

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	7
1.1	ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	7
1.2	OBJETIVO DO ESTUDO	8
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	8
2.	PORTUGAL LOGÍSTICO	9
2.1	PRÉ PORTUGAL LOGÍSTICO	9
2.2	OBJETIVOS DO PORTUGAL LOGÍSTICO	10
2.3	ESTRUTURA DO PORTUGAL LOGÍSTICO.....	10
2.4	JANELA ÚNICA LOGÍSTICA.....	11
2.5	CUSTOS E BENEFÍCIOS DA REDE NACIONAL DE PLATAFORMAS LOGÍSTICAS	12
3.	MODELOS DE OPTIMIZAÇÃO PARA FLUXOS EM REDES	15
3.1	MODELO DO CAMINHO MAIS ECONÓMICO	16
3.1.1	MODELO BASE, MCME (MODELO DO CAMINHO MAIS ECONÓMICO)	16
3.1.2	EXEMPLO MCNFP.....	17
3.1.3	RESULTADOS	19
3.2	PROBLEMA DOS CAMINHOS MAIS CURTOS	20
3.2.1	EXEMPLO DO PROBLEMA DO CAMINHO MAIS CURTO	20
3.2.2	RESULTADOS	21
3.3	PROBLEMA DE TRANSPORTE E TRANSBORDO	22
3.3.1	Exemplo DE UM PROBLEMA DE TRANSPORTE E TRANSBORDO	23
3.3.2	RESULTADOS	24
3.4	MODELO DO CAMINHO MAIS ECONÓMICO COM VÁRIAS MERCADORIAS.....	26
3.4.1	MODELO MCMECVM (MODELO DO CAMINHO MAIS ECONÓMICO COM VÁRIAS MERCADORIAS)	27
3.4.2	EXEMPLO MCMECVM	28
3.4.3	RESULTADOS	29
4.	MODELO PROPOSTO PARA UMA REDE LOGÍSTICA MULTIMODAL	30
4.1	REDES	30
4.2	PARÂMETROS	31
4.3	VARIÁVEIS DE DECISÃO	32
4.4	FUNÇÃO OBJETIVO	32

4.5	MODELAÇÃO	33
5.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO	34
5.1	REDE	35
5.2	DADOS ADICIONAIS	36
5.2.1	RESULTADOS DO PROGRAMA.....	38
5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	41
5.3.1	MERCADORIA 1	41
5.3.2	MERCADORIA 2	44
5.3.3	MERCADORIA 3	47
5.3.4	TABELA DE COMPARAÇÃO DOS CUSTOS.....	50
6.	ESTUDO DE CASO: PORTUGAL CONTINENTAL	51
6.1	INTRODUÇÃO	51
6.2	REDES	53
6.2.1	NÓS	53
6.2.2	REDE RODOVIÁRIA.....	57
6.2.3	REDE FERROVIÁRIA.....	58
6.3	RESULTADOS	60
7.	CONCLUSÃO	76
8.	REFERÊNCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	FIGURA 2.1 PLATAFORMA URBANA NACIONAL DE POCEIRÃO	14
2.1	FIGURA 2.2 PLATAFORMA PORTUÁRIA DE AVEIRO	14
3.1	FIGURA 3.1 MATRIZ DA REDE.....	17
3.1.2	FIGURA 3.2 REDE FERROVIÁRIA	18
3.1.2	FIGURA 3.3 MATRIZ DA REDE FERROVIÁRIA	18
3.1.3	FIGURA 3.4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CAMINHO MAIS CURTO SEM LIMITE DE CAPACIDADE	19
3.1.3	FIGURA 3.5 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CAMINHO MAIS CURTO COM LIMITE DE CAPACIDADE	20
3.2.1	FIGURA 3.6 REDE DO EXERCÍCIO DO CAMINHO MAIS CURTO	21
3.2.2	FIGURA 3.7 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RESULTADO	21
3.2.2	FIGURA 3.8 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE COM O ARCO D-E FECHADO.....	22
3.3.1	FIGURA 3.9 REDE DO PROBLEMA.....	23
3.3.2	FIGURA 3.10 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA SOLUÇÃO	25
3.3.2	FIGURA 3.11 GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DO G1	25
3.3.2	FIGURA 3.12 GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DO G2	26
3.4.1	FIGURA 3.13 MATRIZ DA REDE.....	27
3.4.2	FIGURA 3.14 REDE DO PROBLEMA DE MCMCNFC	28
3.4.3	FIGURA 3.15 RESULTADO SEM LIMITE DE CAPACIDADE	29
3.4.3	FIGURA 3.16 RESULTADO COM LIMITE DE CAPACIDADE	29
4.1	FIGURA 4.1 MATRIZ DA REDE.....	31
5.1	FIGURA 5.1 REDE RODOVIÁRIA, REDE FERROVIÁRIA.....	35
5.2.1	FIGURA 5.2 DISTRIBUIÇÃO DA MERCADORIA 1.....	39
5.2.1	FIGURA 5.3 DISTRIBUIÇÃO DA MERCADORIA 2.....	40
5.2.1	FIGURA 5.4 ATRIBUIÇÃO DA MERCADORIA 3.....	40
6.1	FIGURA 6.1 MAPA DE PORTUGAL, NUT III, REDE PROPOSTO	52
6.2.2	FIGURA 6.2 REDE RODOVIÁRIA.....	57
6.2.3	FIGURA 6.3 REDE FERROVIÁRIA	58
6.3	FIGURA 6.4 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM PORTALEGRE	60
6.3	FIGURA 6.5 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM ÉVORA	63
6.3	FIGURA 6.6 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM BEJA.	65
6.3	FIGURA 6.7 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM COIMBRA	67
6.3	FIGURA 6.8 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM LEIRIA.....	69

6.3	FIGURA 6.9 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM LISBOA	71
6.3	FIGURA 6.10 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM SETÚBAL	73

ÍNDICE DE TABELAS

2.5	TABELA 2.1 TABELA DE CUSTOS DE RENOVAÇÃO/CONSTRUÇÃO DE CADA PLATAFORMA	13
3.3.1	TABELA 3.1 TABELA DE PROCURA E CUSTOS	24
5.1	TABELA 5.1 COORDENADAS DAS CIDADES	35
5.1	TABELA 5.2 DISTÂNCIA ENTRE CIDADES	35
5.1	TABELA 5.3 POPULAÇÃO	36
5.2	TABELA 5.4 CARGA PRODUZIDA DE CADA MERCADORIA	36
5.2	TABELA 5.5 CUSTOS DO TRANSPORTE DA MERCADORIA 1	38
5.2.1	TABELA 5.6 CUSTOS DO TRANSPORTE DA MERCADORIA 2	38
5.2.1	TABELA 5.7 CUSTO DO TRANSPORTE DA MERCADORIA 3	39
5.3.1	TABELA 5.8 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 2	41
5.3.1	TABELA 5.9 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 3	42
5.3.1	TABELA 5.10 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 4	42
5.3.1	TABELA 5.11 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 5	43
5.3.1	TABELA 5.12 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 6	44
5.3.1	TABELA 5.13 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 7	44
5.3.2	TABELA 5.14 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 2	45
5.3.2	TABELA 5.15 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 3	45
5.3.2	TABELA 5.16 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 4	45
5.3.2	TABELA 5.17 comparação do cenário 1 com o cenário 5	46
5.3.2	TABELA 5.18 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 6	46
5.3.2	TABELA 5.19 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 7	47
5.3.3	TABELA 5.20 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 2	47
5.3.3	TABELA 5.21 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 3	48
5.3.3	TABELA 5.22 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 4	48
5.3.3	TABELA 5.23 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 5	49
5.3.3	TABELA 5.24 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 6	49
5.3.3	TABELA 5.25 COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 1 COM O CENÁRIO 7	50
5.3.4	TABELA 5.26 TABELA DE COMPARAÇÃO DE CUSTOS	50
6.2.1	TABELA 6.1 POPULAÇÃO DAS CIDADES EM Nº DE HABITANTES	53
6.2.1	TABELA 6.2 COORDENADAS NODAIS DA REDE RODOVIÁRIA	54
6.2.1	TABELA 6.3 COORDENADAS NODAIS DA REDE FERROVIÁRIA	54

6.2.1 TABELA 6.4 OFERTA E PROCURA DE CORTIÇA	55
6.2.1 TABELA 6.5 OFERTA E PROCURA DO CIMENTO	56
6.2.1 TABELA 6.6 OFERTA E PROCURA DO CIMENTO, QUADRO 2	56
6.3 TABELA 6.7 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM PORTALEGRE	61
6.3 TABELA 6.8 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM ÉVORA	64
6.3 TABELA 6.9 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM BEJA.	66
6.3 TABELA 6.10 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM COIMBRA	68
6.3 TABELA 6.11 TRANSPORTE DA CORTIÇA COM ORIGEM EM LEIRIA.	70
6.3 TABELA 6.12 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM LISBOA.....	72
6.3 TABELA 6.12 TRANSPORTE DE CIMENTO COM ORIGEM EM SETÚBAL	74

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

A logística é cada vez mais importante para a sobrevivência das empresas, representando cerca de 10 a 15% do custo do produto final. Esta pode ser dividida em 3 componentes: distribuição, armazenamento e transporte. Neste trabalho pretende-se focar a vertente do transporte de mercadorias, desenvolvendo um modelo com uma rede logística com alternativas modais, tentando demonstrar a influência da intermodalidade nos custos de transporte, sendo que um dos custos mais importantes nessa relação é o custo de carregamento e descarga intermodal nos pontos de troca de modos de transporte.

Com a multi-localização das unidades produtivas das empresas provocada pela globalização, está a haver um maior fluxo mundial de mercadorias e, consecutivamente, um crescimento exponencial acentuado da procura de transporte de mercadorias. Nesse contexto, Portugal terá uma grande importância para a Europa, tendo em conta o seu posicionamento geográfico, funcionando como uma plataforma de entrada e saída de produtos desde que haja desenvolvimento da logística. O desenvolvimento associado ao sector facilitará a exportação de produtos nacionais pelos mesmos meios e permitirá uma melhoria da distribuição interna de mercadorias. Como mencionado no parágrafo anterior, ajuda a reduzir os custos do produto final em cerca de 15%.

Dada a importância da logística, tanto para o comércio nacional, como para o internacional, o XVII Governo Constitucional desenvolveu um plano logístico em 2006 onde apresenta a orientação estratégica do governo, cumprido o papel que lhe compete na promoção e adequação das infraestruturas de apoio ao transporte de mercadorias, apresentando projetos de criação e ou melhoramento de plataformas logísticas intermodais para satisfazer a procura presente e assegurar a sua evolução.

Com a crise financeira mundial, o projeto sofreu as suas consequências e nem tudo o que foi planeado pôde ser implementado. Embora o crescimento do fluxo de mercadoria tenha sido como o esperado, a capacidade de execução financeira do governo não correspondeu ao projetado. Assim, há que fazer uma avaliação ao projeto e propor novas soluções de acordo com a capacidade e necessidades do País.

Para mais informação sobre a logística podem ver-se os seguintes trabalhos: CAIXETA-FILHO et al. (2001), CHRISTOPHER (2004), GHIANI et al. (2013).

1.2 Objetivo do estudo

A ideia principal do estudo proposto é criar um modelo de transporte de mercadoria associado a uma rede intermodal com base nos modelos de fluxo de redes. Sabendo que a logística representa uma boa fatia do custo final de um produto, pretendemos com o modelo fornecer uma nova ferramenta capaz de ajudar no planeamento em termos logístico mais particularmente na parte do transporte das mercadorias. Sendo que a aplicação do modelo está mais centrado no universo de uma empresa, vamos apresentar análises associadas ao transporte de mercadorias do ponto de produção as localidades onde pode ser feita a distribuição e venda, ou seja uma análise de transporte de mercadoria entre cidades.

Aplicando o modelo num cenário real espera-se ser possível ajudar na escolha do caminho mais económico tendo em conta todas as condicionantes e a oportunidade de efetuar transporte através de ligações intermodais tirando o maior proveito das infraestruturas oferecidas pelo País onde a empresa pretende fazer o estudo da distribuição de mercadorias.

Numa ótica de governo pode-se usar o modelo com o intuito de ajudar na qualidade de vida dos habitantes e na minimização dos custos logísticos das empresas públicas ou privadas se for efetuado um estudo onde se possa ver o caminho mais económico para transporte de mercadoria de uma cidade a outra, e em seguida apresentar-se uma solução onde as empresas presentes nas cidade que pretendem transportar as suas mercadorias pelo país compartilhassem o transporte de um ponto a outro, minimizando os custos logísticos e os impactos ambientais inerentes ao transporte de mercadoria, o que melhora a qualidade de vida dos habitantes.

1.3 Estrutura do documento

O documento é dividido em três partes além da conclusão: Portugal logístico; modelos de otimização; e estudo de caso.

Contextualizando, começa-se por descrever os planos logísticos em Portugal, mostrando a importância do sector no desenvolvimento do País. É um capítulo em que se descreve a situação atual e os planos existentes.

Na sequência, apresentam-se modelos que serviram de referência para a elaboração do modelo que a seguir apresentamos. Entre modelações e exemplos tentamos explicar como funcionam os modelos de minimização de custos em redes de fluxos. No final do capítulo é apresentado o modelo proposto, fazendo algumas análises e resolvendo um problema exemplificativo para ilustrar o respetivo funcionamento.

No capítulo seguinte é proposta a aplicação do modelo num cenário mais próximo do real, nomeadamente, uma simulação da rede logística em Portugal continental considerando os modos de transporte ferroviário e rodoviário.

Finalmente apresenta-se a conclusão do estudo feito fundamentando a sua utilidade e funcionalidade perante cenários próximos do real.

2. PORTUGAL LOGÍSTICO

Em 2006 foi lançado pelo XVII Governo constitucional Português um plano logístico com o objetivo de melhorar a eficiência das cadeias logísticas e de transporte, reforçando a intermodalidade e a utilização racional dos vários modos, bem como a integração nas redes de transporte internacionais (MOPTC, 2006). Com o projeto, Portugal queria reforçar a sua posição na economia europeia, funcionando como uma plataforma logística de ligação entre Europa e o Atlântico. Entretanto, com a mudança do governo e a conjuntura atual do País, o plano foi revisto uma série de vezes e acabou por não ser desenvolvido por completo. A interação com o sector privado não foi como o esperado, e a falta de clientes para as plataformas impediu a construção de várias delas. Apesar do não cumprimento do plano, houve melhorias em termos logísticos.

2.1 Pré Portugal logístico

Em termos organizacionais, o subsistema logístico de apoio ao consumo revelava bom desenvolvimento, com implantação de bases de distribuição vocacionados para apoiar todo o território nacional, tendo como suporte modernos sistemas de informação e gestão, embora o subsistema logístico de apoio à produção apresentasse como debilidade a falta de consistência, traduzida em estruturas deficientes e pouco articuladas, o que impedia ganhos de competitividade proporcionados pelo correto funcionamento da rede.

Os principais pontos de carga do país e pilares importantes da rede logística - portos, aeroportos e estações ferroviárias - apresentavam grande dificuldade no tratamento de mercadorias devido ao facto de não haver instalações adjacentes capazes de completar as funções. De forma a minimizar tais deficiências, eram usados baldios logísticos para tratamento de cargas, que consistiam em instalações disseminadas e desordenadas cuja localização era em função do baixo custo do solo. Contudo, esta tentativa de minimização de custos correspondia um aumento de custo no transporte devido aos atrasos, tendo em conta a dificuldade de acessibilidade daqueles baldios e a distância aos principais eixos de circulação. Toda esta solução de recurso não permitia que as empresas vizinhas reduzissem nos custos de operação pela partilha de serviços comuns.

Devido aos fatores mencionados atrás, havia riscos no caso do desenvolvimento não planeado do sistema logístico existente, tais como a indisponibilidade de soluções que permitam ganhos de competitividade ao mercado, a não obtenção de ganhos ambientais e a redução de consumos energéticos, a crescente dificuldade de afirmação dos operadores logísticos nacionais, o contínuo desequilíbrio modal e a inadequada utilização e rentabilização da capacidade portuária e ferroviária.

2.2 Objetivos do Portugal logístico

Os objetivos do planeamento logístico pelo governo consistiam:

- Objetivo 1: Afirmar a economia nacional, tanto a nível de exportações como para o aumento da satisfação de procura interna.
- Objetivo 2: Desenvolvimento e ordenamento de atividades logística
- Objetivo 3: Promover a intermodalidade, aproveitar a crescente utilização do transporte ferroviário e reforçar a competitividade das empresas que aí se instalem
- Objetivo 4: Aproveitamento da localização geoestratégica de Portugal em termos das comunicações intercontinentais do Atlântico em relação a Europa, nomeadamente com a América Latina e África.
- Objetivo 5: Criação de efetivas vantagens competitivas a nível da gestão da cadeia de abastecimento proporcionando a melhor aproximação às necessidades dos mercados e a facilitação dos inerentes fluxos de informação e financeiros.
- Objetivo 6: Redução de tempos e custos dos ciclos dos produtos (englobando encomendas, aprovisionamentos, fornecimentos de base e de componentes, produção, distribuição, comercialização e pós-venda.
- Objetivo 7: Potenciação dos grandes eixos de acessibilidade rodoviária e ferroviária. (em que inclui a rede de alta velocidade Lisboa-Madrid)
- Objetivo 8: Assegurar uma adequada intermodalidade que tire partido das melhores “performances” ambientais dos transportes ferroviários e marítimos e da especial vocação do caminho-de-ferro, para o transporte em massa a distâncias de médio e longo curso.

2.3 Estrutura do Portugal Logístico

O Portugal Logístico foi estruturado em 3 pilares, a rede nacional de plataformas logísticas com áreas dedicadas a infraestruturas para a fixação de atividades do sector que reforcem a intermodalidade, a criação de uma estrutura de planeamento e regulação a partir do Instituto de Transporte Terrestre e dos outros intervenientes nas plataformas, e uma melhor organização dos sistemas de apoio as plataformas. De certa forma, dos 3 pilares mencionados

atrás, podemos dizer que a rede nacional de plataformas logísticas é o mais importante e os outros dois pilares servem-lhe de apoio.

Criação de uma estrutura de planeamento e regulação

A criação de uma estrutura de planeamento e regulação dependerá do Instituto de Transportes Terrestres e de diversas sociedades que envolvam os agentes presentes em cada plataforma, as autarquias das zonas de implantação das plataformas, a REFER, a CP, as administrações portuárias e os agentes privados.

Melhor organização dos sistemas de apoio as plataformas

Resumidamente pode-se dizer que consiste em ações concertadas ao nível da logística urbana, que procurem novas soluções para as cadeias de abastecimento, harmonizem as regras de utilização da rede viária e contribuam a adequação dos veículos ao desempenho da sua atividade.

Rede Nacional de Plataforma Logística

O posicionamento da rede de plataformas é um dos pontos principais do planeamento do sistema logístico nacional. Como tal, tiveram em conta aspetos importantes para o seu bom funcionamento. A acessibilidade às redes principais de transporte, à intermodalidade, à proximidade dos grandes eixos de tráfego internacional, à integração nas redes gerais de infraestruturas, serviços tecnologicamente mais avançados e garantir o serviço aos principais centros de produção e consumo do país.

De forma a garantir as necessidades propôs-se a criação de onze plataformas complementadas com dois centros de carga aérea, os aeroportos de Lisboa e Porto.

Entre as plataformas propostas pode-se dizer que existem 4 tipos diferentes: plataformas urbanas nacionais, plataformas portuárias, plataformas transfronteiras e plataformas regionais.

2.4 Janela Única Logística

Uma das vantagens importantes planeadas pelo projeto Portugal Logístico, para melhorar o funcionamento das plataformas, é a criação de uma rede informática (janela única logística) que permitira uma desmaterialização de papéis, e uma interação informática elevada entre as plataformas. A janela única logística será constituída por autorizações alfandegárias de exportação e importação de mercadorias, e as restantes autorizações administrativas de saída e entrada de bens no País.

2.5 Custos e benefícios da Rede Nacional de Plataformas Logísticas

Benefícios da Rede Nacional de Plataformas Logísticas

O principal benefício esperado com a RNPL é a transformação de Portugal numa plataforma atlântica de entrada de movimentos internacionais, tanto no mercado ibérico como para o resto de europa, tornando-se num centro importante de distribuição logística europeu.

Com a RNPL espera-se:

- Potenciar o tráfego captando novos tráfegos, gerando um aumento de 16% na atividade portuária nacional.
- Potenciar o aumento da carga global movimentada no País em 3% (9.5milhões de toneladas).
- Promover a eficiência e a produtividade dos operadores logísticos, permitindo uma redução média de custos logísticos em cerca de 10% e um aumento da produtividade média nos fluxos totais de carga de 15%.
- Aumentar a competitividade da indústria e comércio português, afetando uma boa parte dos custos associados as empresas.
- Estimulação da economia, permitindo a criação de aproximadamente cinco mil postos de trabalhos, tendo em conta a experiencia internacional.
- Melhoria das condições de articulação, e reordenamento intermodal e territorial, de forma a atrair investimentos industriais.
- Diminuição dos efeitos ambientais com o uso de modos mais sustentáveis.

Custos

O investimento estimado para a concretização da Rede Nacional de Planeamento Logístico (*Tabela 2.1*) é de cerca de 1.038 milhões de euros, dos quais 131 milhões são relativos a acessibilidades.

Plataformas Logísticas	Área Total (ha)	Investimento (M €)	
		Plataforma	Acessos
Plataformas urbanas nacionais			
Maia/Trofa	163,1	224	8
Poceirão	220,0	290	17
Plataformas portuárias			
Leixões - Gaiões/Guilhões	41,2	58	7
Leixões - Gonçalves	24,2	43	10
Aveiro	70,2	10	56*
Aveiro - Cacia	16,0	14	
Lisboa - Babadela/Sabralinho	62,6	9	10
Sines - Pêlo A	12,3	16	
Sines - Pêlo B	73,6	49	
Plataformas transfronteiriças			
Valença	47,5	66	5
Chaves	10,0	7	
Guarda	35,2	26	8
Elvas/Caia	37,5	52	7
Plataforma regional			
Tunes	30,1	43	3
Total	843,5	907	131

Tabela 2.1, Tabela de custos de renovação/construção de cada plataforma

Pela *tabela 2.1* pode-se observar que a plataforma urbana nacional de Poceirão (*figura 2.1*) é a com maior área (220 há) e consecutivamente a com maior custo de implementação da plataforma (290M euros). Pode-se constatar que o custo da construção e/ou renovação dos acessos não está diretamente relacionado ao tamanho da plataforma, tendo em conta que os acessos a plataforma de Aveiro (*figura 2.2*) tem um custo muito maior que os outros, cerca de 6 vezes maior (56M euros) devido a criação de uma ligação ferroviária do porto de Aveiro à Linha do Norte.

