, Edelvino. *Logística empresarial no Brasil: tópicos especiais*. 2. ed. Curitiba: Ibpex, 2011.

ROSS, Stephen; WESTERFIELD, Randolph W; JAFFE, Jeffrey F. *Administração Financeira*. 2 ed. São Paulo: atlas, 2010.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da produção*. São Paulo: Atlas, 2009.

SHU-XI, Wang. The improved dijkstra's shortest path algorithm and its application. Procedia Engineering, v. 29, p. 1186-1190, 2012.

VALE. Logística. Disponível em http://www.vale.com/brasil/pt/business/logistics/paginas/default. aspx acesso em 02 de outubro de 2015.

VALE. Logística. Disponível em http://www.vale.com/brasil/PT/business/logistics/Paginas/default.aspx acessado em 12/10/2015

VALE. Relatório. Disponível em http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/participacao-mineracao-economia -brasileira-cada-vez-maior.aspx acessado em 12/10/2015.

VALE. Relatório. Disponível em http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Documents/carajas/index.html acessado em 13/12/2015.

VIANA, Wladston; MORO, Mirella M. Busca de Caminhos entre Usuários de Redes Sociais em Tempo Real. 2012.

WANG, Ni; LU, Jye-Chyi; KVAM, Paul. Reliability modeling in spatially distributed logistics systems. *Reliability, IEEE Transactions on*, 2006, 55.3: 525-534.

Apêndice 1 - Matriz das distâncias (em km) para utilização do programa

	Carajás	MF	MR	TA	TR	IA	IF	IR	AF	AR	SIF	SIR	PVCA	PVCF	PVCR	PVC	PPMA	PPMF	PPMR	PPM
Carajás	10000	198	198	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
MF	198	10000	10000	244	310	214	10000	245	225	233	10000	10000	10000	10000	483	10000	10000	10000	10000	10000
MR	198	10000	10000	244	310	214	10000	245	225	233	10000	10000	10000	10000	483	10000	10000	10000	10000	10000
TA	10000	244	244	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	254	10000	386	10000	10000	10000	10000	10000
TR	10000	310	310	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	254	10000	386	10000	10000	10000	10000	10000
IA	10000	214	214	10000	10000	10000	10000	10000	63	67	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
IF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	63	67	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
IR	10000	245	245	10000	10000	10000	10000	10000	63	67	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
AF	10000	225	225	10000	10000	63	63	63	10000	10000	300	318	10000	513	500	10000	10000	10000	10000	10000
AR	10000	233	233	10000	10000	67	67	67	10000	10000	300	318	10000	513	500	10000	10000	10000	10000	10000
SIF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	300	300	10000	10000	10000	10000	614	10000	10000	213	253	10000
SIR	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	318	318	10000	10000	10000	10000	614	10000	10000	213	253	10000
PVCA	10000	10000	10000	254	254	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	791	10000	867	10000
PVCF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	513	513	10000	10000	10000	10000	10000	0	791	10000	867	10000
PVCR	10000	483	483	386	386	10000	10000	10000	500	500	614	614	10000	10000	10000	0	791	10000	867	10000
PVC	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	0	0	10000	10000	10000	10000	10000
PPMA	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	791	791	791	10000	10000	10000	10000	0
PPMF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	213	213	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0
PPMR	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	253	253	867	867	867	10000	10000	10000	10000	0
PPM	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	0	0	10000

Fonte: esta pesquisa (2016)

Apêndice 2 – Matriz dos custos (em R$) para utilização do programa

	Carajás	MF	MR	TA	TR	IA	IF	IR	AF	AR	SIF	SIR	PVCA	PVCF	PVCR	PVC	PPMA	PPMF	PPMR	PPM
Carajás	1,0E+07	100742	925745	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
MF	100742	1,0E+07	1,0E+07	77299	1449399	67795	1,0E+07	1145493	114480	1089387	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	2258258	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
MR	925745	1,0E+07	1,0E+07	77299	1449399	67795	1,0E+07	1145493	114480	1089387	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	2258258	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
TA	1,0E+07	77299	77299	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	80467	1,0E+07	1804736	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
TR	1,0E+07	1449399	1449399	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	80467	1,0E+07	1804736	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
IA	1,0E+07	67795	67795	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	32054	313257	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
IF	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	32054	313257	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
IR	1,0E+07	1145493	1145493	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	32054	313257	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
AF	1,0E+07	114480	114480	1,0E+07	1,0E+07	32054	32054	32054	1,0E+07	1,0E+07	152640	1486803	1,0E+07	261015	2337741	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
AR	1,0E+07	1089387	1089387	1,0E+07	1,0E+07	313257	313257	313257	1,0E+07	1,0E+07	152640	1486803	1,0E+07	261015	2337741	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
SIF	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	152640	152640	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	2870746	1,0E+07	1,0E+07	108374	1182897	1,0E+07
SIR	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1486803	1486803	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	2870746	1,0E+07	1,0E+07	108374	1182897	1,0E+07
PVCA	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	80467	80467	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0	250289	1,0E+07	4053643	1,0E+07
PVCF	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	261015	261015	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0	250289	1,0E+07	4053643	1,0E+07
PVCR	1,0E+07	2258258	2258258	1804736	1804736	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	2337741	2337741	2870746	2870746	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0	250289	1,0E+07	4053643	1,0E+07
PVC	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0	0	0	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07
PPMA	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	250289	250289	250289	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0
PPMF	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	108374	108374	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0
PPMR	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1182897	1182897	4053643	4053643	4053643	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0
PPM	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	0	0	0	1,0E+07

Fonte: esta pesquisa (2016)

Apêndice 3 – Matriz de tempos (em horas) para utilização do programa

	Carajás	MF	MR	TA	TR	IA	IF	IR	AF	AR	SIF	SIR	PVCA	PVCF	PVCR	PVC	PPMA	PPMF	PPMR	PPM
Carajás	10000	6	3	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
MF	6	10000	10000	61	5	53	10000	4	7	4	10000	10000	10000	10000	8	10000	10000	10000	10000	10000
MR	3	10000	10000	61	5	53	10000	4	7	4	10000	10000	10000	10000	8	10000	10000	10000	10000	10000
TA	10000	61	61	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	63	10000	6	10000	10000	10000	10000	10000
TR	10000	5	5	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	63	10000	6	10000	10000	10000	10000	10000
IA	10000	53	53	10000	10000	10000	10000	10000	2	1	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
IF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	2	1	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
IR	10000	4	4	10000	10000	10000	10000	10000	2	1	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
AF	10000	7	7	10000	10000	2	2	2	10000	10000	10	5	10000	15	8	10000	10000	10000	10000	10000
AR	10000	4	4	10000	10000	1	1	1	10000	10000	10	5	10000	15	8	10000	10000	10000	10000	10000
SIF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10	10	10000	10000	10000	10000	10	10000	10000	7	4	10000
SIR	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	5	5	10000	10000	10000	10000	10	10000	10000	7	4	10000
PVCA	10000	10000	10000	63	63	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	198	10000	14	10000
PVCF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	15	15	10000	10000	10000	10000	10000	0	198	10000	14	10000
PVCR	10000	8	8	6	6	10000	10000	10000	8	8	10	10	10000	10000	10000	0	198	10000	14	10000
PVC	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	0	0	10000	10000	10000	10000	10000
PPMA	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	198	198	198	10000	10000	10000	10000	0
PPMF	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	7	7	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0
PPMR	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	4	4	14	14	14	10000	10000	10000	10000	0
PPM	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0	0	0	10000

Fonte: esta pesquisa (2016)