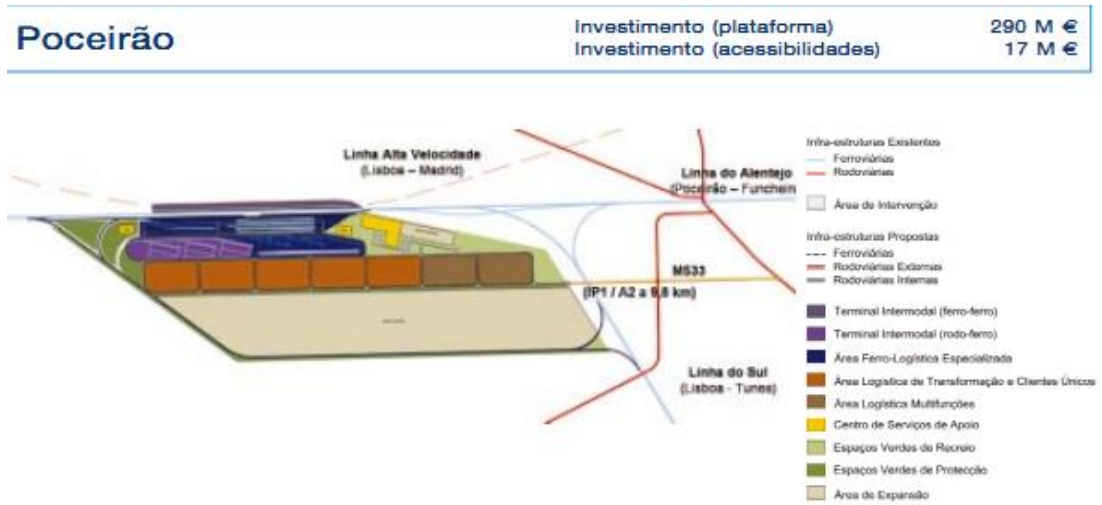


Figura 2.1, Plataforma Urbana Nacional de Poceirão

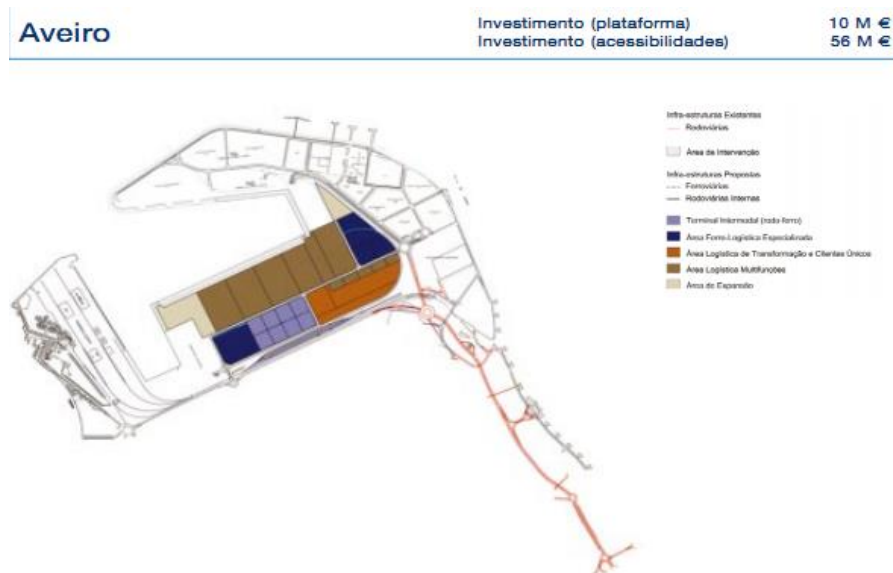


Figura 2.2, Plataforma Portuária de Aveiro

3. MODELOS DE OPTIMIZAÇÃO PARA FLUXOS EM REDES

No estudo do transporte de mercadorias o caminho escolhido para a distribuição afeta diretamente o custo final do produto, entrando no custo logístico do fornecedor. Consecutivamente, a escolha do caminho ótimo, ou seja, o mais barato, torna-se essencial no planeamento do transporte da mercadoria desde a unidade de fabrico ao local de venda ao consumidor final. Com o objetivo de criar um modelo que reflita uma rede logística intermodal, foram analisados modelos de redes existentes, dando principal destaque a modelos do tipo, Custo Mínimo de Fluxos de Rede (*Minimum cost network flow*), adicionando posteriormente a vertente multimodal ao modelo.

Os Modelos relacionados com redes logísticas podem ser considerados modelos lineares contínuos, inteiros ou mistos (GOLDBARG e LUNA, 2000). Um modelo linear é feito baseado em três componentes: Uma função matemática chamada de função objetivo, que desejamos maximizar ou minimizar; Um conjunto de variáveis de decisão (variáveis desconhecidas) incluídas na função objetivo; Um conjunto de restrições formadas por equações lineares que limitem o valor que as variáveis de decisão podem assumir.

De uma forma geral os modelos de uma rede podem ser considerados sempre com um conjunto base de variáveis, a rede G constituída de N nós e A arcos ($G(N, A)$), e um fluxo X_{ij} não negativo. A limitação da rede em termos de capacidade é uma necessidade em quase todos os casos não académicos, logo é muito provável existir uma variável que define a capacidade máxima de cada arco (U_{ij}) e uma variável a definir a capacidade mínima e garantindo o valor não negativo do fluxo (L_{ij}). A quantidade de fluxo a ser transportado pela rede é definido através da procura e oferta de cada nó, logo é sempre assumido uma variável a representar a oferta e a procura (Q_i).

O conceito de rede na modelação é muito diverso, devido ao facto de poder tratar-se da mesma forma redes completamente diferentes na vida real, ou seja, ao criar-se um modelo é normal fazer-se um enquadramento do espaço da rede. Os arcos podem corresponder a vias marítimas, condutas, vias rodoviárias, caminhos-de-ferro, fios de eletricidade entre outros, dependente do fluxo a ser transportado na rede.

Para mais informação sobre este tipo de modelos e, em particular, sobre a respetiva aplicação em logística podem ver-se os seguintes trabalhos: POH et al. (2005), ARNOLD et al. (2004), ARAÚJO (2003), GHIANI et al. (2013), EISELT et al. (2000)

3.1 Modelo do Caminho Mais Económico

O modelo de minimização de custos de uma rede de fluxos é um modelo de otimização de redes de fluxo com o objetivo de minimizar os custos de transporte de um certo fluxo pela rede. Existem várias vertentes deste tipo de modelo e pode por exemplo, ser usado para o cálculo do caminho mais curto não tendo em conta o custo monetário, mas sim as distâncias percorridas.

3.1.1 Modelo base, MCME (Modelo do Caminho Mais Económico)

Parâmetros

Rede $G(N,A)$

N ----- Número de nós

A ----- Número de arcos

$Q(i)$ ---- Procura e oferta em cada nó i

$U(i, j)$ ---- Capacidade do arco ij

$L(i, j)$ ---- Limite inferior do fluxo em cada arco ij

$C(i, j)$ ---- Custo por unidade de fluxo em cada arco ij

Variáveis de decisão

$x(i, j)$ ---- Fluxo no arco ij

Função objetivo (minimização do custo de transporte do fluxo pela rede)

$$\text{Min } C = \sum x_{(i,j)} * c_{(i,j)}$$

Restrições

A matriz da *figura 3.1* representa a rede no modelo de minimização de custos. É uma matriz binária que assume valores iguais a 1 nas células i (colunas) j (linhas) quando existe um arco entre i e j e assume valor 0 no caso contrario. Na matriz representada ainda aparece valores negativos que no caso específico representam o arco no sentido contrário.

Node	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{24}	x_{34}	x_{35}	x_{45}	x_{46}	x_{56}	b
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
2	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	10
3	0	-1	-1	0	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	-1	-1	0	1	1	0	8
5	0	0	0	0	0	-1	-1	0	1	-13
6	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-20

Figura 3.1, matriz da rede

- Garante a continuidade do fluxo pela rede

$$\sum_j x(i,j) - \sum_j x(j,i) = Q(i) \quad \forall i, N$$

- Restrições de capacidade máxima

$$x(i,j) \leq U(i,j) \quad \forall i,j$$

- Restrições de capacidade mínima

$$x(i,j) \geq l(i,j) \quad \forall i,j$$

- Garantir que x_{ij} é um número real

$$x(i,j) \in \mathbb{R}_0^+, \quad \forall i,j$$

3.1.2 Exemplo MCNFP

A figura 3.2 representa uma rede ferroviária que liga três cidades (A, B e F) e quatro vilas (C, D, E e G). Os valores representados em cada arco representam o custo diário do transporte de $10^3 U.Q$ (unidades de produto) pelos arcos e a rede tem uma capacidade máxima diária por arco de $30 \cdot 10^3 U.Q$.

Sabendo que a procura da mercadoria genérica nas vilas E e G é de $25 \cdot 10^3 U.Q$ e $25 \cdot 10^3 U.Q$ respetivamente, pretende-se calcular o custo mínimo de transporte da mercadoria garantindo a satisfação da procura. A produção da mercadoria é feita nas cidades A e B ($20 \cdot 10^3 U.Q$ e $30 \cdot 10^3 U.Q$ respetivamente).

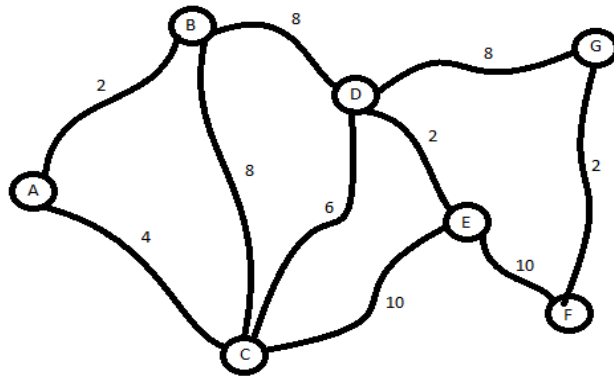


Figura 3.2, Rede ferroviária

O dimensionamento da rede apresentada resume-se na seguinte questão, qual é o custo do transporte da mercadoria genérica das cidades A e B para as vilas E e G, sabendo as restrições associadas aos arcos?

Dados:

$$b(i) :: [20 ; 30 ; 0 ; 0 ; -25 ; 0 ; -25]$$

$$u(i,j) = 30 \cdot 10^3 \text{ U.Q}$$

$$c_{12} = 2 ; c_{13} = 4 ; c_{24} = 4 ; c_{32} = 8 ; c_{34} = 6 ; c_{35} = 10 ; c_{45} = 2 ; c_{47} = 8 ; c_{56} = 10 ; c_{76} = 2 ;$$

$$l(i,j) = 0 ;$$

Nós	A	B	C	D	E	F	G	Proc/ofert
A	0	1	1	0	0	0	0	20
B	1	0	1	1	0	0	0	30
C	1	1	0	1	1	0	0	0
D	0	1	1	0	1	0	1	0
E	0	0	1	1	0	1	0	-25
F	0	0	0	0	1	0	1	0
G	0	0	0	1	0	1	0	-25

Figura 3.3, Matriz da rede ferroviária

A forma mais usual de resolver estes problemas de transporte é usando modelos de minimização de custos em programas de otimização devido a quantidade de cálculos exigido para a determinação do caminho mais curto. A quantidade de cálculos é diretamente proporcional a dimensão da rede. No caso apresentado foi utilizado o xpress, programa de otimização que usa a linguagem mosel para a introdução de dados e permite a representação gráfica dos resultados, o que é muito útil no caso de problemas de transporte.

Para mais informação sobre o programa xpress, consultar o seguinte documento: FICO (2014).

3.1.3 Resultados

Com o xpress obtemos uma representação gráfica do caminho mais económico e o valor do custo de transporte das mercadorias. As *figuras 3.4 e 3.5* são outputs do xpress e representam a distribuição da mercadoria pela rede, nomeadamente o valor de x_{ij} . O valor $Cost$ é o custo do transporte da mercadoria.

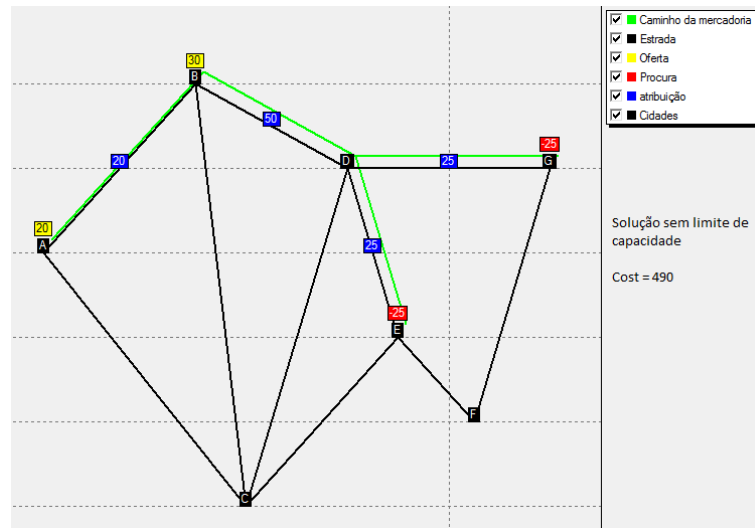


Figura 3.5, Representação gráfica do caminho mais curto sem limite de capacidade

A *figura 3.5* representa a solução quando não existe uma capacidade máxima. O custo de transporte de toda a mercadoria fica em 490 U.M (*Unidades Monetárias*).

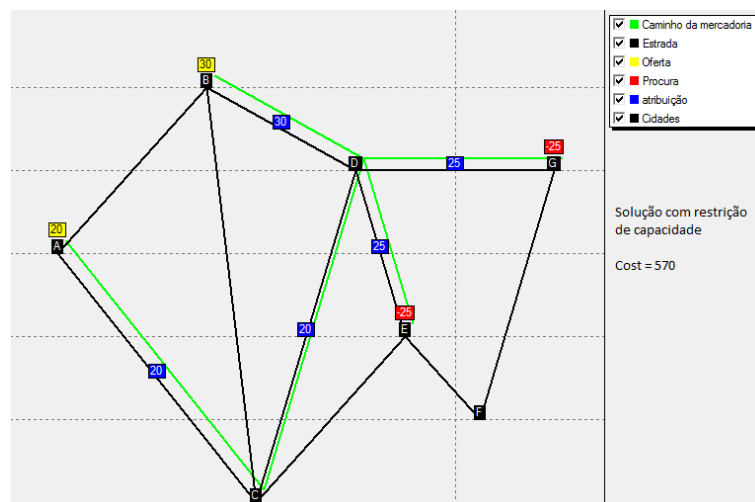


Figura 3.4, Representação gráfica do caminho mais curto com limite de capacidade

A *figura 3.4* representa a solução quando se define uma capacidade máxima de 30 unidades de mercadoria em cada arco. O custo associado a solução é de 570 (U.M).

Comparando as duas soluções é fácil constatar que quanto menor for a capacidade dos arcos, maior será o custo de transportes da mesma quantidade de mercadoria. O número de arcos a serem usados nas duas soluções é claramente diferente. No caso sem limitação de capacidade são usados os arcos $A \rightarrow B$ (20), $B \rightarrow D$ (50), $D \rightarrow G$ (25), $D \rightarrow E$ (25) em que o conceito está em enviar o máximo de mercadoria pelo caminho mas económico. No caso da solução com limite de capacidade são usados os arcos $A \rightarrow C$ (20), $C \rightarrow D$ (20), $B \rightarrow D$ (30), $D \rightarrow E$ (25), $D \rightarrow G$ (25), o que demonstra a influência do limite de capacidade, em vez de transportar a mercadoria produzida em A (20) para B e depois distribuir pela rede opta por transportar a mercadoria para a cidade C e depois encaminha-la para a cidade D, de onde é distribuído a mercadoria para as vilas E e G. Este desvio introduzido devido ao limite de capacidade faz com que o custo de transporte de mercadoria pela rede seja aumentado em cerca de 15% (80 U.M).

3.2 Problema Dos Caminhos Mais Curtos

O Problema do caminho mais curto existe em praticamente todas as deslocações do ser humano hoje em dia, em que todos se perguntam quando têm de ir de um ponto A para um ponto B, qual é o caminho mais curto? Com este conceito foi desenvolvido os modelos de *shortest path problem*, que calculem o caminho mais curto. A ideia usada neste tipo de modelo é praticamente a mesma que nos modelos de cálculo do caminho mais económico. As funções objetivo são idênticas, com o mesmo objetivo de minimização e com a mesma variável de decisão. O vetor b que define a procura e a oferta no MCME (modelo do caminho mais económico), no MCMC (modelo do caminho mais curto) define a origem (com a célula igual 1) e o destino (célula igual a -1) do deslocamento. O custo existente no MCME é substituído pelo comprimento de cada arco no MCMC. A principal diferença é que nos MCMC não existe necessidade de criar um limite de capacidade máxima, o que é opcional ou dependente do modo de transporte utilizado no problema proposto para o modelo MCME.

3.2.1 Exemplo do Problema do Caminho Mais Curto

A figura 3.6 representa uma rede formada por 7 cidades A, B, C, D, E, F e G. Os valores em cada arco representam a distância em quilómetros entre as cidades, assumindo as mesmas variáveis base do modelo MCME e sabendo que o objetivo é ir de B para F, temos que:

Dados:

$$b(i) :: [0; 1; 0; 0; 0; -1; 0]$$

$$d_{12}= 50 ; d_{13}= 20; d_{24}= 20; d_{32}= 75; d_{34}= 26; d_{35}= 10; d_{45}= 22; d_{47}= 80; d_{56}= 10; d_{76}= 25;$$

$$l(i,j) = 0;$$

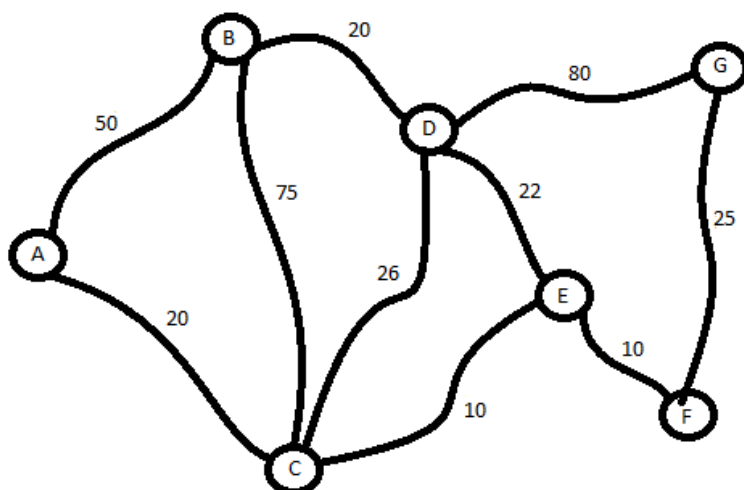


Figura 3.6, Rede do exercício do caminho mais curto

3.2.2 Resultados

Usando as mesmas equações de restrições e a mesma função objetivo, consegue-se saber qual o caminho mais curto, pelo programa *xpress*. Correndo o modelo no programa o resultado obtido foi:

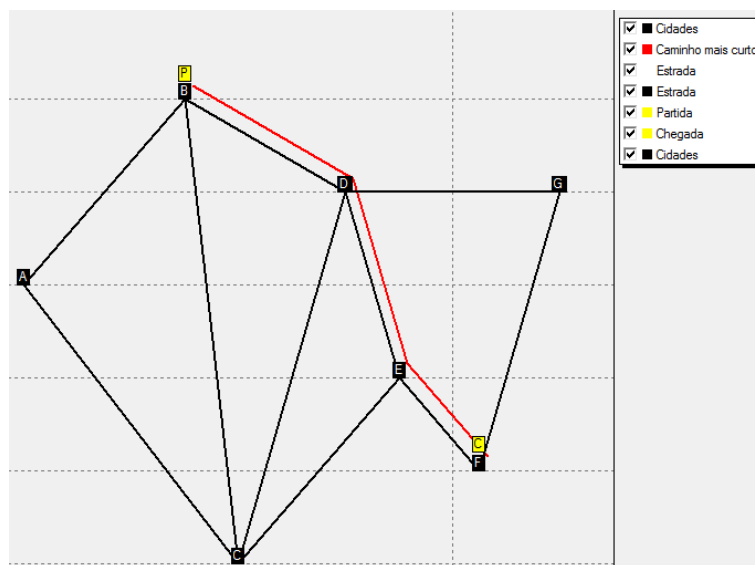


Figura 3.7, Representação gráfica do resultado

A *figura 3.7* é uma representação gráfica da solução do problema proposto quando não existe nenhuma restrição e a distância percorrida para atingir o destino foi de 52Km. O trajeto usado foi: $B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$.

Suponde que a estrada DE está em obras de reparação e não pode ser utilizada. O caminho mais curto encontrado na *figura 3.7* sofrerá alterações sendo agora a solução o resultado gráfico encontrado na *figura 3.8*.

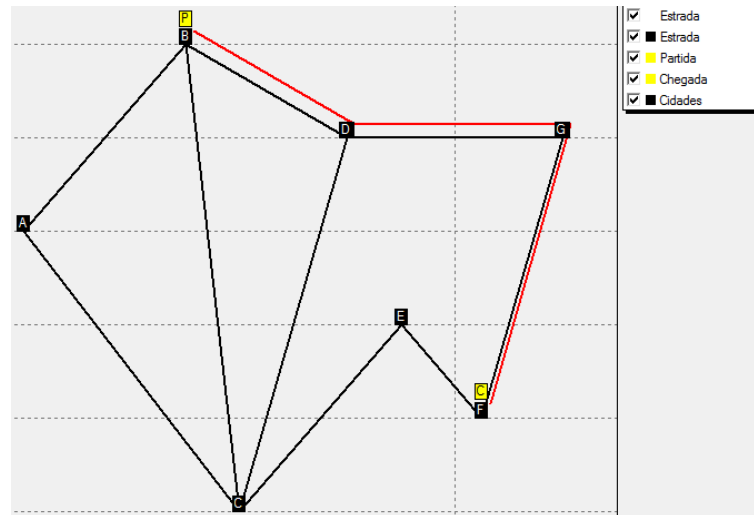


Figura 3.8, Representação gráfica da rede com o arco D-E fechado

Com esta alteração de caminho há uma mudança na distância percorrida de cerca de 72Km, sendo que a distância percorrida nesta opção é de 125Km, em vez de usar o caminho $D \rightarrow E \rightarrow F$ (32Km) usa o trajeto $D \rightarrow G \rightarrow F$ (105Km), uma alteração significativa no percurso.

Pode-se concluir que se o arco fechado pertencer ao caminho mais curto do problema, o valor do custo de deslocamento, ou seja o valor da distância percorrida irá aumentar, porque a pessoa é obrigada a desviar-se do caminho mais curto pela incapacidade de atravessar um arco fechado.

3.3 Problema de Transporte e Transbordo (Transportation and Transshipment Problem)

O Problema do transporte e transbordo é representado por um modelo baseado no *MCME* adicionando um novo conceito, o transbordo. Neste tipo de modelo o conceito transbordo é traduzido como a existência de mais do que um nível de distribuição, ou seja existe uma primeira distribuição da unidade de fabrico aos locais de armazenamento e uma segunda distribuição dos locais de armazenamento aos locais de venda ao público. Em termos de variáveis e função de objetivo são os mesmo que no modelo de *MCME* e usa o mesmo tipo de vetor b para definir a procura e a oferta. Praticamente o transbordo será garantido na criação da rede onde é feito a ligação entre os níveis.

3.3.1 Exemplo de um Problema de Transporte e Transbordo

Uma empresa de petróleo tem uma plataforma petrolífera (P) no meio do mar que abastece 4 estabelecimentos de abastecimento de combustíveis (A, B, C, D), mas até chegar aos estabelecimentos o combustível deve ser tratado e armazenado em instalações próprias para o efeito, onde depois é feita a distribuição aos estabelecimentos. Sabendo que existe duas instalações de armazenamento ($G1$ e $G2$), qual será o caminho mais económico que garante o abastecimento do petróleo nos estabelecimentos?

A *figura 3.9* representa a rede do problema, mostra a ligação marítima entre a plataforma e as instalações com o respetivo custo de transporte por U.Q e a ligação entre as instalações e os estabelecimentos feito através de camiões cisternas com o custo por U.Q transportado. A ligação $P \rightarrow G$'s tem um limite de capacidade de 90 U.Q por dia, e a quantidade transportada diariamente pelos camiões cisternas tem um limite máximo de 25 U.Q por arco.

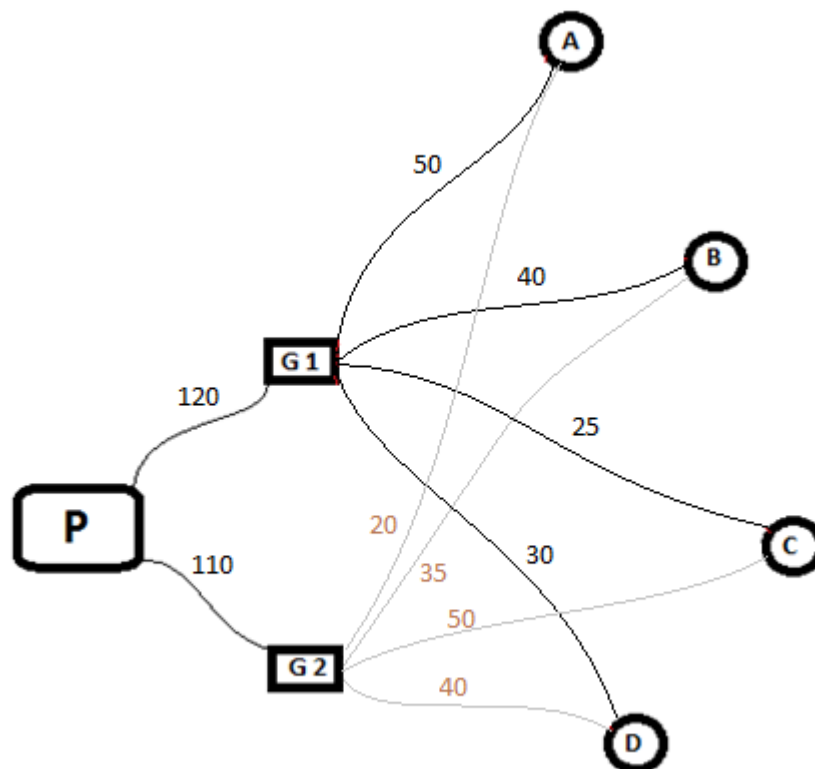


Figura 3.9, Rede do Problema

Assumindo que é preciso fornecer os estabelecimentos A , B , C e D com 10U.Q, 20U.Q, 20U.Q, e 50U.Q respetivamente, é expectável uma produção diária de 100U.Q pela plataforma de forma a satisfazer a procura. Qual seria o caminho mais económico para o transporte?

Estabelecimentos	Procura (U.Q)	Custo de transporte para cada estabelecimento (U.M/U.Q)				
		Instalações	Estabelecimentos			
A	10		A	B	C	D
B	20					
C	20	G1	50	40	25	35
D	50	G2	20	35	50	40

Tabela 3.1, Tabela de procura e custos

A *tabela 3.1* indica as informações relativas aos estabelecimentos de abastecimento de combustível, a procura em cada e o custo de transporte das instalações aos estabelecimentos.

O modelo presente neste capítulo também foi usado no programa xpress, logo é apresentado em seguida os dados relativos as restrições do modelo, o vetor da procura e oferta (b), os custos de cada arco (c_{ij}) e as capacidades máximas em cada arco (u_{ij}).

$$b(i) :: [100; 0; 0; -10; -20; -20; -50]$$

$$c_{12} = 2; c_{13} = 4; c_{24} = 4; c_{32} = 8; c_{34} = 6; c_{35} = 10; c_{45} = 2; c_{47} = 8; c_{56} = 10; c_{76} = 2;$$

$$l(i,j) = 0;$$

$$b_i :: [100; 0; 0; -10; -20; -20; -50]$$

$$c_{12} = 110; c_{13} = 120;$$

$$u_{12} = 90; u_{13} = 90;$$

$$c_{24} = 50; c_{25} = 40; c_{26} = 25; c_{27} = 30;$$

$$u_{24} = 25; u_{25} = 25; u_{26} = 25; u_{27} = 25;$$

$$c_{34} = 20; c_{35} = 35; c_{36} = 50; c_{37} = 40;$$

$$u_{34} = 25; u_{35} = 25; u_{36} = 25; u_{37} = 25;$$

3.3.2 Resultados

A *figura 3.10* representa o caminho mais económico para o abastecimento de todos os estabelecimentos da rede. Nota-se que o $G2$ recebe maior quantidade de combustível e abastece maior número de estabelecimentos (3). Pode-se constatar que o estabelecimento (D) é abastecido pelas duas instalações devido ao limite de capacidade diária dos camiões cisterna, a procura em D é de $50U.Q$ que ultrapassa a capacidade máxima diária dos camiões $25U.Q$. O custo total da operação de abastecimento dos estabelecimentos fica então a $14600U.M$, por dia.

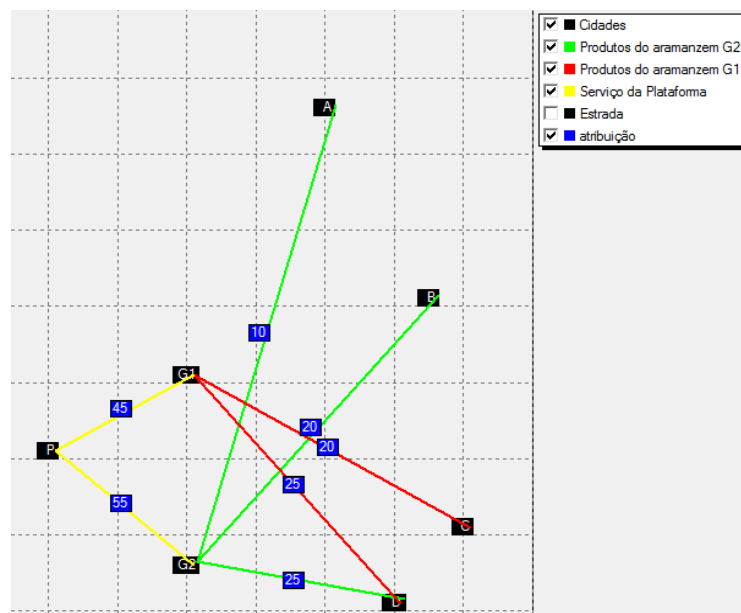


Figura 3.10, Representação gráfica da solução

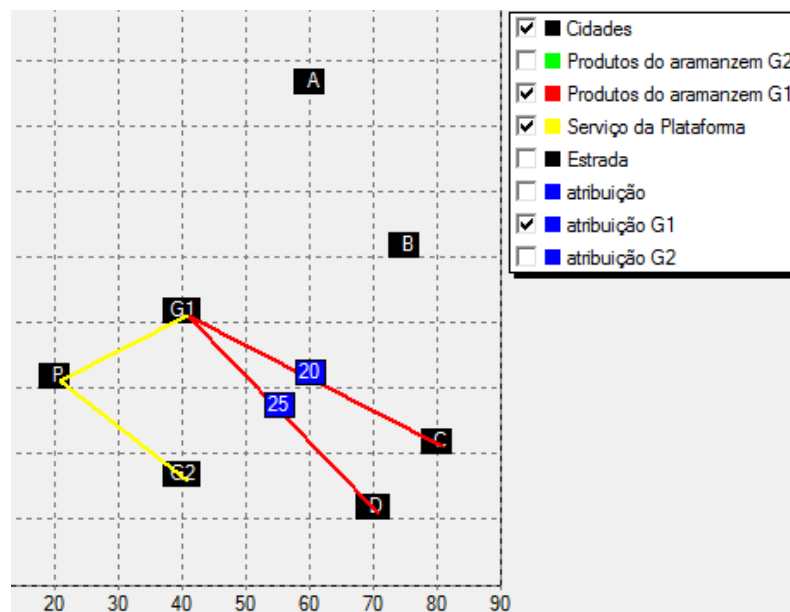


Figura 3.11, Gráfico da distribuição do G1

A *figura 3.11* representa a distribuição efetuada pela instalação *G1*, nota-se que abastece apenas dois estabelecimentos (*C* e *D*) com um custo de 6650U.M.

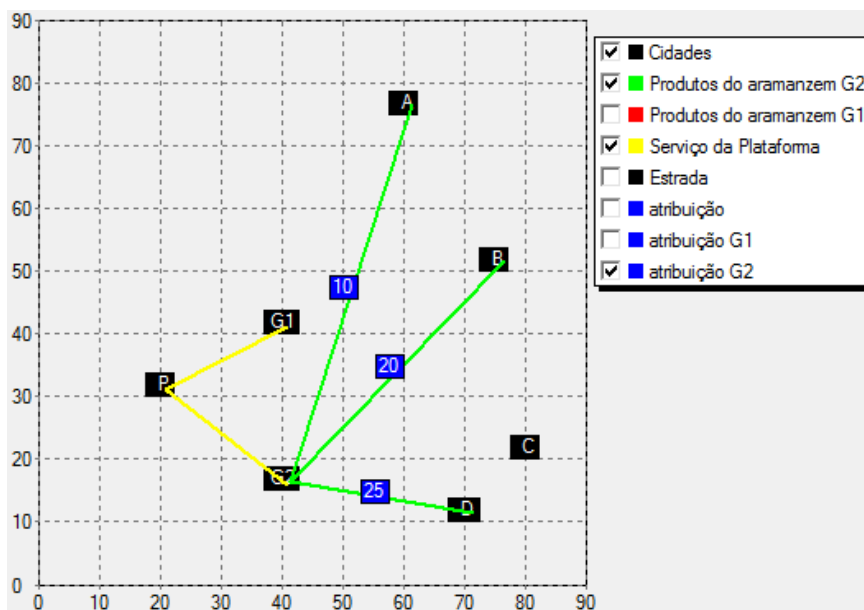


Figura 3.12, Gráfico da distribuição do G2

A *figura 3.12* representa a distribuição efetuada pela instalação G2, devido ao custo menor de transporte marítimo da plataforma para G2, é transportado maior quantidade de petróleo para esta instalação o que leva ao abastecimento de mais estabelecimentos, com isso o custo da operação fica em 7950U.M, cerca de 7% (1300U.M) mais caro que a operação na instalação G1.

3.4 Modelo do Caminho Mais Económico Com Várias Mercadorias

É uma vertente do MCME usado para calcular o caminho mais económico do transporte de mais que uma mercadoria pela rede. O modelo tem as mesmas variáveis de decisão, função objetivo e restrições que o modelo MCME, mas apresenta a introdução de um contador *K* que indica o tipo de mercadoria. No ponto seguinte está descrito os parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e as funções de restrição.

3.4.1 Modelo MCMECVM (Modelo do Caminho Mais Económico Com Várias Mercadorias)

Parâmetros

Rede $G(N,A)$

K ----- Número de produtos

N ----- Número de nós

A ----- Número de arcos

$Q(k, i)$ ---- Procura e oferta da mercadoria k em cada nó i

$U(k, i, j)$ ---- Capacidade do arco ij da mercadoria k

$L(k, i, j)$ ---- Limite inferior do fluxo da mercadoria k em cada arco ij

$C(k, i, j)$ ---- Custo por unidade de fluxo da mercadoria k em cada arco ij

Variáveis de decisão

$x(k, i, j)$ ---- Fluxo da mercadoria k no arco ij

Função objetivo (minimização do custo de transporte de mercadoria pela rede)

$$\text{Min } C = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ijk} x_{ijk}$$

Restrições

Node	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{24}	x_{34}	x_{35}	x_{45}	x_{46}	x_{56}	b
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
2	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	10
3	0	-1	-1	0	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	-1	-1	0	1	1	0	8
5	0	0	0	0	0	-1	-1	0	1	-13
6	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-20

Figura 3.13, Matriz da rede

A figura 3.13 representa a matriz que define a rede. É representada da mesma forma que no modelo MCME.

-Garante a continuidade do fluxo pela rede

$$\sum_j x(k, i, j) - \sum_j x(k, j, i) = Q(k, i) \quad \forall i, k$$

-Restrições de capacidade máxima

$$x(k, i, j) \leq u(k, i, j) \quad \forall k, i, j$$

-Restrições de capacidade mínima, o valor de l_{kij} é sempre igual a 0, de forma a garantir que x_{kij} é sempre real não negativo.

$$x(k, i, j) \geq l(k, i, j) \quad \forall k, i, j$$

3.4.2 Exemplo MCMECVM

Uma empresa produz dois tipos de mercadoria, 1 e 2 produzidas nas fábricas $F1$ e $F2$, respetivamente. A preocupação da empresa é abastecer dois mercados situados nas cidades E e G . A minimização do custo de transporte das mercadorias no fornecimento dos mercados é o objetivo principal, tendo isso em vista determina o custo mínimo de transporte.

A limitação dos camiões é um dado importante, sendo que, por dia, pode-se transportar no máximo 300 unidades por arco e 200 de cada mercadoria por arco. Atendendo a procura dos mercados de 150 U.Q da *mercadoria 1* na cidade E e 200 U.Q da *mercadoria 2* na cidade G , pretende-se encontrar o caminho mais económico para satisfazer a procura. A natureza dos produtos genéricos permite a possibilidade de serem transportados no mesmo camião.

A *figura 3.14* representa a rede do problema proposto neste capítulo, sendo que os valores representados nos arcos indicam o custo de transporte por dia e por U,Q da mercadoria k .

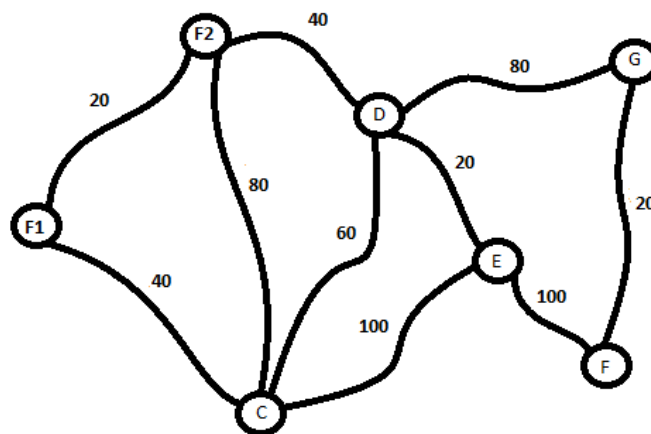


Figura 3.14, Rede do problema de MCMCNFC

3.4.3 Resultados

Atendendo ao limite de capacidade máximo estabelecido no enunciado do exemplo, decidi fazer uma comparação entre uma distribuição com o limite e sem o limite. A *figura 3.14* representa a solução sem limite de capacidade e a *figura 3.15* representa a solução com limite de capacidade.

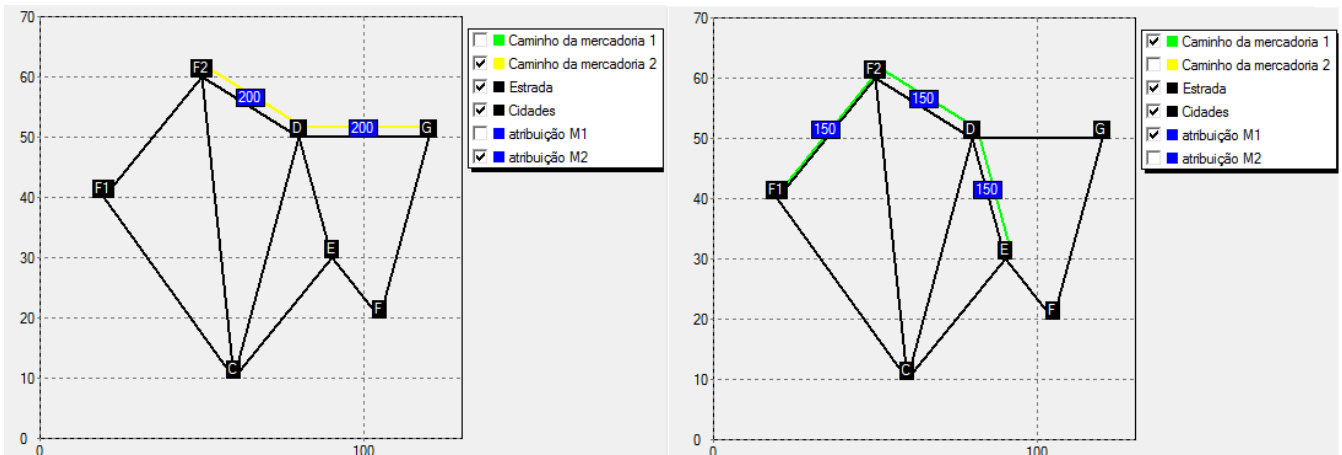


Figura 3.15, Resultado sem limite de capacidade.

Custos associados ao transporte de mercadoria na rede, sem limite de capacidade:

- Custo total do transporte das mercadorias: 36000 U.M
- Transporte da mercadoria 1: 12000 U.M
- Transporte da mercadoria 2: 24000 U.M

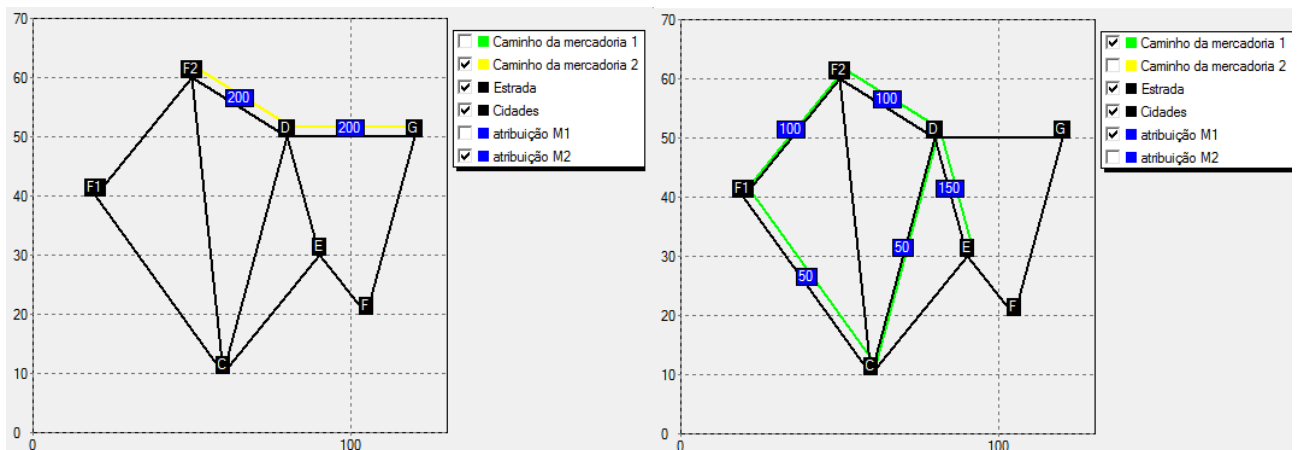


Figura 3.16, Resultado com limite de capacidade.

Custos associados ao transporte de mercadorias na rede, com limite de capacidade:

- Custo total do transporte das mercadorias: 38000 U.M
- Transporte da mercadoria 1: 14000 U.M
- Transporte da mercadoria 2: 24000 U.M

Observando os resultados obtidos pelas duas experiencias consegue-se constatar que, quando se introduz uma capacidade máxima limite existe a utilização de mais arcos que no caso sem limites de capacidade. Pela *figura 3.14* nota-se que o caminho usado para transportar a mercadoria 1 é $F1 \rightarrow F2 \rightarrow D \rightarrow E$, com um custo de transporte de 12000 U.M e o caminho usado para o transporte da mercadoria 2 é $F2 \rightarrow D \rightarrow G$ com um custo de 24000 U.M, logo para satisfazer toda a procura usando uma rede sem limites de capacidade leva a um custo total de 36000 U.M, que é 2000 U.M mais barato caso se introduza na rede um limite de capacidade como indicado no enunciado. Como se pode ver pela *figura 3.15* o aumento do custo de transporte neste caso dá-se pelo aumento do custo de transporte da mercadoria 1 que passa de 12000 U.M para 14000 U.M passando a ser transportado por dois caminhos, 100 U.Q seguem o caminho feito no primeiro caso e 50 U.Q é transportado pelos arcos $F1 \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$.

4. Modelo proposto para uma rede logística multimodal

A logística é constituída por três componentes, transporte, armazenamento e distribuição. O modelo proposto trabalha apenas a vertente do transporte, podendo servir de base para um modelo que inclua todas as outras componentes. O objetivo primordial na organização do transporte de mercadoria é a minimização dos custos, sem prejudicar o fornecimento. O transporte de mercadorias pode ser feito de diversas formas, variando segundo as distâncias, o meio de transporte e as quantidades. Por exemplo, a exportação de um país para outro é feito de quatro formas possíveis, avião, camião, barco ou comboio dependente do posicionamento geográfico e das ligações existentes entre os países. No mundo atual, estes quatro modos de transporte são usados constantemente para a mobilidade das mercadorias e a interação entre eles permite facilitar e diminuir os custos. Este tipo de processo tem vindo a ser cada vez mais estudado.

O modelo proposto inclui a interação modal, mostrando que o custo de ligações intermodais tem uma influência grande na escolha do modo de transporte. A necessidade de introduzir zonas de interação modal, leva à criação de plataformas intermodais que garantem as condições necessárias para a troca modal das mercadorias.

4.1 Redes

A intermodalidade é o fator que mais condiciona a criação da rede no modelo proposto, a solução mais óbvia seria criar duas redes e em seguida ligá-las. Após a tentativas falhadas optamos por outra solução. Não sendo possível, propôs-se outra solução que consiste numa matriz única dividida em 4 partes, duas representando as redes dos modos de transporte e as outras duas partes a representar a ligação entre as redes dos modos. Como todas as matrizes das redes nos modelos de network flows, o número de linhas e colunas é dado pelo

número de nós existentes, neste caso o número de colunas e linhas são o dobro do número de nós, assumindo que metade dos nós representam as cidades e a outra metade as estações do outro modo de transporte. Assumindo que o número de nós é n , temos a primeira rede representa nas células de 1 a n das linhas e colunas, a segunda é representado de $n+1$ a $2*n$ das linhas e colunas, enquanto as restantes células representam as ligações intermodais existentes. A *figura 4.1* exemplifica melhor como funciona a matriz.

	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
B	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
C	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
D	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
E	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
F	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
G	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
A	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
B	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
C	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
D	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
G	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

Figura 4.1, Matriz da rede

A matriz da *figura 4.1* representa a rede intermodal introduzida em um estudo de caso com 7 nós, logo o número de linhas e colunas é 14. A parte amarela representa a rede de um dos modos de transporte. A parte vermelha representa a rede do outro modo e as duas partes em azul indicam as ligações intermodais existente. Como pode-se reparar a matriz é binaria, os valores unitários nas zonas das redes representam as ligações entre os nós das colunas com os nós das linhas e o valor unitário na zona da intermodalidade representa a existência de plataformas de ligação intermodal.

4.2 Parâmetros

- $U(k, i, j)$ é o valor da capacidade máxima do produto k que pode passar pelo arco ij .
- $L(k, i, j)$ é o valor de capacidade mínima do produto k que passa pelo arco ij .
- $C(k, i, j)$ é o custo de transporte da mercadoria k pelo arco ij .
- $Q(k, i)$ é a procura e/ou oferta da mercadoria k no nó i .
- $cfix$ é um custo associado ao carregamento e descarregamento da mercadoria nas plataformas de intermodalidade. Este parâmetro limita o uso de ligações modais para momentos onde o uso compensa realmente no custo final do transporte. No exemplo apresentado no capítulo seguinte e no estudo de caso apresentado no documento este

custo esta associado ao limite mínimo de mercadoria necessário para compensar o uso do comboio na transferência de mercadorias.

4.3 Variáveis de decisão

$x(K, I, J)$ ---- quantidade da mercadoria k que passa pelo arco ij .

A variável $x(k,i,j)$ tem o mesmo significado que em qualquer outro modelo de transferência de fluxo, logo no modelo que estamos a apresentar o valor da variável indica a quantidade de mercadoria k que passa pelo arco ij , como tal assume sempre valores não negativos. Como temos a presença de dois modos de transporte existe arcos de ligação intermodal e arcos das redes. Os intervalos de valores dos contadores apresentados em baixo indicam os arcos tendo em conta o formato da matriz rede proposta no *capítulo 4.1*.

Intervalo de $x(k, i, j)$:

- i entre 1 a n e j entre 1 a n , primeiro modo
- i entre $n+1$ a $2*n$ e j entre $n+1$ a $2*n$, segundo modo
- i entre 1 a n e j entre $n+1$ a $2*n$, ligação intermodal
- i entre $n+1$ a $2*n$ e j entre 1 a n , ligação intermodal

$Y(K, I, J)$ ---- Fator intermodal da mercadoria k na ligação intermodal ij

A variável $Y(k,i,j)$ foi criada com uma associação direta com o custo fixa ($cfix$). É uma variável binaria que assume o valor positivo quando o arco ij de ligação intermodal esta a ser usado e valor nulo quando não esta.

4.4 Função objetivo

$$Min c = \sum_k^{1..K} \sum_i^{1..2*N} \sum_j^{1..2*N} (x(k,i,j) * c(k,i,j) (\forall R(i,j) = 1) + \sum_k^{1..K} \sum_i^{1..N} \sum_j^{N..2*N} cfix * Y(k,i,j)$$

O objetivo da função acima descrita é minimizar o custo de transporte do fluxo pela rede. A função pode ser dividida em duas partes, sendo a primeira dedicada a transferência de mercadoria pelos arcos e a segunda dedicada ao uso das ligações intermodais.

A primeira parte é idêntica ao modelo MCME, representa o custo total de transporte da mercadoria k pela rede, e a segunda parte representa o somatório do custo fixo associado as ligações intermodais existentes.

4.5 Modelação

Parâmetros

Rede R ($2*N, 2*A$)

K ----- Número de produtos

N ----- Número de nós

A ----- Número de arcos

U (k, i, j) ---- Capacidade máxima da mercadoria k no arco ij

L (k, i, j) ---- Capacidade mínima da mercadoria k no arco ij

C (k, i, j) ---- Custo do transporte da mercadoria k pelo arco ij

Q (k, i) ----- Procura e/ou oferta da mercadoria k no nó i

cfix ----- Custo fixo de intermodalidade

Variável de decisão

x (K, I, J) ---- Fluxo da mercadoria k no arco ij

Y (K, I, J) ---- Fator intermodal da mercadoria k na ligação intermodal ij

Função objetivo (minimização do custo de transporte do fluxo pela rede)

$$\text{Min } c = \sum_k^{1..K} \sum_i^{1..2*N} \sum_j^{1..2*N} (x(k, i, j) * c(k, i, j) \quad (\forall R(i, j) = 1) + \sum_k^{1..K} \sum_i^{1..N} \sum_j^{N..2*N} cfix * Y(k, i, j)$$

Restrições

-Garante a continuidade do fluxo pela rede

$$\sum_j x(k, i, j) - \sum_j x(k, j, i) = Q(k, i) \quad \forall i, k$$

-Restrições de capacidade máxima dos arcos ij

$$x(i, j) \leq u(k, i, j) \quad \forall k, i, j$$

-Restrições de capacidade mínima dos arcos ij

$$x(k, i, j) \geq l(k, i, j) \quad \forall k, i, j$$

-Restrição da capacidade máxima dos arcos ij representantes da intermodalidade

$$x(k, i, j) \leq u(k, i, j) * Y_{int}(k, i, j) \quad \forall k, i, j \in K, N, N..2N$$

-Restrição da capacidade mínima dos arcos ij representantes da intermodalidade

$$x(k, i, j) \geq l(k, i, j) * Y_{int}(k, i, j) \quad \forall k, i, j \in K, N, N..2N$$

-Restrições que garante o valor não negativo na transferência da mercadoria k pelo arco ij .

$$X(k, i, j) \geq 0 \quad \forall k, i, j$$

5. Exemplo de aplicação do modelo

Como o objetivo do modelo é encontrar o caminho mais económico para o transporte de carga através de uma rede intermodal, optámos por criar uma rede simples com apenas 7 cidades, ligadas por uma rede rodoviária, situadas em forma de um hexágono com uma cidade no centro (*figura 5.1*). A ligação rodoviária não é a única forma de transporte existente, existe também uma rede ferroviária (*imagem da direita da figura 5.1*) que apenas liga 5 estações situadas nas cidades A, B, C, D e E . A ideia de não fazer chegar a linha ferroviária a todas as cidades advém da tentativa de aproximar o exemplo da realidade.

Para a simulação de carga produzida assumimos a existência de 3 empresas $E1, E2$ e $E3$ situadas nas cidades D, A e C respetivamente. A cada empresa estão associadas as mercadorias 1, 2 e 3, respetivamente.

O transporte diário das mercadorias pela região é feito por dois modos de transporte: o ferroviário e o rodoviário. Com a intenção de diminuir os cálculos associados à movimentação de carga, e observar a influência de usar um ou dois modos de transporte, é feito um estudo à rede da região.

5.1 Rede

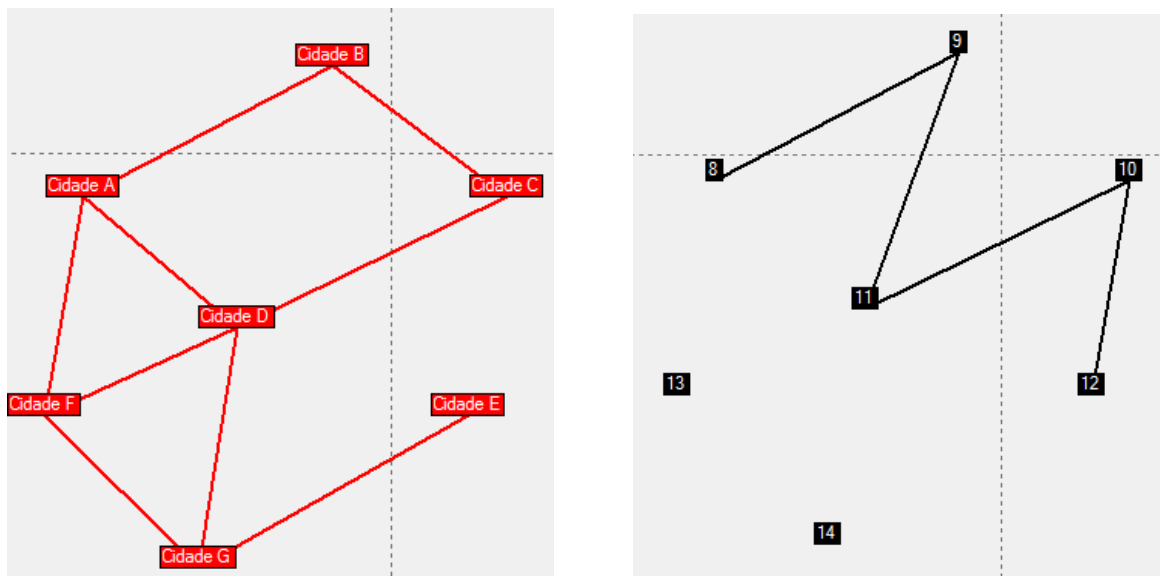


Figura 5.1, rede rodoviária (esquerda), rede ferroviária (direita)

	1	2	3	4	5	6	7
X	90	120	90	60	40	40	5
Y	20	85	130	60	120	10	50

Tabela 5.1, Coordenadas das cidades

A *tabela 5.1* indica o valor das coordenadas assumidas no xpress para a representação gráfica da rede. A distância entre as cidades é dado pela *tabela 5.2* abaixo.

	distâncias entre as cidades						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	72	110	50	112	51	90
2	72	0	54	65	87	110	120
3	110	54	0	76	51	130	117
4	50	65	76	0	63	54	56
5	112	87	51	63	0	110	78
6	51	110	130	54	110	0	53
7	90	120	117	56	78	53	0

Tabela 5.2, Distância entre Cidades

5.2 Dados adicionais

- População nas cidades

Cidade	Habitantes (*100 hab)
1	250
2	150
3	100
4	500
5	60
6	110
7	120

Tabela 5.3, População

A população nas cidades foi criada de forma aleatória, mas com atenção em dois pontos, a cidade D com maior população é a cidade central, as cidades A, B e C são as cidades com ligações ferroviárias logo, têm maior população que as outras duas cidades, como pode-se ver pela *tabela 5.3*.

- Carga de cada produto

Produtos carga	Carga produzida diariamente (U.Q)
mercadoria 1	800
mercadoria 2	450
mercadoria 3	400

Tabela 5.4, Carga produzida de cada mercadoria

A *tabela 5.4* em cima representa a quantidade de mercadoria produzida em cada fábrica que será distribuído pelas cidades da rede.

- Limites de capacidade

Apenas limitamos a capacidade dos arcos ferroviários devido à necessidade de simular a existência de uma carga mínima para o uso do comboio e uma carga máxima para limitar a capacidade ou o limite permitido para cada mercadoria. Os limites de capacidade base foram escolhidos tendo em conta a quantidade de mercadoria produzida e pela expectativa da quantidade que deveria passar por cada arco ferroviário.

-limite mínimo:

-intermodais e ferroviário:

-mercadoria 1: 150

-mercadoria 2: 150

-mercadoria 3: 150

-limite máximo:

-intermodais e ferroviário:

-mercadoria 1: 300

-mercadoria 2: 300

-mercadoria 3: 300

-Capacidade geral da rede (é o limite do somatório das mercadorias que são transportadas pelo arco $x(k, i, j)$):

-plataformas e rede ferroviária:

-máxima: 800

-mínima: 300

- Custos

Sendo o custo do transporte, uma grande percentagem do custo logístico associado a movimentação da mercadoria, é importante definir de forma consistente os custos no exemplo matemático. Como é proposto no modelo, introduzimos quatro custos no exemplo, custo rodoviário, custo ferroviário, custo intermodal e uma taxa fixa intermodal. O custo rodoviário e o custo ferroviário variam com a distância percorrida pela mercadoria e a quantidade de mercadoria que é transportada. Os custos intermodais são divididos em dois, um custo variável que depende da quantidade de mercadoria que é carregada ou descarregada e um custo fixo associado ao limite mínimo de mercadoria necessária para que o use da ligação intermodal seja viável.

-Custo do transporte pela rede rodoviária: 30 U.M / Km / unidades

-Custo do transporte pela rede ferroviária: 15 U.M / Km / unidades

-Custo de operação intermodal: 70 U.M / unidades

-Custo fixo: custo intermodal* Z_{min} *constante (a constante aumenta ou diminui a probabilidade de usar a intermodalidade, tentando garantir que o programa não sobreponha o uso de redes ferroviárias, ou seja enviar mercadorias na mesma direção nos dois sentido contrários)

-Terminal intermodal

-Custo por unidades carregadas: 70 U.M / unidades

-Custo fixo: contante*150*70 = 10*10500 = 105000 U.M (constante =10)

5.2.1 Resultados do programa

Depois de termos corrido o programa usando o modelo proposto, os resultados obtidos foram os seguintes:

A distribuição das mercadorias pela rede tem um custo total 3850 U.M. As tabelas abaixo indicam o custo por arco dividido pelas mercadorias, a *tabela 5.5* indica a mercadoria 1, a *tabela 5.6* a mercadoria 2 e a *tabela 5.7* a mercadoria 3.

Mercadoria 1				
Arco entre cidades		Atribuição (U.Q)	Custos (U.M)	
Origem	Destino		Custo variável	custo fixo
D	A	406	609	-
D	C	73	167	-
D	F	114	183	-
D	G	207	348	-
A	B	128	276	-
G	E	88	206	-
		Total	1789	-

Tabela 5.5, Custos do transporte da mercadoria 1

Na *tabela 5.5* pode-se ver que o custo da distribuição da mercadoria 1 pelas cidades fica a 1789 U.M e que o transporte é feito exclusivamente por via rodoviária, sendo que não existe nenhum custo fixo associado aos arcos usados. O arco com maior custo é a ligação $D \rightarrow A$, com um custo de 609 U.M e o com menor custo é a ligação $D \rightarrow C$ com um custo de 167 U.M.

Mercadoria 2				
Arco entre cidades		Atribuição (U.Q)	Custos (U.M)	
Origem	Destino		Custo variável	custo fixo
A	B	78	167	-
A	D	259	388	-
A	F	113	174	-
B	C	24	38	-
F	G	58	92	-
G	E	23	54	-
		Total	913	-

Tabela 5.6, Custos do transporte da mercadoria 2

Na *tabela 5.6* pode-se ver que o custo da distribuição da mercadoria 2 pelas cidades fica a 913 U.M e que o transporte é feito exclusivamente por via rodoviária. O arco com maior custo é a ligação $A \rightarrow D$, com um custo de 388 U.M e o com menor custo é a ligação $G \rightarrow E$ com um custo de 54 U.M.

Mercadoria 3				
Arco entre cidades		Atribuição (U.Q)	Custos (U.M)	
Origem	Destino		Custo variável	custo fixo
C	B	100	162	-
C	Estação C (10)	300	21	11
B	A	28	61	-
Estação C (10)	Estação D (11)	300	343	-
Estação D (11)	D	300	21	11
D	A	31	46	-
D	F	22	35	-
D	G	77	130	-
G	E	51	119	-
		Total	938	22

Tabela 5.7, Custo do transporte da mercadoria 3

Na *tabela 5.7* pode-se ver que o custo da distribuição da mercadoria 3 pelas cidades fica a 938 U.M e que o transporte é feito maioritariamente por via rodoviária, apesar de ser transportado 300 U.Q por via ferroviária entre as *estações C e D*. O arco com maior custo é a ligação *Estação C → Estação D*, com um custo de 343 U.M e o com menor custo é a ligação *D → F* com um custo de 35 U.M, sendo que os arcos entre as cidades e estações representam o carregamento e descarga de mercadoria em cada estação, nesta tabela tem que o custo de cada uma destas operações fica por 32 U.M (*custo variável + custo fixo*).

De forma a simplificar a leitura dos dados optamos por representa-los graficamente também. As figuras que se seguem correspondem as atribuições de mercadoria em cada arco e mostram como se desloca a mercadoria pela rede.

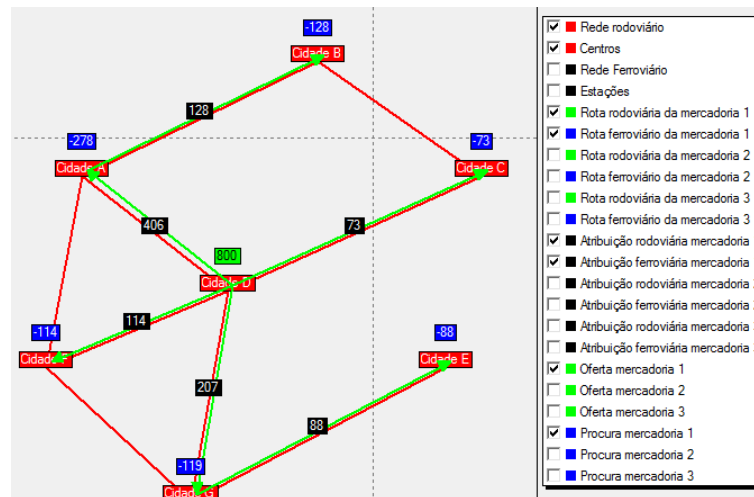


Figura 5.2, Distribuição da mercadoria 1

Pela *figura 5.2* pode-se constatar o que foi dito na *tabela 5.5*, existe um uso exclusivo das ligações rodoviárias. O valor representado em cima das cidades representa a procura e a oferta, (verde a oferta e azul a procura). Os valores em cima dos arcos a verde representam a quantidade de mercadoria transportada em cada arco.

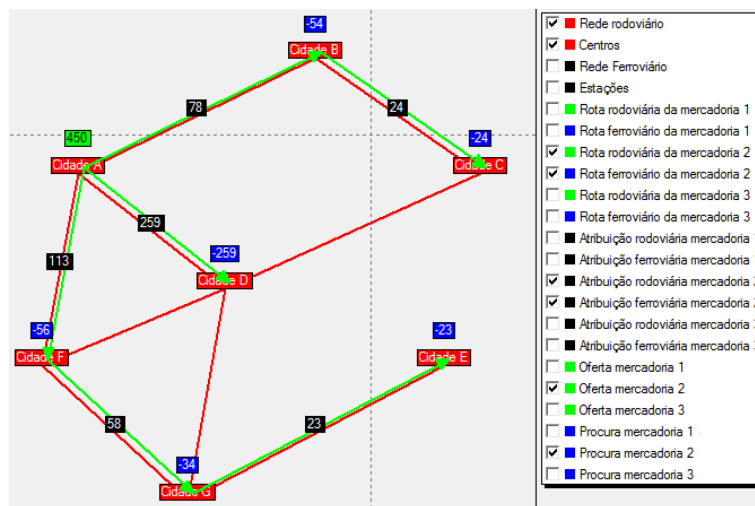


Figura 5.3, Distribuição da mercadoria 2

Pela *figura 5.3* pode-se constatar o que foi dito na *tabela 5.6*, existe um uso exclusivo das ligações rodoviárias. Os valores representados na imagem têm o mesmo significado que os mesmos da *figura 5.2*.

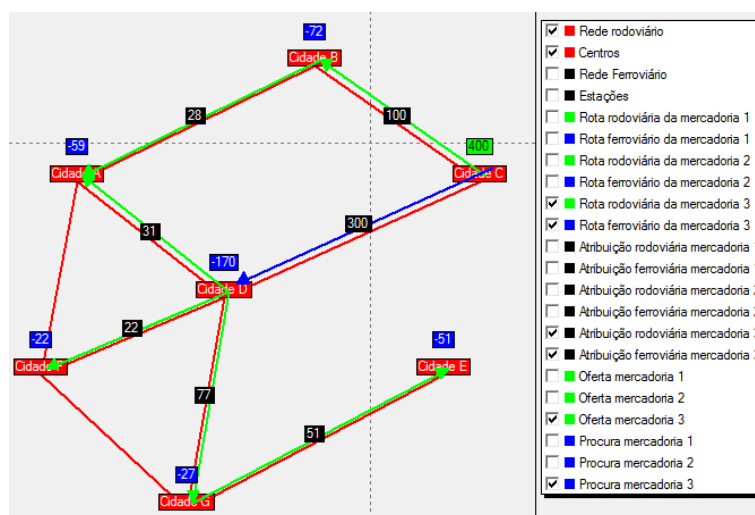


Figura 5.4, Atribuição da mercadoria 3

Pela *figura 5.4* pode-se constatar o que foi dito na *tabela 5.7*, existe o uso de ligações rodoviárias (arcos a verde) e ligações ferroviárias (arco a azul). Os valores representados na imagem têm o mesmo significado que os mesmos da *figura 5.2*. Graficamente pode-se observar porque existiu a preferência do uso da rede ferroviária. O posicionamento da *cidade C* em relação as restantes cidades exige um transporte de grandes quantidades para o lado oposto do mapa, sendo assim, compensa o uso da rede ferroviária ligando as cidades *C* e *D* e depois efetuar uma distribuição rodoviária da mercadoria pelas cidades *A*, *F* e *G*.

5.3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade efetuada consiste na comparação do exemplo proposto no capítulo 5 com cenários feitos alterando os custos e capacidades da rede da figura 5.1. Os três primeiros cenários propõem alterações a nível dos custos de transporte de mercadoria, nomeadamente o custo de transporte rodoviário, custo de transporte ferroviário e o custo fixo e os restantes cenários demostrem a influência das capacidades mínimas e máximas na distribuição de mercadoria pela rede.

5.3.1 Mercadoria 1

O cenário 2 consiste em diminuir o custo intermodal (custo de carregamento e descarga de mercadorias nas plataformas intermodais, neste caso o custo variável) em 50%. O esperado por uma mudança deste género é o aumento do uso da rede ferroviária, tentando atingir os limites máximos de utilização.

Arcos		Mercadoria 1			
		Cenário 1		Cenário 2	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	179	269
Cidade D	Cidade C	73	167	-	-
Cidade D	Cidade F	114	183	114	183
Cidade D	Cidade G	207	348	207	348
Cidade A	Cidade B	128	276	-	-
Cidade G	Cidade E	88	206	88	206
Cidade B	Cidade A	-	-	99	212
Cidade B	Cidade C	-	-	73	118
Cidade D	(11) Estação D	-	-	300	10+5
(11) Estação D	(9) Estação B	-	-	300	292
(9) Estação B	Cidade B	-	-	300	10+5
Custo total (U.M)		1789		1661	

Tabela 5.8, Comparação do cenário 1 com o cenário 2

A tabela 5.8 representa a distribuição da mercadoria 1 pela rede no cenário 1 e no cenário 2, fazendo a comparação entre as atribuições e os custos em cada arco. As células a verde representam os arcos em comum nas distribuições, as células a vermelho e amarelo representam as diferenças entre as quantidades transportadas pelos arcos coexistentes nos dois cenários comparados, sendo a em vermelho com valor maior e a em amarelo com o valor menor. Analisando tabela 5.8 pode-se concluir que no cenário 2 existe o uso da rede ferroviária devido a diminuição do custo associado, como esperado quando proposto a diminuição do custo. Pelo que fica provado que, com a diminuição do custo do uso de um certo modo é muito provável que o uso do modo aumenta. Consequentemente o custo total do transporte da mercadoria 1 diminui em cerca de 7%, ou seja, com a diminuição de 50% do custo intermodal, o custo total do transporte da mercadoria é afetada em cerca 7%.

O *cenário 3* consiste em aumentar em 50% o valor do custo rodoviário, com este aumento espera-se um aumento considerável no valor do custo total da transferência das mercadorias e uma diminuição do uso rodoviário aproximadamente igual ao que acontece no *cenário 1*. Na *tabela 5.9* temos as mesmas diretrizes que a *tabela 5.8*.

Mercadoria 1					
Arcos		Cenário 1		Cenário 3	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	179	538
Cidade D	Cidade C	73	167	-	-
Cidade D	Cidade F	114	183	114	367
Cidade D	Cidade G	207	348	207	695
Cidade A	Cidade B	128	276	-	-
Cidade G	Cidade E	88	206	88	413
Cidade B	Cidade A	-	-	99	424
Cidade B	Cidade C	-	-	73	237
Cidade D	(11) Estação D	-	-	300	21+11
(11) Estação D	(9) Estação B	-	-	300	292
(9) Estação B	Cidade B	-	-	300	21+11
Custo total (U.M)		1789		3029	

Tabela 5.9, Comparação do cenário 1 com o cenário 3

Como pode-se observar os arcos utilizados *no cenário 3* são exatamente iguais aos arcos utilizados no *cenário 2*, com a mesma quantidade de mercadoria transportada. A diferença entre os cenários é o custo que dispara para aproximadamente o dobro do anterior.

Com o aumento do custo rodoviário em 50% o custo total da operação associada a mercadoria 1 passa a ser 70% maior, o que indica a grande influência do custo rodoviário na rede com limites de capacidade. Os arcos ferroviários que podiam ser usados estão com uma saturação máxima tendo em conta que o limite máximo pelos arcos ferroviários é de 300 U.Q.

O *cenário 4* consistiu em aumentar o custo de transporte ferroviário em 50%, esperando com esta alteração demonstrar que com o aumento do custo ferroviário a rede rodoviária seria mais solicitada. Comparando com o *cenário 1* (*tabela 5.10*) não há alteração nos arcos utilizados para o transporte da mercadoria 1 como esperado, tendo em conta que no *cenário 1* só utilizado a rede rodoviária.

Mercadoria 1					
Arcos		Cenário 1		Cenário 4	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	406	609
Cidade D	Cidade C	73	167	73	167
Cidade D	Cidade F	114	183	114	183
Cidade D	Cidade G	207	348	207	348
Cidade A	Cidade B	128	276	128	276
Cidade G	Cidade E	88	206	88	206
Custo total (U.M)		1789		1789	

Tabela 5.10, comparação do cenário 1 com o cenário 4

O *cenário 5* consiste em criar uma rede sem limites de capacidade mínimas e máximas esperando que com isso seja utilizado sempre o modo de transporte mais adequando a atingir o objetivo de minimizar o custo total de transporte da mercadoria 1.

Observando a *tabela 5.11* pode-se ver que o *cenário 5* usa muito a rede ferroviária, fazendo chegar a mercadoria nas cidades B, C e E através da rede ferroviária ao contrário do que acontece no *cenário 1*. O custo total de transporte da mercadoria no *cenário 5* tem cerca de menos 32% em relação ao custo do *cenário 1*.

Arcos		Mercadoria 1			
		Cenário 1		Cenário 5	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	278	417
Cidade D	Cidade C	73	167	-	-
Cidade D	Cidade F	114	183	114	183
Cidade D	Cidade G	207	348	119	200
Cidade A	Cidade B	128	276	-	-
Cidade G	Cidade E	88	206	-	-
Cidade D	(11) Estação D	-	-	289	20
(9) Estação B	Cidade B	-	-	128	9
(10) Estação C	Cidade C	-	-	73	5
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	88	67
(11) Estação D	(9) Estação B	-	-	128	125
(11) Estação D	(10) Estação C	-	-	161	184
(12) Estação E	Cidade E	-	-	88	6
Custo total (U.M)		1789		1217	

Tabela 5.11, Comparação do cenário 1 com o cenário 5

O *cenário 6* consiste em diminuir o limite máximo de capacidade ferroviária e manter nulo o limite mínimo de capacidade, com isso era esperado uma diminuição no uso da rede ferroviária devido a incapacidade de transportar muita mercadoria.

Observando a *tabela 5.12* pode-se constatar que nos arcos $D \rightarrow A$ e $D \rightarrow G$ do *cenário 6* há uma diminuição de carga transportada em relação ao *cenário 1*. O uso da rede ferroviária é aumentado em comparação com o *cenário 1* contrário do esperado. Devido a inexistência da capacidade mínima é usado a rede ferroviária para transportar parte das cargas o que leva a diminuição da carga transportada nos arcos $D \rightarrow A$ e $D \rightarrow G$ mas também existe um aumento de mercadoria a ser transportado pelo arco $D \rightarrow C$ mostrando a preferência pela rede rodoviária. Com estas características o custo de transporte de mercadoria diminui cerca de 24%.

Mercadoria 1					
Arcos		Cenário 1		Cenário 6	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	278	417
Cidade D	Cidade C	73	167	139	318
Cidade D	Cidade F	114	183	114	183
Cidade D	Cidade G	207	348	119	200
Cidade A	Cidade B	128	276	-	-
Cidade G	Cidade E	88	206	-	-
Cidade C	(10) Estação C	-	-	66	5
Cidade D	(11) Estação D	-	-	150	11
(9) Estação B	Cidade B	-	-	128	9
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	88	67
(11) Estação D	(9) Estação B	-	-	128	125
(11) Estação D	(10) Estação C	-	-	22	25
(12) Estação E	Cidade E	-	-	88	6
Custo total (U.M)		1789		1366	

Tabela 5.12, Comparação do cenário 1 com o cenário 6

O *cenário 7* demonstra a influência da capacidade mínima na rede, aumentando a capacidade mínima é optado sempre a rede rodoviária para transportar as mercadorias. A *tabela 5.13* demonstra como o resultado obtido é exatamente igual ao *cenário 1* que assume os mesmos arcos para o transporte da mercadoria. Os valores dos custos e das quantidades transportadas em cada arco são os mesmos, o que resulta num custo total igual.

Mercadoria 1					
Arcos		Cenário 1		Cenário 7	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade D	Cidade A	406	609	406	609
Cidade D	Cidade C	73	167	73	167
Cidade D	Cidade F	114	183	114	183
Cidade D	Cidade G	207	348	207	348
Cidade A	Cidade B	128	276	128	276
Cidade G	Cidade E	88	206	88	206
Custo total (U.M)		1789		1789	

Tabela 5.13, Comparação do cenário 1 com o cenário 7

5.3.2 Mercadoria 2

Os cenários utilizados para a mercadoria 2 são os mesmos que os cenários usados para a mercadoria 1, logo é apresentado em seguida as tabelas de comparação entre os cenários com as mesmas características que as anteriores.

Pela *tabela 5.14* pode-se notar que não existe diferença no transporte de mercadoria 2 se compararmos o *cenário 1* com o *cenário 2*.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 2	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	78	167
Cidade A	Cidade D	259	388	259	388
Cidade A	Cidade F	113	174	113	174
Cidade B	Cidade C	24	38	24	38
Cidade F	Cidade G	58	92	58	92
Cidade G	Cidade E	23	54	23	54
Custo total (U.M)		913		913	

Tabela 5.14, comparação do cenário 1 com o cenário 2

A *tabela 5.15* faz a comparação entre os *cenários 1 e 3* como esperado com o aumento do custo rodoviário o custo total aumente consideravelmente e o uso da rede ferroviária também aumenta. Apesar da preferência no uso da rede ferroviária ainda existe o uso da rede rodoviária, devido ao limite de capacidade máxima da rede ferroviária e do facto de não haver ligação ferroviária para todas as cidades. Com isto o custo total sofre um aumento de aproximadamente 43%.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 3	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	54	233
Cidade A	Cidade D	259	388	-	-
Cidade A	Cidade F	113	174	96	293
Cidade B	Cidade C	24	38	-	-
Cidade F	Cidade G	58	92	40	127
Cidade G	Cidade E	23	54	23	109
Cidade A	(8) Estação A	-	-	300	21+10
Cidade D	Cidade C	-	-	24	108
Cidade D	Cidade G	-	-	18	59
(8) Estação A	(9) Estação B	-	-	300	322
(9) Estação A	(11) Estação D	-	-	300	292
(11) Estação D	Cidade D	-	-	300	21+10
Custo total (U.M)		913		1606	

Tabela 5.15, comparação do cenário 1 com o cenário 3

A *tabela 5.16* demonstra o que foi comprovado na mercadoria 1, com o aumento do custo ferroviário só é usado a rede rodoviária para o transporte da mercadoria.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 4	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	78	167
Cidade A	Cidade D	259	388	259	388
Cidade A	Cidade F	113	174	113	174
Cidade B	Cidade C	24	38	24	38
Cidade F	Cidade G	58	92	58	92
Cidade G	Cidade E	23	54	23	54
Custo total (U.M)		913		913	

Tabela 5.16, comparação do cenário 1 com o cenário 4

A *tabela 5.17* representa a comparação com o *cenário 5* como no caso da mercadoria 1 o uso da rede ferroviária aumenta, tendo em conta que o custo é menor, e como não tem um limite de capacidade pode-se transportar o que for necessário. Com isso o custo total diminui em cerca de 13%.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 5	
		carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	-	-
Cidade A	Cidade D	259	388	305	458
Cidade A	Cidade F	113	174	90	138
Cidade B	Cidade C	24	38	-	-
Cidade F	Cidade G	58	92	34	55
Cidade G	Cidade E	23	54	-	-
Cidade D	(11) Estação D	-	-	47	3
Cidade A	(8) Estação A	-	-	54	4
(8) Estação A	(9) Estação B	-	-	54	58
(9) Estação B	Cidade B	-	-	54	4
(10) Estação C	Cidade C	-	-	24	2
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	23	18
(11) Estação D	(10) Estação C	-	-	47	53
(12) Estação E	Cidade E	-	-	23	2
Custo total (U.M)		913		795	

Tabela 5.17, comparação do cenário 1 com o cenário 5

A *tabela 5.18* demonstra a comparação com o *cenário 6*, pode-se ver que no arco $A \rightarrow D$ existe um aumento de mercadoria transportado e nos arcos $A \rightarrow F$ e $F \rightarrow G$ uma diminuição de mercadoria transportada. O custo sofre um decréscimo de cerca de 13% em relação ao *cenário 1*.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 6	
		carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	-	-
Cidade A	Cidade D	259	388	305	458
Cidade A	Cidade F	113	174	90	138
Cidade B	Cidade C	24	38	-	-
Cidade F	Cidade G	58	92	34	55
Cidade G	Cidade E	23	54	-	-
Cidade A	(8) Estação A	-	-	54	4
Cidade D	(11) Estação D	-	-	47	3
(8) Estação A	(9) Estação B	-	-	54	58
(9) Estação B	Cidade B	-	-	54	4
(10) Estação C	Cidade C	-	-	24	2
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	23	18
(11) Estação D	(10) Estação C	-	-	47	53
(12) Estação E	Cidade E	-	-	23	2
Custo total (U.M)		913		795	

Tabela 5.18, comparação do cenário 1 com o cenário 6

A *tabela 5.19* demonstra a comparação com o *cenário 7*, como acontece no transporte da mercadoria 1 com o aumento da capacidade mínima da rede ferroviária terá uso exclusivo da rede rodoviária. O custo final não se altera tendo em conta que os arcos e as quantidades usadas são iguais nos dois cenários.

Mercadoria 2					
Arcos		Cenário 1		Cenário 7	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade A	Cidade B	78	167	78	167
Cidade A	Cidade D	259	388	259	388
Cidade A	Cidade F	113	174	113	174
Cidade B	Cidade C	24	38	24	38
Cidade F	Cidade G	58	92	58	92
Cidade G	Cidade E	23	54	23	54
Custo total (U.M)		913		913	

Tabela 5.19, comparação do cenário 1 com o cenário 7

5.3.3 Mercadoria 3

Tendo em conta que os cenários apresentados para comparação do que acontece ao transporte das mercadorias é igual para as três mercadorias as tabelas apresentadas no 5.3.3 serviram apenas de informação de valores em relação ao transporte da mercadoria 3.

A *tabela 5.20* demonstra o que acontece ao transporte da mercadoria 3 quando se compara o *cenário 1* com o *cenário 2*. Como o caminho mais curto associado ao *cenário 1* usa a rede ferroviária o custo de transporte no *cenário 2* é ligeiramente menor, as alterações de custo aparecem nos arcos de ligação entre cidades e estações, o que demonstra a influência do custo intermodal.

Mercadoria 3					
Arcos		Cenário 1		Cenário 2	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	100	162
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	300	11+5
Cidade B	Cidade A	28	61	28	61
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	300	343
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	300	10+5
Cidade D	Cidade A	31	46	31	46
Cidade D	Cidade F	22	35	22	35
Cidade D	Cidade G	77	130	77	130
Cidade G	Cidade E	51	119	51	119
Custo total (U.M)		959		927	

Tabela 5.20, comparação do cenário 1 com o cenário 2

A *tabela 5.21* compara o *cenário 1* com o *cenário 3*. O caminho para o transporte é mantido o que leva a um aumento de custo significativo devido ao uso da rede rodoviária. O principal fator que leva a não alteração dos arcos escolhidos é a posição da cidade produtora (*cidade C*) e o limite de capacidade mínima da rede ferroviária. O custo total sofre um aumento aproximado de 36% em relação ao *cenário 1*.

Mercadoria 3					
Arcos		Cenário 1		Cenário 3	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	100	324
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	300	21+11
Cidade B	Cidade A	28	61	28	121
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	300	343
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	300	21+10
Cidade D	Cidade A	31	46	31	92
Cidade D	Cidade F	22	35	22	71
Cidade D	Cidade G	77	130	77	260
Cidade G	Cidade E	51	119	51	238
Custo total (U.M)		959		1512	

Tabela 5.21, comparação do cenário 1 com o cenário 3

A tabela 5.22 compara o cenário 1 com o cenário 4. Com o aumento do custo ferroviário há uma diminuição do uso da rede rodoviária como pode-se reparar pela mercadoria transportada nos arcos $C \rightarrow B$ e $B \rightarrow A$. Com o aumento do uso rodoviário o custo aumentou em cerca de 22%.

Mercadoria 3					
Arcos		Cenário 1		Cenário 4	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	131	212
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	-	-
Cidade B	Cidade A	28	61	59	126
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	-	-
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	-	-
Cidade D	Cidade A	31	46	-	-
Cidade D	Cidade F	22	35	22	35
Cidade D	Cidade G	77	130	77	130
Cidade G	Cidade E	51	119	51	119
Cidade C	Cidade D	-	-	269	615
Custo total (U.M)		959		1238	

Tabela 5.22, comparação do cenário 1 com o cenário 4

Comparando o cenário 1 com o cenário 5 há uma ligeira alteração nos arco usado para o transporte da mercadoria 3 havendo um equilíbrio no aumento e diminuição do uso das duas redes como pode-se ver pela tabela 5.23, mas que leva a uma diminuição de custo total em aproximadamente 28%.

Mercadoria 3					
Arcos		Cenário 1		Cenário 5	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	72	117
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	328	23
Cidade B	Cidade A	28	61	-	-
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	277	317
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	277	19
Cidade D	Cidade A	31	46	59	88
Cidade D	Cidade F	22	35	22	35
Cidade D	Cidade G	77	130	27	45
Cidade G	Cidade E	51	119	-	-
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	51	39
(12) Estação E	Cidade E	-	-	51	4
Custo total (U.M)		959		687	

Tabela 5.23, comparação do cenário 1 com o cenário 5

Comparando o *cenário 1* com o *cenário 6* pela *tabela 5.24*, pode-se constatar que devido ao facto da capacidade mínima ser nula o uso da rede ferroviária não é nula, mas não atinge valores altos devido a diminuição da capacidade máxima. A uma preferência no uso da rede ferroviária em detrimento da rede rodoviária que leva a uma diminuição do custo total de transporte de mercadoria 3, há um decréscimo de 6%.

Mercadoria 3					
Arcos		Cenário 1		Cenário 6	
		carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q.	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	131	212
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	150	11
Cidade B	Cidade A	28	61	-	-
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	99	113
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	99	7
Cidade D	Cidade A	31	46	-	-
Cidade D	Cidade F	22	35	22	35
Cidade D	Cidade G	77	130	27	45
Cidade G	Cidade E	51	119	-	-
Cidade B	(9) Estação B	-	-	59	4
Cidade C	Cidade D	-	-	119	273
(8) Estação A	Cidade A	-	-	59	4
(9) Estação B	(8) Estação A	-	-	59	63
(10) Estação C	(12) Estação E	-	-	51	39
(12) Estação E	Cidade E	-	-	51	4
Custo total (U.M)		959		809	

Tabela 5.24, comparação do cenário 1 com o cenário 6

O *cenário 7* demonstra a influência da capacidade mínima na rede, com o aumento da capacidade mínima o transporte ferroviário anula como pode-se constatar pela *tabela 5.25*, optando exclusivamente pelo uso da rede rodoviária levando a um aumento do custo total em 22%.

Arcos		Mercadoria 3			
		Cenário 1		Cenário 7	
		carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)	carga transportada U.Q	Custo U.M (*10)
Cidade C	Cidade B	100	162	131	212
Cidade C	(10) Estação C	300	21+11	-	-
Cidade B	Cidade A	28	61	59	126
(10) Estação C	(11) Estação D	300	343	-	-
(11) Estação D	Cidade D	300	21+10	-	-
Cidade D	Cidade A	31	46	-	-
Cidade D	Cidade F	22	35	22	35
Cidade D	Cidade G	77	130	77	130
Cidade G	Cidade E	51	119	51	119
Cidade C	Cidade D	-	-	269	615
Custo total (U.M)		959		1238	

Tabela 5.25, comparação do cenário 1 com o cenário 7

5.3.4 Tabela de comparação dos custos

A *tabela 5.26* resume todos os custos determinados nos cenários apresentados anteriormente, adicionando uma comparação dos custos em percentagens consoante o aumento ou diminuição do custo, percentagens negativas representam um aumento de custo e as percentagens positivas diminuição dos custos.

	Custos (U.M)						
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
Mercadoria 1	1789	1661	3029	1789	1217	1366	1789
Mercadoria 2	913	913	1606	913	795	795	913
Mercadoria 3	959	927	1512	1238	687	809	1238
Total	3661	3501	6147	3940	2699	2970	3940
Diferença Percentual M1	0	7%	-69%	0%	32%	24%	0%
Diferença Percentual M2	0	0%	-76%	0%	13%	13%	0%
Diferença Percentual M3	0	3%	-58%	-29%	28%	16%	-29%
Diferença percentual do total	0	4%	-68%	-8%	26%	19%	-8%

Tabela 5.26, Tabela de comparação de custos

Pode-se constatar que o cenário com maior custo é o *cenário 3*, onde foi proposto um aumento de 50% no custo rodoviário. Devido ao limite de capacidade máxima introduzida na rede ferroviária e a existência de estações em apenas algumas cidades não se conseguiu transportar toda a mercadoria via rede ferroviária, logo a quantidade transportada na rede rodoviária tem um custo muito maior que nos outros cenários. Concluindo o custo total sobe cerca de 68%. Como esperado o *cenário 5* é o com menor custo, tendo em conta que é a rede sem quaisquer limites de capacidade o que leva o programa em escolher a distribuição ótima de mercadoria pelas redes, diminuindo o custo em relação ao *cenário 1* em cerca de 26%.

6. ESTUDO DE CASO: PORTUGAL CONTINENTAL

6.1 Introdução

O caso de estudo apresentado a seguir tem o objetivo de demonstrar a utilização do modelo em um cenário mais próximo da realidade, usando uma rede baseada no mapa de Portugal continental, em que os nós são as cidades centrais de cada NUT III tendo em conta as divisões europeias, como se pode observar pela *figura 6.1*.

Para a rede rodoviária temos um total de 29 nós apesar de haver 28 NUT III em Portugal, porque incluímos a cidade de Sines devido a importância que tem para logística de Portugal por causa do porto, apesar de não ser a cidade central de Alentejo litoral,.

Para a rede ferroviária paralela a rede rodoviária assumimos uma rede com 34 nós, baseada na rede da CP.

Como mercadorias a serem transportadas propomos a cortiça e o cimento, assumindo as cidades de produção como a origem da distribuição de mercadoria. Para a cortiça temos como cidades de produção Portalegre, Évora e Beja, para a distribuição de cimento temos como cidades de produção Setúbal, Lisboa, Coimbra e Leiria.

No final apresentamos uma análise dos resultados obtidos pela aplicação das condições atrás descritas, no modelo.

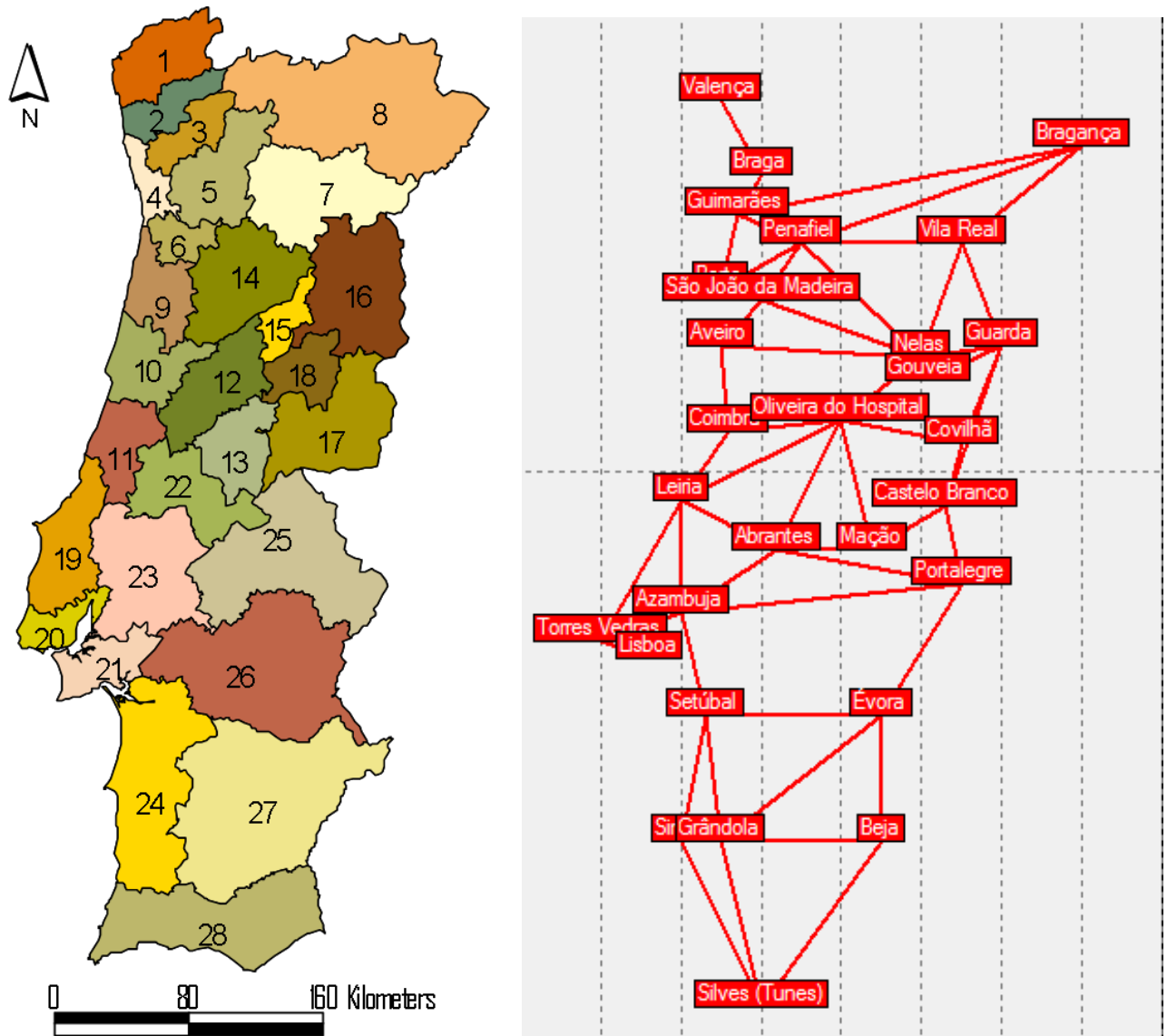


Figura 6.1, Mapa de Portugal, NUT III (esquerda), rede proposto (direita)

A figura 6.1, como pode-se ver é o mapa de Portugal, a esquerda tem um mapa dividido em NUTIII e a figura a direita representa a nossa adaptação para a aplicação do modelo. A lista em baixo indica os nomes das NUT III.

- | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| 1-Minho-Lima | 10-Baixo Mondego | 19-Oeste | 28-Algarve. |
| 2-Cávado | 11-Pinhal Litoral | 20-Grande Lisboa | |
| 3-Ave | 12-Pinhal Interior Norte | 21-Península de Setúbal | |
| 4-Grande Porto | 13-Pinhal Interior Sul | 22-Médio Tejo; | |
| 5-Tâmega | 14-Dão-Lafões | 23-Lezíria do Tejo | |
| 6-Entre Douro e Vouga | 15 - Serra da Estrela | 24-Alentejo Litoral | |
| 7-Douro | 16-Beira Interior Norte | 25-Alto Alentejo | |
| 8-Alto Trás-os-Montes | 17-Beira Interior Sul | 26-Alentejo Central | |
| 9-Baixo Vouga | 18-Cova da Beira | 27-Baixo Alentejo | |

6.2 Redes

O caso de estudo tem duas redes de transporte de mercadoria, uma rede rodoviária e uma rede ferroviária.

A rede rodoviária tem 29 nós, sendo os nós as cidades centrais de cada NUT III e Sines. A distância entre as cidades foram calculadas tendo em conta a distância em linha reta entre as coordenadas das mesmas na rede baseada em Portugal continental.

A rede ferroviária tem 34 nós e é baseada na rede da CP, a distância entre cada nó é calculada da mesma forma que na rede rodoviária e existe 20 pontos de ligação entre as redes, zonas de ligação intermodal.

6.2.1 Nós

Para a modelação é importante uma caracterização mínima dos nós, no caso de estudo apresentado precisamos conhecer a população em cada nó e a distância entre os nós.

A população foi determinada tendo como base os censos de 2011 (www.ine.pt), sendo assim a população em cada cidade é indicada na *tabela 6.1*.

População					
1	Valença	1400	16	Guarda	4200
2	Braga	11700	17	Castelo Branco	5600
3	Guimarães	15800	18	Covilhã	5100
4	Porto	23700	19	Torres Vedras	7900
5	Penafiel	7200	20	Lisboa	54700
6	São João da madeira	2100	21	Setúbal	11800
7	Vila Real	5100	22	Abrantes	3900
8	Bragança	3500	23	Azambuja	2100
9	Aveiro	7800	24	Sines	1400
10	Coimbra	14300	25	Portalegre	2400
11	Leiria	12600	26	Évora	5600
12	Oliveira do Hospital	2000	27	Beja	3500
13	Mação	700	28	Silves (tunes)	3700
14	Nelas	1400	29 (ponto nuts 24)	Grândola	1400
15	Gouveia	1400			

Tabela 6.1, População das cidades em nº de habitantes.

A distância entre cada cidade foi calculada tendo em conta as coordenadas definidas para as mesmas na criação da rede baseada no mapa de Portugal continental, a *tabela 6.2* indica as coordenadas utilizadas para cada cidade e a *tabela 6.3* as coordenadas das estações. Usando o teorema de Pitágoras e os valores das coordenadas calculamos a distância entre os nós.

	Cidades	X	Y		Cidades	X	Y
1	Valença	45	165	16	Guarda	80	122
2	Braga	50	152	17	Castelo Branco	73	94
3	Guimarães	47	145	18	Covilhã	75	105
4	Porto	45	132	19	Torres Vedras	30	70
5	Penafiel	55	140	20	Lisboa	36	67
6	São João da madeira	50	130	21	Setúbal	43	57
7	Vila Real	75	140	22	Abrantes	52	86
8	Bragança	90	157	23	Azambuja	40	75
9	Aveiro	45	122	24	Sines	40	35
10	Coimbra	46	107	25	Portalegre	75	80
11	Leiria	40	95	26	Évora	65	57
12	Oliveira do Hospital	60	109	27	Beja	65	35
13	Mação	64	86	28	Silves (tunes)	50	6
14	Nelas	70	120	29	Grândola	45	35
15	Gouveia	71	116				

Tabela 6.2, Coordenadas nodais da rede rodoviária

	Estações	X	Y		Estações	X	Y
1	Valença	45	165	18	Leiria	40	95
2	Caminha	42	160	19	Pombal	45	95
3	Barcelos	44	154	20	Entroncamento	44	86
4	Braga	50	152	21	Abrantes	52	86
5	Famalicão	55	150	22	Baixa de Amieira-Envendos (Mação)	64	86
6	Guimarães	47	145	23	Castelo Branco	73	94
7	Ermesinde	46	141	24	Bombareal	32	80
8	Porto	45	132	25	Torres Vedras	30	70
9	Penafiel	55	140	26	Lisboa	36	67
10	São João da madeira	50	130	27	Entrecampos	30	64
11	Aveiro	45	122	28	Azambuja	40	75
12	Pampilhosa (mealhada)	47	114	29	Pragal (Almada)	35	55
13	Coimbra	46	107	30	Setúbal	43	57
14	Alfarelos (Soure)	45	103	31	Évora	65	57
15	Carregal do Sal	57	114	32	Grândola	45	35
16	Nelas	70	120	33	Tunes (Silves)	50	6
17	Guarda	80	122	34	Faro	63	5

Tabela 6.3, Coordenadas nodais da rede ferroviária

A procura em cada cidade é calculado tendo em conta a população existente, a distância entre as cidades e a oferta da rede. Supondo que é produzido cerca de 5000 U.Q, 10000 U.Q e 8000 U.Q de cortiça nas cidades Portalegre, Évora e Beja respetivamente e 5000 U.Q, 3000 U.Q, 8000 U.Q e 12000 U.Q de cimento nas cidades de Setúbal, Leiria, Coimbra e Lisboa respetivamente.

Os valores apresentados na *tabela 6.4* são a procura e a oferta da cortiça na rede. As células a verde indicam as cidades onde existe a oferta, e os valores a negativo são a procura em cada cidade. Pode-se reparar que a procura em lisboa é sempre maior pela aproximação as cidades produtoras (Alentejo) e por ser o maior centro populacional da rede. A cidade com menor procura é a cidade de Valença devido ao posicionamento geográfico, a cidade mais distante.

Procura e Oferta, Cortiça (U.Q)																	
Portalegre				Évora				Beja									
1	Valença	-15	16	Guarda	-95	1	Valença	-25	16	Guarda	-125	1	Valença	-22	16	Guarda	-98
2	Braga	-147	17	Castelo Branco	-379	2	Braga	-241	17	Castelo Branco	-293	2	Braga	-204	17	Castelo Branco	-193
3	Guimarães	-214	18	Covilhã	-195	3	Guimarães	-349	18	Covilhã	-206	3	Guimarães	-292	18	Covilhã	-148
4	Porto	-318	19	Torres Vedras	-164	4	Porto	-606	19	Torres Vedras	-420	4	Porto	-492	19	Torres Vedras	-328
5	Penafiel	-109	20	Lisboa	-1274	5	Penafiel	-171	20	Lisboa	-3536	5	Penafiel	-140	20	Lisboa	-2606
6	São João da madeira	-36	21	Setúbal	-287	6	São João da madeira	-56	21	Setúbal	-1064	6	São João da madeira	-45	21	Setúbal	-780
7	Vila Real	-81	22	Abrantes	-157	7	Vila Real	-121	22	Abrantes	-243	7	Vila Real	-99	22	Abrantes	-152
8	Bragança	-43	23	Azambuja	-57	8	Bragança	-67	23	Azambuja	-135	8	Bragança	-58	23	Azambuja	-92
9	Aveiro	-145	24	Sines	-24	9	Aveiro	-227	24	Sines	-83	9	Aveiro	-180	24	Sines	-115
10	Coimbra	-346	25	Portalegre	5000	10	Coimbra	-530	25	Portalegre	-190	10	Coimbra	-395	25	Portalegre	-107
11	Leiria	-317	26	Évora	-214	11	Leiria	-549	26	Évora	10000	11	Leiria	-399	26	Évora	-524
12	Oliveira do Hospital	-59	27	Beja	-73	12	Oliveira do Hospital	-76	27	Beja	-315	12	Oliveira do Hospital	-55	27	Beja	8000
13	Mação	-53	28	Silves (tunes)	-45	13	Mação	-48	28	Silves (tunes)	-138	13	Mação	-28	28	Silves (tunes)	-233
14	Nelas	-33	29	Grândola	-25	14	Nelas	-44	29	Grândola	-93	14	Nelas	-34	29	Grândola	-144
15	Gouveia	-37				15	Gouveia	-47				15	Gouveia	-35			

Tabela 6.4, Oferta e procura

Nas *tabelas 6.5 e 6.6* encontram-se os valores da procura e da oferta do cimento, os valores das células têm o mesmo significado que na *tabela 6.4*.

A *tabela 6.5* tem os valores da procura quando o cimento é produzido em Coimbra e em leiria, as cidades com maior e menor procura continuam a ser Lisboa e Valença.

Procura e Oferta, Cimento (U.Q)											
Coimbra						Leiria					
1	Valença	-29	16	Guarda	-137	1	Valença	-9	16	Guarda	-39
2	Braga	-314	17	Castelo Branco	-226	2	Braga	-91	17	Castelo Branco	-76
3	Guimarães	-503	18	Covilhã	-212	3	Guimarães	-141	18	Covilhã	-63
4	Porto	-1147	19	Torres Vedras	-237	4	Porto	-285	19	Torres Vedras	-132
5	Penafiel	-255	20	Lisboa	-1606	5	Penafiel	-68	20	Lisboa	-870
6	São João da madeira	-109	21	Setúbal	-285	6	São João da madeira	-26	21	Setúbal	-139
7	Vila Real	-141	22	Abrantes	-216	7	Vila Real	-40	22	Abrantes	-117
8	Bragança	-64	23	Azambuja	-78	8	Bragança	-20	23	Azambuja	-47
9	Aveiro	-628	24	Sines	-23	9	Aveiro	-128	24	Sines	-10
10	Coimbra	8000	25	Portalegre	-73	10	Coimbra	-479	25	Portalegre	-28
11	Leiria	-1137	26	Évora	-127	11	Leiria	3000	26	Évora	-55
12	Oliveira do Hospital	-171	27	Beja	-57	12	Oliveira do Hospital	-37	27	Beja	-24
13	Mação	-31	28	Silves (tunes)	-44	13	Mação	-12	28	Silves (tunes)	-19
14	Nelas	-62	29	Grândola	-24	14	Nelas	-16	29	Grândola	-10
15	Gouveia	-64				15	Gouveia	-17			

Tabela 6.5, Oferta e procura

A *tabela 6.6* tem os valores da procura quando o cimento é produzido em Lisboa e em Setúbal. Quando a produção de cimento é feita em Lisboa a procura nas cidades mais próximas são maiores. Devido a população em lisboa se a produção do produto for feita fora da mesma a procura será sempre maior em Lisboa.

Procura e Oferta, Cimento (U.Q)											
Lisboa						Setúbal					
1	Valença	-32	16	Guarda	-136	1	Valença	-8	16	Guarda	-36
2	Braga	-310	17	Castelo Branco	-279	2	Braga	-80	17	Castelo Branco	-76
3	Guimarães	-458	18	Covilhã	-214	3	Guimarães	-116	18	Covilhã	-57
4	Porto	-825	19	Torres Vedras	-2690	4	Porto	-205	19	Torres Vedras	-279
5	Penafiel	-218	20	Lisboa	12000	5	Penafiel	-56	20	Lisboa	-2906
6	São João da madeira	-74	21	Setúbal	-2208	6	São João da madeira	-19	21	Setúbal	5000
7	Vila Real	-141	22	Abrantes	-359	7	Vila Real	-37	22	Abrantes	-83
8	Bragança	-76	23	Azambuja	-536	8	Bragança	-21	23	Azambuja	-75
9	Aveiro	-320	24	Sines	-99	9	Aveiro	-78	24	Sines	-41
10	Coimbra	-792	25	Portalegre	-133	10	Coimbra	-185	25	Portalegre	-39
11	Leiria	-1018	26	Évora	-417	11	Leiria	-214	26	Évora	-165
12	Oliveira do Hospital	-94	27	Beja	-185	12	Oliveira do Hospital	-24	27	Beja	-73
13	Mação	-47	28	Silves (tunes)	-135	13	Mação	-13	28	Silves (tunes)	-47
14	Nelas	-51	29	Grândola	-96	14	Nelas	-13	29	Grândola	-41
15	Gouveia	-53				15	Gouveia	-14			

Tabela 6.6, Oferta e procura

6.2.2 Rede rodoviária

A *figura 6.2* é rede rodoviária usada no estudo proposto neste capítulo. As coordenadas das cidades estão definidas na *tabela 7.2* e a distância entre as cidades é calculado pela regra de Pitágoras. Na rede apresentada assumimos que o único meio de transporte de mercadorias a circular são os camiões de carga, logo não foi estabelecido um limite de capacidade mínimo ou máximo para a rede. O custo de transporte aplicado na rede rodoviária depende do comprimento do arco que liga as cidades e a quantidade de mercadoria transportada no arco. O valor assumido para o transporte de mercadorias na rede rodoviária foi de $60U.M/Km/U.Q.$

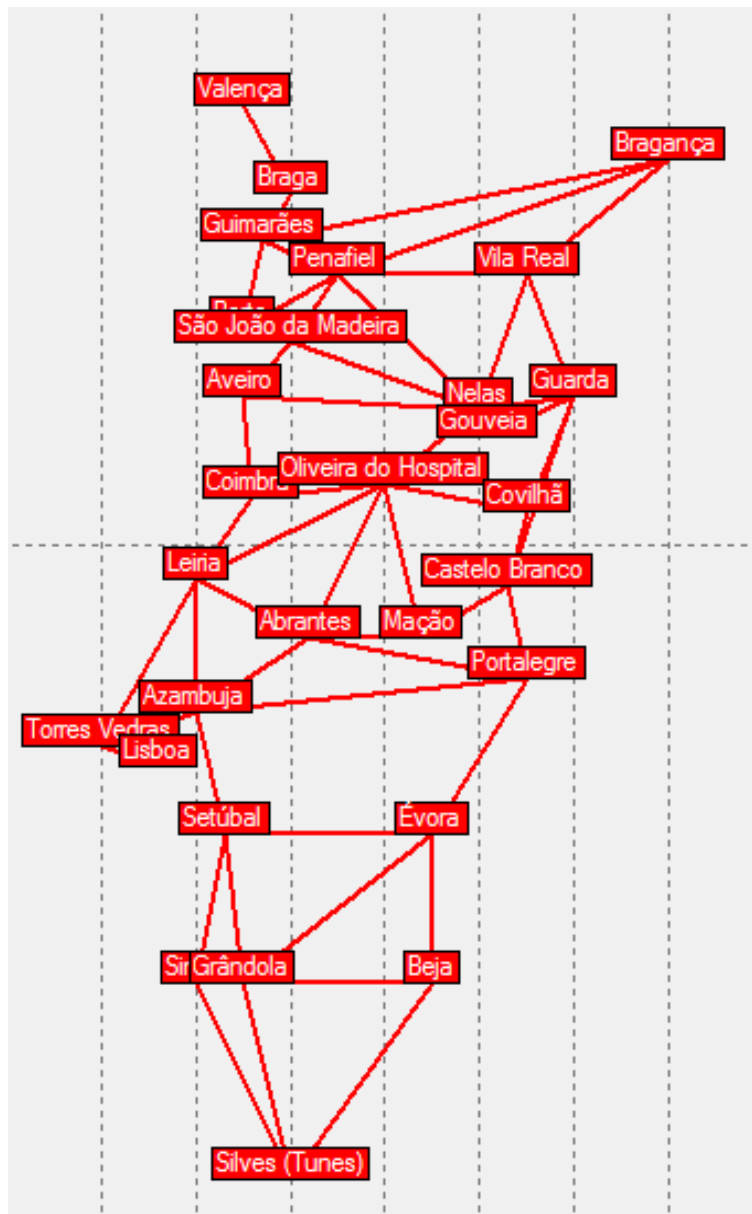


Figura 6.2, Rede rodoviária

6.2.3 Rede ferroviária

A *figura 6.3* é a rede ferroviária usada no estudo proposto neste capítulo. As coordenadas das estações estão definidas na *tabela 7.3* e a distância entre as estações é calculado pela regra de Pitágoras. Na imagem da esquerda é representada a sobreposição da rede ferroviária sobre a rede rodoviária o que demonstra a forma como se intercalam na zona costeira de Portugal. A rede ferroviária percorre o país de sul a norte mas com os carris situados sempre próximos das zonas costeiras. A ligação ao centro do país é feito pelas 3 perpendiculares a costa.

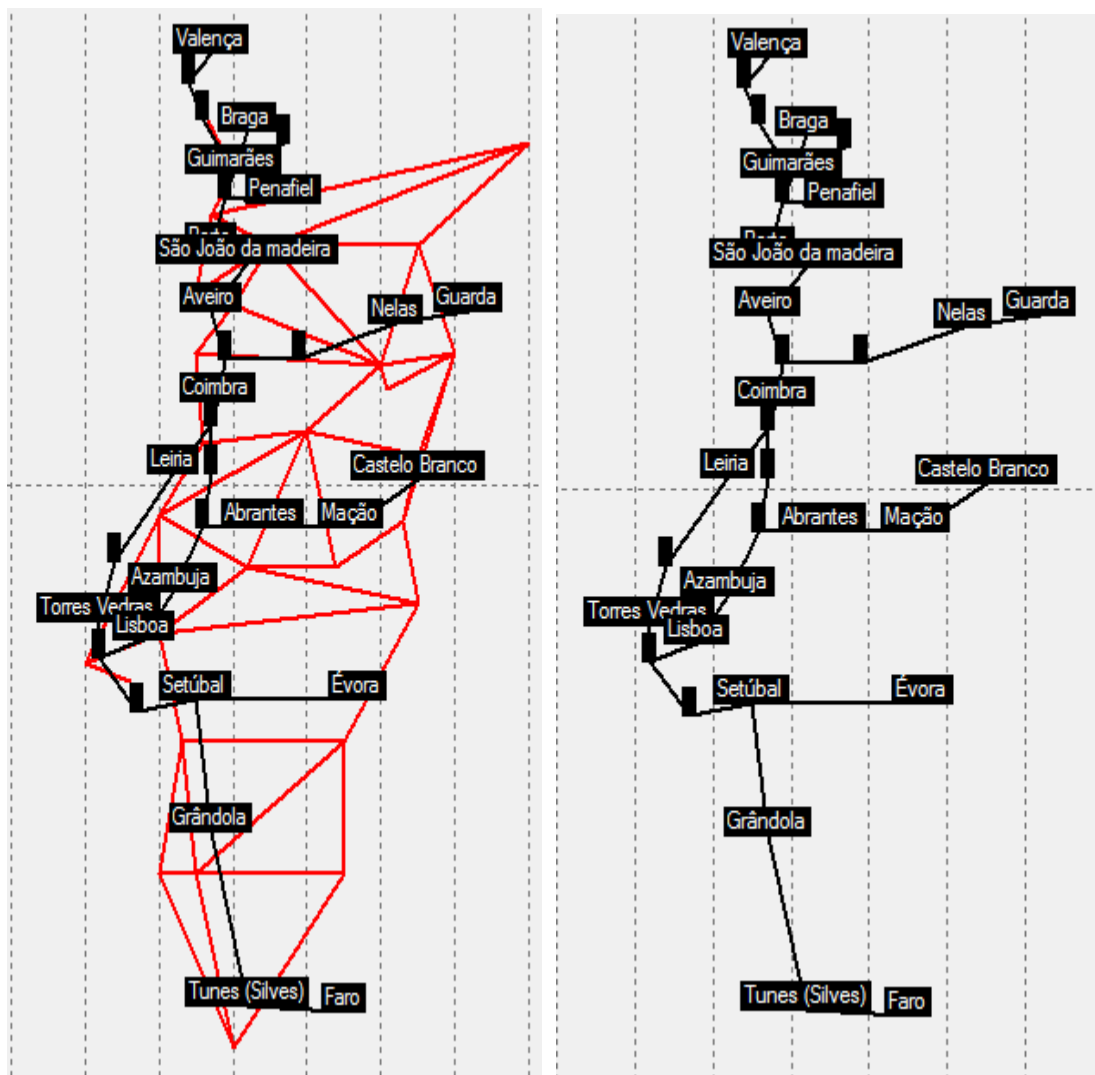


Figura 6.3, Rede ferroviária

Por se tratar de uma rede ferroviária o transporte será feito através de comboios de carga. Para tornar mais interessante a distribuição de carga pelas cidades propostas, decidimos aplicar limites de capacidades na rede ferroviária simulando o limite de carga máximo suportado pela rede e o limite mínimo de carga necessário para se poder usar a rede. O custo de transporte da mercadoria pela rede pode ser separado em duas ocasiões, a troca intermodal

e a viagem pela rede ferroviária. O custo do transporte da mercadoria pela rede depende do comprimento da rede e da quantidade de mercadoria transportada e consideramos metade do custo rodoviário 30 U.M /Km/U.Q . Na fase de ligação intermodal existe o carregamento modal que é uma das tarefas com maior custo numa rede intermodal, logo consideramos um valor dependente da mercadoria que é carregada e um custo fixo que depende da capacidade mínima e do custo variável. O custo variável é de 70 U.M por U.M carregadas e o custo fixo é dado pelo custo que teria carregar a capacidade mínima da rede, ou seja é igual ao custo variável a multiplicar pela capacidade mínima (por empresa).

Para o efeito do estudo de caso por termos dois tipos de mercadoria e por termos diversas cidades de produção optamos por criar dois tipos de capacidade mínima e máxima, uma que limita-se a quantidade que cada empresa (assumindo que em cada cidade produtora existe uma empresa) poderia introduzir na rede (capacidade por local de produção) e outra que limita-se a quantidade total mercadoria a entrar na rede (capacidade do arco).

Os limites de capacidade usados foram assumidos de forma aleatória e os valores escolhidos são os seguintes:

- Capacidade mínima por local de produção (empresa): 200 U.Q
- Capacidade mínima por arco: 500 U.Q
- Capacidade máxima por local de produção (empresa): 1500 U.Q
- Capacidade máxima por arco: 10000 U,Q

6.3 Resultados

Aplicando o estudo de caso no modelo proposto usando o xpress obtivemos os resultados apresentados a seguir:

- No transporte da cortiça

-A *figura 6.4* mostra o caminho percorrido pela cortiça quando é produzida em Portalegre. À azul é o caminho feito pela cortiça quando transportada na rede ferroviária e a verde é quando se usa a rede rodoviária para transportar a cortiça. O valor a verde é a oferta na rede.

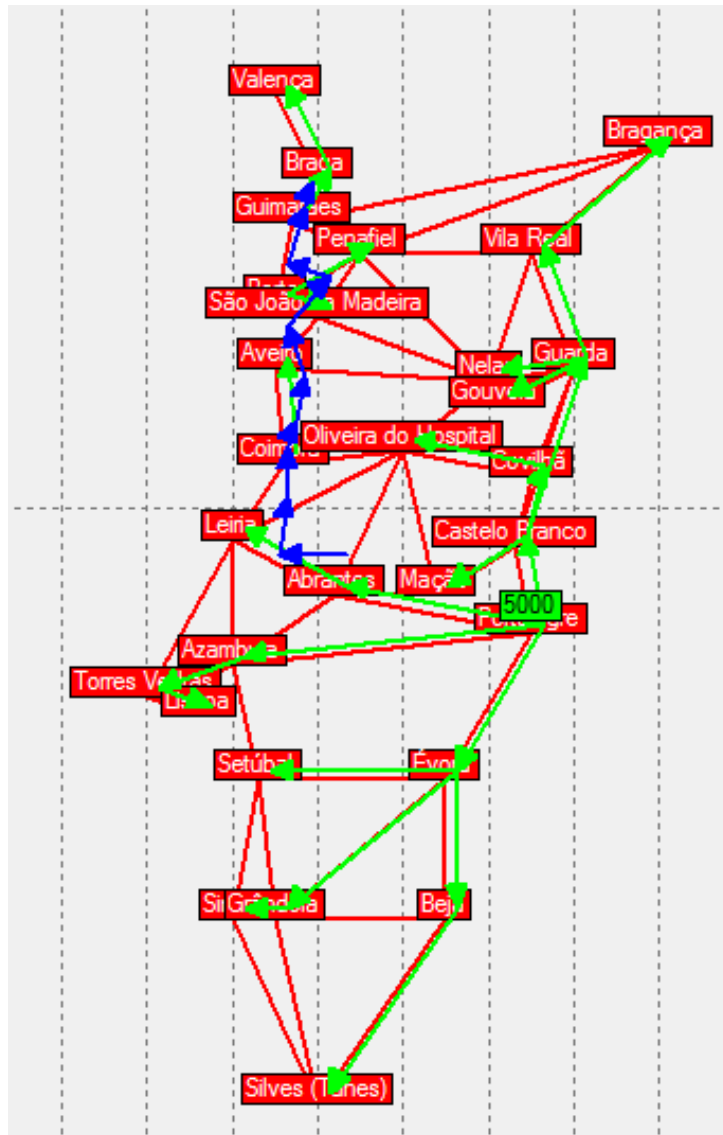


Figura.6.4, Transporte da cortiça com origem em Portalegre

Cortiça Portalegre				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	15	12	
Guimarães	Braga	162	74	
Porto	Penafiel	109	84	
Porto	S.J.M	36	12	
Vila Real	Bragança	43	58	
Coimbra	Aveiro	145	130	
Guarda	Vial Real	124	139	
Guarda	Nelas	33	20	
Guarda	Goveia	37	24	
Castelo branco	Mação	53	39	
Castelo Branco	Guarda	289	501	
Castelo Branco	Covilhã	254	170	
Covilhã	Oliveira do Hospital	59	55	
Torres Vedras	Lisboa	1274	513	
Abrantes	Leiria	317	285	
Abrantes	E.Abrantes	1389	97	140
Azambuja	Torres Vedras	1438	965	
Portalegre	Castelo Branco	976	828	
Portalegre	Abrantes	1863	2656	
Portalegre	Azambuja	1495	3171	
Portalegre	Évora	667	1003	
Évora	Setúbal	287	378	
Évora	Beja	118	156	
Évora	Grândola	48	86	
Beja	Silves(Tunes)	45	89	
Grândola	Sines	24	7	
E.Guimarães	Guimarães	376	26	140
E. Ermesinde	E. Guimarães	376	46	
E.Porto	Porto	523	37	140
E.Porto	E.Ermesinde	376	104	
E.S.J.M	E. Porto	898	1415	
E.Aveiro	E.S.J.M	898	254	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	898	222	
E.Coimbra	Coimbra	490	34	140
E.Coimbra	E.Pampilhosa	898	191	
E.Alforelos(Soure)	E.Coimbra	1389	172	
E.Pombal	E.Alfernelos (Soure)	1389	333	
E.Entroncamento	E.Pombal	1389	377	
E.Abrantes	E.Entroncamento	1389	333	
	Total	22589	15096	560
		Custo total	15656	

Tabela 6.7, Transporte da cortiça com origem em Portalegre

A *tabela 6.7* traduz em valores numéricos o que encontra representado graficamente na *figura 6.4*. Na tabela pode-se ver as quantidades transportadas em cada arco e os custos associados. Pode-se reparar pela combinação da imagem e da tabela que é usado a rede ferroviária para transportar carga as cidades mais distantes enquanto a rede rodoviária é usado

para transportar mercadoria para os pontos onde não chega a ligação ferroviária, e quando os limites de capacidade impedem de ser usado a rede ferroviária. Na *tabela 6.7* as células em azul claro representam os arcos ferroviários usados, as células em azul mais escuro representam as ligações intermodais e os arcos sem cor representam as ligações rodoviárias existentes. O máximo de carga transportado em um arco é $1863 U.Q$ com um custo de $2656 \text{ mil } U.M$ e acontece na ligação Portalegre Abrantes que está sublinhado a amarelo. O outro arco sublinhado a amarelo é o arco com menor circulação de carga, é a ligação Braga Valença que passa $15 U.Q$ com um custo de transporte de $12 U.M$. As células a castanho indicam os arcos com menor e maior custo, sendo o arco Portalegre→Azambuja com maior custo de transporte, $3171 \text{ mil } U.M$ para o transporte de $1495 U.Q$. Como pode-se reparar o arco que transporta a maior quantidade de mercadoria não é o com um custo de transporte maior, isso acontece devido ao facto do custo depender da quantidade transportada e da distância percorrida. O arco com menor custo de transporte é o arco Grândola→Sines onde existe um transporte de $24 U.Q$ por $7 \text{ mil } U.M$.

(S.J.M , São João da Madeira)

-A *figura 6.5* mostra o caminho percorrido pela cortiça quando é produzida em Évora. As cores dos arcos têm o mesmo significado que na *figura 6.4*.

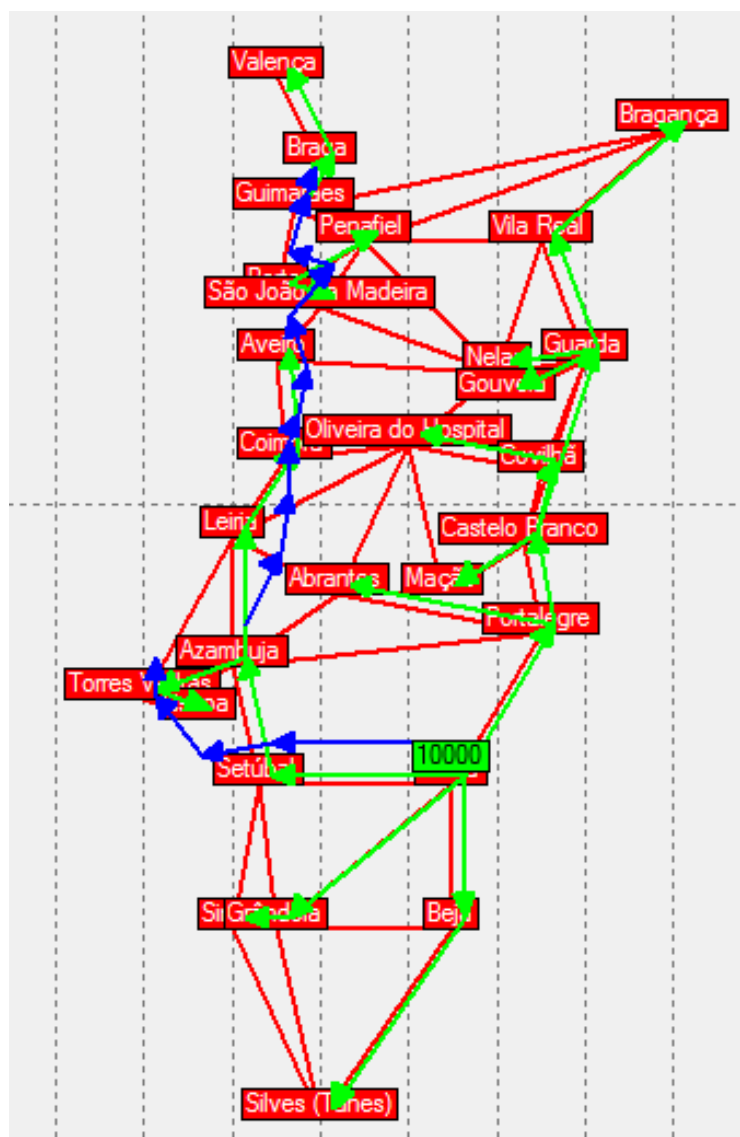


Figura 6.5, Transporte da cortiça com origem em Évora

Cortiça Évora				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	25	21	
Guimarães	Braga	267	122	
Porto	Penafiel	171	131	
Porto	S.J.M	56	18	
Vila Real	Bragança	67	92	
Coimbra	Aveiro	227	205	
Leiria	Coimbra	758	610	
Guarda	Vila Real	188	211	
Guarda	Nelas	44	27	
Guarda	Gouveia	47	30	
Castelo Branco	Mação	48	35	
Castelo Branco	Guarda	404	699	
Castelo Branco	Covilhã	282	189	
Covilhã	Oliveira do Hospital	76	71	
Torres Vedras	Lisboa	3536	1423	
Setúbal	Azambuja	5346	5853	
Azambuja	Leiria	1307	1568	
Azambuja	Torres Vedras	2456	1647	
Azambuja	E.Azambuja	1448	101	140
Portalegre	Castelo Branco	1027	872	
Portalegre	Abrandes	243	347	
Évora	Setúbal	6409	8460	
Évora	Portalegre	1460	2198	
Évora	Beja	454	599	
Évora	Grândola	177	315	
Évora	E.Évora	1500	105	140
Beja	Silves(Tunes)	138	270	
Grândola	Sines	83	25	
E.Guimarães	Guimarães	615	43	140
E.Ermesinde	E.Guimarães	615	76	
E.Porto	Porto	832	58	140
E.Porto	E.Ermesinde	615	170	
E.S.J.M	E.Porto	1448	234	
E.Aveiro	E.S.J.M	1448	410	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	1448	358	
E.Coimbra	E.Pampilhosa	1448	307	
E.Alfarelos	E.Coimbra	1448	179	
E.Pombal	E.Alfarelos	1448	347	
E.Entroncamento	E.Pombal	1448	393	
E.Torres Vedras	Torres Vedras	1500	105	140
E.Entrecampos	E.Torres Vedras	1500	270	
E.Azambuja	E.Entroncamento	1448	508	
E.Pragal(Almada)	E.Entrecampos	1500	463	
E.Setúbal	E.Pragal(Almada)	1500	371	
E.Évora	E.Setúbal	1500	990	
	Total	50005	31526	700
		Custo total	32226	

Tabela 6.8, Transporte da cortiça com origem em Évora

A tabela 6.8 traduz em valores numéricos o que encontra representado graficamente na figura 6.5. Na tabela pode-se ver as quantidades transportadas em cada arco e os custos associados. Pode-se reparar pela combinação da imagem e da tabela que é usado a rede ferroviária para transportar carga as cidades mais distantes enquanto a rede rodoviária é usado para transportar mercadoria para os pontos onde não chega a ligação ferroviária, e quando os

limites de capacidade impedem de ser usado a rede ferroviária. Na *tabela 6.8* as células pintadas e não pintadas têm o mesmo significado que as células na *tabela 6.7*. Neste caso temos um máximo de carga transportado por arco de 6409 U.Q na ligação Évora→Setúbal e tem um custo de transporte de 8460 mil U.M. A ligação onde é transportada menor mercadoria é no Braga→Valença com um transporte de 25 U.Q a custar 21 mil U.M. Neste caso os arcos com onde há o transporte de menor e maior mercadoria são os arcos onde o custo do transporte é maior e menor.

-A *figura 6.6* mostra o caminho percorrido pela cortiça quando é produzida em Beja.

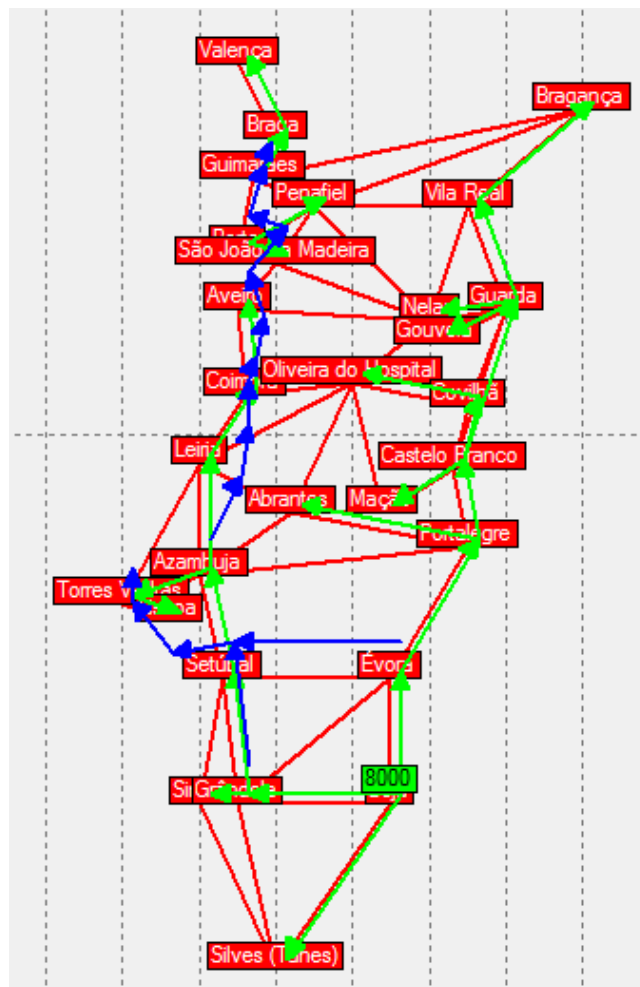


Figura 6.6, Transporte da cortiça com origem em Beja.

Cortiça Beja				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	22	18	
Guimarães	Braga	226	103	
Porto	Penafiel	140	108	
Porto	S.J.M	45	15	
Vila Real	Bragança	58	79	
Coimbra	Aveiro	180	162	
Leiria	Coimbra	270	217	
Guarda	Vila Real	157	176	
Guarda	Nelas	34	21	
Guarda	Gouveia	35	23	
Castelo Branco	Mação	28	20	
Castelo Branco	Guarda	324	562	
Castelo Branco	Covilhã	204	137	
Covilhã	Oliveira do hospital	55	52	
Torres Vedras	Lisboa	2606	1049	
Setúbal	Azambuja	3694	4045	
Azambuja	Leiria	669	802	
Azambuja	Torres Vedras	1434	962	
Azambuja	E.Azambuja	1500	105	140
Portalegre	Castelo Branco	750	636	
Portalegre	Abrantes	152	217	
Évora	Portalegre	1010	1519	
Évora	E.Évora	1500	105	140
Beja	Évora	3033	4004	
Beja	Silves(Tunes)	233	457	
Beja	Grândola	4734	5680	
Grândola	Setúbal	2974	3943	
Grândola	Sines	115	35	
Grândola	E.Grândola	1500	105	140
E.Guimarães	Guimarães	518	36	140
E.Ermesinde	E.Guimarães	518	64	
E.Porto	Porto	678	47	140
E.Porto	E.Ermesinde	518	143	
E.S.J.M	E.Porto	1195	193	
E.Aveiro	E.S.J.M	1195	338	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	1195	296	
E.Coimbra	Coimbra	305	21	140
E.Coimbra	E.Pampilhosa	1195	254	
E.Alfarelos (Soure)	E.Coimbra	1500	186	
E.Pombal	E.Alfarelos (Soure)	1500	360	
E.Entroncamento	E.Pombal	1500	407	
E.Torres Vedras	Torres Vedras	1500	105	140
E.Entrecampos	E.Torres Vedras	1500	270	
E.Azambuja	E.Entroncamento	1500	527	
E.Pragal (Almada)	E.Entrecampos	1500	463	
E.Setúbal	Setúbal	1500	105	140
E.Setúbal	E.Pragal(Almada)	1500	371	
E.Évora	E.Setúbal	1500	990	
E.Grândola	E.Setúbal	1500	994	
	Total	51499	31527	1120
	Custo tota		32647	

Tabela 6.9, Transporte da cortiça com origem em Beja.

A *tabela 6.9* traduz em valores numéricos o que encontra representado graficamente na *figura 6.6*. Na tabela pode-se ver as quantidades transportadas em cada arco e os custos associados. Pode-se reparar pela combinação da figura e da tabela que é usado a rede ferroviária para transportar carga as cidades mais distantes enquanto a rede rodoviária é usado para transportar mercadoria para os pontos onde não chega a ligação ferroviária, e quando os limites de capacidade impedem de ser usado a rede ferroviária. Na *tabela 6.9* as células

pintadas e não pintadas têm o mesmo significado que as células na *tabela 6.7*. Neste caso temos um máximo de carga transportado por arco de 4734 U.Q na ligação Beja→Grândola e tem um custo de transporte de 5680 mil U.M. A ligação onde é transportada menor mercadoria é no arco Braga→Valença com um transporte de 22 U.Q a custar 18 mil U.M. A ligação associada com o maior custo de transporte de mercadoria é a ligação Beja→Grândola que tem também a maior quantidade de carga transportada. A ligação por onde é transportado mercadoria com menor custo associado é a ligação Porto→S.J.M, tem um custo de 15 mil U.M e é transportado 45 U.Q. Neste caso a ligação que tem um transporte com menor custo não coincide com a ligação que se transporta menos mercadoria.

- No transporte do cimento

-A *figura 6.7* mostra o caminho percorrido pelo cimento quando é produzido em Coimbra

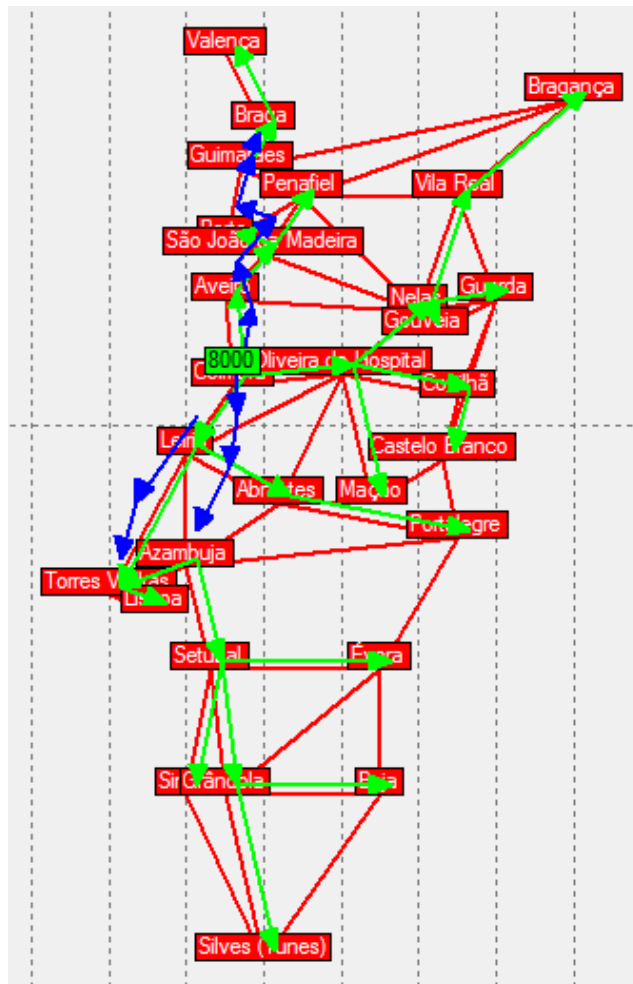


Figura 6.7, Transporte de cimento com origem em Coimbra

Cimento Coimbra				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	29	24	
Guimarães	Braga	343	157	
S.J.M	Porto	1147	371	
S.J.M	Penafiel	255	171	
Vila Real	Bragança	64	87	
Aveiro	S.J.M	1510	855	
Coimbra	Aveiro	2139	1929	
Coimbra	Leiria	3254	2619	
Coimbra	Oliveira do Hospital	1107	940	
Coimbra	E.Coimbra	1500	105	140
Leiria	Torres Vedras	328	529	
Leiria	Abrantes	290	261	
Leiria	E.Leiria	1500	105	140
Oliveira do Hospital	Mação	31	43	
Oliveira do Hospital	Nelas	467	416	
Oliveira do Hospital	Covilhã	439	409	
Nelas	Vila Real	204	253	
Nelas	Gouveia	64	16	
Nelas	Guarda	137	84	
Covilhã	Castelo Branco	226	152	
Torres Vedras	Lisboa	1606	646	
Setúbal	Sines	23	31	
Setúbal	Évora	127	167	
Setúbal	Gândula	125	165	
Abrantes	Portalegre	73	105	
Azambuja	Torres Vedras	16	11	
Azambuja	Setúbal	560	613	
Grândula	Beja	57	68	
Grândula	Silves(Tunes)	44	78	
E.Guimarães	Guimarães	846	59	140
E.Ermesinde	E.Guimarães	846	105	
E.Porto	E.Ermesinde	846	234	
E.S.J.M	E.Porto	846	137	
E.Aveiro	E.S.J.M	846	239	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	846	209	
E.Coimbra	E.Pampilhosa	846	209	
E.Coimbra	E.Alfarelos(Soure)	654	81	
E.Alfarelos(Soure)	E.Pombal	654	157	
E.Leiria	E.Bombarral	1500	765	
E.Pombal	E.Entroncameto	654	178	
E.Entroncameto	E.Azambuja	654	230	
E.Bombarral	E.Torres Vedras	1500	459	
E.Torres Vedras	Torres Vedras	1500	105	140
E.Azambuja	Azambuja	654	46	140
	Total	31357	14623	700
		Custo total	15323	

Tabela 6.10, Transporte de cimento com origem em Coimbra

A tabela 6.10 traduz em valores numéricos o que encontra representado graficamente na figura 6.7. Na tabela pode-se ver as quantidades transportadas em cada arco e os custos associados. Pode-se reparar pela combinação da figura e da tabela que é usado a rede ferroviária para transportar carga as cidades mais distantes da mesma forma que acontece no transporte de cortiça enquanto a rede rodoviária é usado para transportar mercadoria para os

pontos onde não chega a ligação ferroviária, e quando os limites de capacidade impedem de ser usado a rede ferroviária. Na *tabela 6.10* as células pintadas e não pintadas têm o mesmo significado que nas células nas tabelas anteriores. Nas tabelas representantes do transporte de cimento pela rede as cores azuis, castanho e amarelo têm o mesmo significado que nas tabelas de transporte de cortiça. No caso de a cidade produtora ser Coimbra, que é o apresentado neste parágrafo vamos ter os arcos com maior e menor transporte de mercadoria como os arcos onde se gastam mais e menos em transportar mercadorias. No arco Coimbra→Leiria é onde se gasta mais, 2619 mil U.M para transportar 3254 U.Q e no arco Azambuja→Torres Vedra gasta-se 11mil U.M para transportar 16 U.Q.

-A *figura 6.8* mostra o caminho percorrido pelo cimento quando é produzido em Leiria

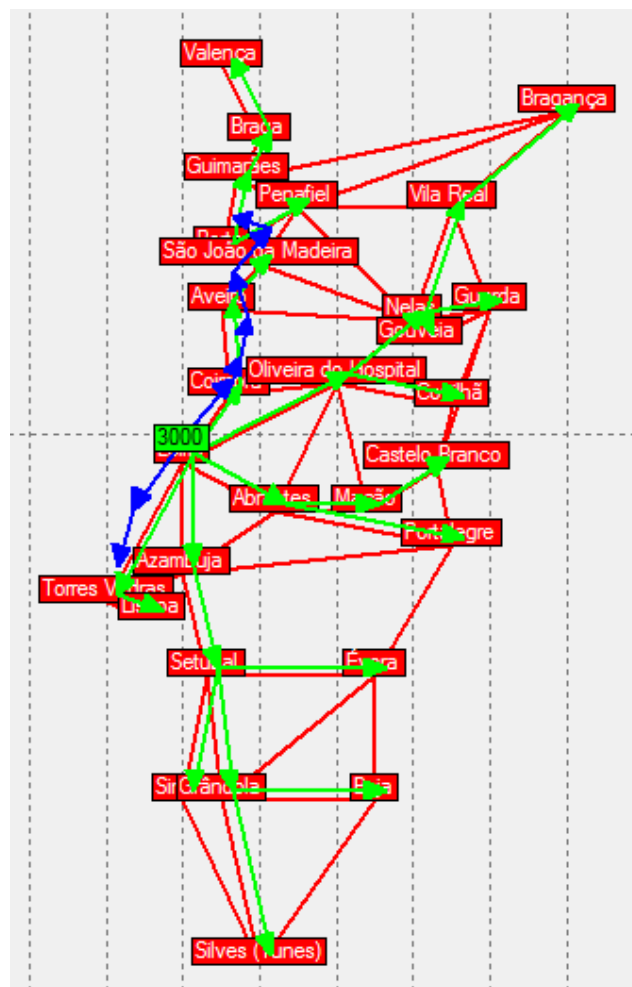


Figura 6.8, Transporte de cimento com origem em Leiria

Cimento Leiria				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	9	7	
Guimarães	Braga	100	46	
Porto	Guimarães	241	190	
Porto	Penafiel	68	27	
Vila Real	Bragança	20	27	
Aveiro	S.J.M	26	15	
Coimbra	Aveiro	154	139	
Leiria	Coimbra	633	510	
Leiria	Oliveira do Hospita	232	340	
Leiria	Torres Vedras	96	155	
Leiria	Abrantes	234	210	
Leiria	Azambuja	306	367	
Leiria	E.Leiria	1500	105	140
Oliveira do Hospital	Nelas	132	118	
Oliveira do Hospital	Covilhã	63	59	
Mação	Castelo Branco	76	55	
Nelas	Vila Real	60	74	
Nelas	Gouveia	17	4	
Nelas	Guarda	39	24	
Torres Vedras	Lisboa	870	350	
Setúbal	sines	10	14	
Setúbal	Évora	55	73	
Setúbal	Grândola	53	71	
Abrantes	Mação	89	64	
Abrantes	Portalegre	28	40	
Azambuja	Setúbal	258	283	
Grândola	Beja	24	29	
Grândola	Silves(Tunes)	19	33	
E.Porto	Porto	594	42	140
E.S.J.M	E.Porto	594	96	
E.Aveiro	E.S.J.M	594	168	
E.Pampilhos	E.Aveiro	594	147	
E.coimbra	E.Pampilhosa	594	126	
E.Alfarelos(Soure)	E.Coimbra	594	74	
E.Leiria	E.Alfarelos(Soure)	594	168	
E.Leiria	E.Bombarral	906	462	
E.Bombarral	E.Torres Vedras	906	277	
E.Torres Vedras	Torres Vedras	906	63	140
	Total	12288	5052	420
		Custo tota	5472	

Tabela 6.11, Transporte de cimento com origem em Leiria

A *tabela 6.11* traduz em valores numéricos o que se encontra representado graficamente na *figura 6.8*. No caso de a cidade produtora ser Leiria temos não um arco onde o transporte efetuado é mais caro mas sim um trecho de rede ferroviária em que a quantidade transportada é maior, trecho esse formado pela rede ferroviária que passa em

Leiria→Bombarral→Torres Vedras onde é transportado 906 U.Q com um custo de 462 mil U.M no trecho Leiria→Bombarral e 277 mil U.M no trecho Bombarral→ Torres Vedras. A ligação rodoviária Braga→Valença é onde se transporta menor quantidade de carga, 9 U.Q com um custo de 7 mil U.M. As arcos com menor e maior quantidade de carga transportado não são com maior e menor custo, o transporte com menor custo acontece na ligação Nelas→Gouveia onde é transportado 17 U.Q com um custo de 4 mil U.M. Na ligação Leiria→Coimbra gasta-se mais U.M em comparação com qualquer outro trecho da rede pelo transporte de 633 U.Q por 510 mil U.M

-A *figura 6.9* mostra o caminho percorrido pelo cimento quando é produzido em Lisboa

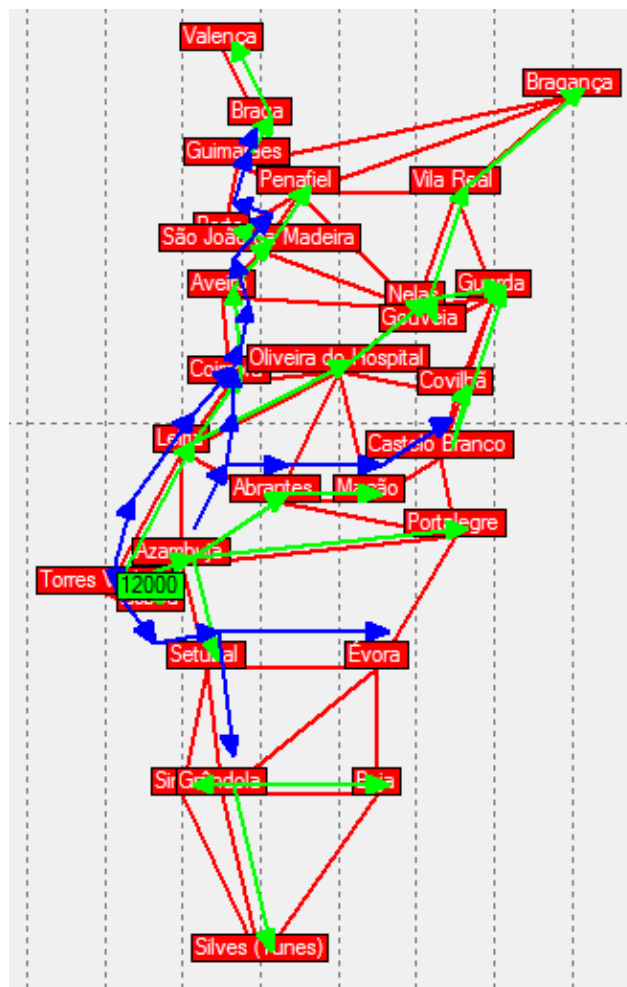


Figura 6.9, Transporte de cimento com origem em Lisboa

Cimento Lisboa				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	32	27	
Guimarães	Braga	343	157	
S.J.M	Porto	126	41	
S.J.M	Penafiel	218	146	
Vila Real	Bragança	76	104	
Aveiro	S.J.M	418	237	
Coimbra	Aveiro	738	666	
Leiria	Coimbra	1530	1232	
Leiria	Oliveira do Hospital	477	699	
Oliveira do Hospital	Nelas	383	342	
Nelas	Vila Real	217	268	
Nelas	Gouveia	53	13	
Nelas	Guarda	62	38	
Castelo Branco	Guarda	74	128	
Castelo Branco	Covilhã	214	144	
Torres Vedras	Leiria	3086	4888	
Torres Vedras	Azambuja	4784	3209	
Torres Vedras	E.Torres Vedras	1500	105	140
Lisboa	Torres Vedras	12000	4830	
Abrantes	Mação	47	34	
Azambuja	Setúbal	2208	2418	
Azambuja	Abrantes	406	396	
Azambuja	Portalegre	133	283	
Azambuja	E.Azambuja	1500	105	140
Grândola	Sines	99	30	
Grândola	Beja	185	222	
Grândola	Silves(Tunes)	135	238	
E.Guimarães	Guimarães	801	56	140
E.Ermesinde	E.Guimarães	801	99	
E.Porto	Porto	699	49	140
E.Porto	E.Ermesinde	801	222	
E.S.J.M	E.Porto	1500	242	
E.Aveiro	E.S.J.M	1500	425	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	1500	318	
E.Coimbra	E.Pampilhosa	1500	318	
E.Alfarelos(Soure)	E.Coimbra	1500	186	
E.Leiria	E.Alfarelos(Soure)	567	161	
E.Pombal	E.Alfarelos(Soure)	933	224	
E.Entroncamento	E.Pombal	933	253	
E.Entroncamento	E.Abrantes	567	136	
E.Abrantes	E.Mação	567	204	
E.Mação	E.Castelo Branco	567	205	
E.Castelo Branco	Castelo Branco	567	40	140
E.Bombarral	E.Leiria	567	289	
E.Torres Vedras	E.Bombarral	567	174	
E.Torres Vedras	E.Entrecampos	933	168	
E.Entrecampos	E.Pragal (Almada)	933	288	
E.Azambuja	E.Entroncamento	1500	527	
E.Pragal (Almada)	E.Setúbal	933	231	
E.Setúbal	E.Évora	417	275	
E.Setúbal	E.Grândola	516	342	
E.Évora	Évora	417	29	140
E.Grândola	Grândola	516	36	140
	Total	53646	26497	980
	Custo total		27477	

Tabela 6.12, Transporte de cimento com origem em Lisboa

A *tabela 6.12* traduz em valores numéricos o que se encontra representado graficamente na *figura 6.9*. Sendo a cidade produtora Lisboa com uma oferta de 12000 U.Q a distribuição é feita de forma idêntica com as outras cidades produtoras, é usado a rede ferroviária sempre que possível e a rede rodoviária faz o resto dos transportes de mercadoria. A principal curiosidade que salta a vista na *tabela 6.12* é o facto de ser transportado por

camião toda a mercadoria de Lisboa para Torres Vedras, que o torna o arco com maior quantidade de carga transportado por um custo de 4830 mil U.M, e depois é feita a distribuição a partir de Torres Vedras dando saída para os dois lados do mapa através da rede ferroviária e rodoviária. Apesar da ligação Lisboa→Torres vedras ser a ligação com maior quantidade transportada não é o arco onde o custo do transporte de mercadoria atingi o maior valor, este valor máximo é atingido na ligação Torres Vedras→Leiria onde se paga 4888 mil U.M para transportar 3086 U.Q. A ligação com menor transporte de carga é a ligação Braga→Valença com o transporte de 32 U.Q por um preço de 27 mil U.M. A ligação com menor custo de transporte é a de Nelas com Gouveia onde se gasta 13mil U.M para transportar 53 U.Q.

-A figura 6.10 mostra o caminho percorrido pelo cimento quando é produzido em Setúbal

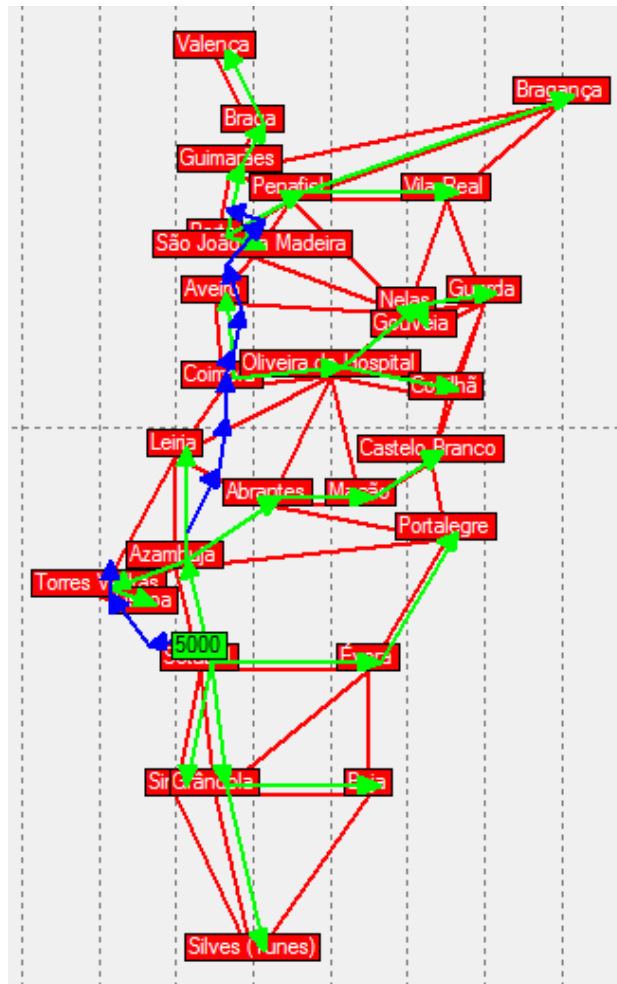


Figura 6.10, Transporte de cimento com origem em Setúbal

Cimento Setúbal				
i	j	U.Q	U.M (*1000)	
Braga	Valença	8	7	
Guimarães	Braga	88	40	
Porto	Guimarães	204	161	
Porto	Penafiel	113	87	
Porto	S.J.M	19	6	
Penafiel	Vila Real	37	45	
Penafiel	Bragança	21	48	
Coimbra	Aveiro	78	70	
Coimbra	Oliveira do Hospital	145	123	
Oliveira do Hospital	Nelas	64	57	
Oliveira do Hospital	Covilhã	57	53	
Mação	Castelo Branco	76	55	
Nelas	Gouveia	14	3	
Nelas	Guarda	36	22	
Torres Vedras	lisboa	2906	1169	
Setúbal	Azambuja	3094	3388	
Setúbal	Sines	41	54	
Setúbal	Évora	205	270	
Setúbal	Grândola	161	213	
Setúbal	E.Setúbal	1500	105	140
Abrantes	Mação	89	64	
Azambuja	Leiria	214	257	
Azambuja	Torres Vedras	1684	1130	
Azambuja	Abrantes	172	168	
Azambuja	E.Azambuja	949	66	140
Évora	Portalegre	39	59	
Grândola	Beja	73	88	
Grândola	Silves(Tunes)	47	82	
E.Porto	Porto	541	38	140
E.S.J.M	E.Porto	541	87	
E.Aveiro	E.S.J.M	541	153	
E.Pampilhosa	E.Aveiro	541	134	
E.Coimbra	Coimbra	407	29	140
E.Coimbra	E.Pampilhosa	541	115	
E.Alfarelos(Soure)	E.Coimbra	949	117	
E.Pombal	E.Alfarelos(soure)	949	228	
E.Entroncamento	E.Pombal	949	258	
E.Torres Vedras	Torres Vedras	1500	105	140
E.Entrecampos	E.Torres Vedras	1500	270	
E.Azambuja	E.Entroncamento	949	333	
E.Pragal(Almada)	E.Entrecampos	1500	463	
E.Setúbal	E.Pragal(Almada)	1500	371	
	Total	25042	10591	700
		Custo total	11291	

Tabela 6.13, Transporte de cimento com origem em Setúbal

A *tabela 6.13* traduz em valores numéricos o que se encontra representado graficamente na *figura 6.10*. Com a cidade produtora Setúbal podemos observar que os casos de maior e menor transporte de carga a passar por uma ligação acontece nos arcos Setúbal→Azambuja e Braga→Valença respetivamente. O com maior transporte de mercadoria transporta 3084 U,Q com o custo de 3388 mil U.M que também representa a

ligação com maior custo de transporte. A ligação Braga→Valença tem a menor quantidade de mercadoria transportada, 8 U.Q com um custo de 7 mil U.M mas mesmo assim não é o arco onde se gasta menos com o transporte de cimento, isso acontece na ligação Nelas→Gouveia onde se gasta 3 mil U.M para transportar 14 U.Q.

7. CONCLUSÃO

O objetivo desta dissertação era criar um modelo de minimização de custos com intermodalidade, capaz de simular a transferência de carga dentro de uma rede multimodal e garantir a sua funcionalidade e fiabilidade. Assumimos que o proposto foi cumprido tendo em conta que criamos o modelo, introduzimo-lo em um exemplo matemático e não constatamos erros relevantes capazes de tornar o resultado não aceitável. Depois de termos analisado exaustivamente o modelo tentando corrigir todos os erros ocorridos, apresentamos em seguida alguns exemplos mais relevantes que demonstram a utilidade e a versatilidade do modelo.

De forma a provar que o modelo pode ser aplicado em redes de dimensões reais, apresentamos um estudo caso baseado no mapa de Portugal, e o comportamento do programa nesta situação foi satisfatória, apresentando alguma dificuldade na apresentação gráfica dos resultados devido ao número elevado de nós nas redes (ferroviária e rodoviária). Nota-se que os limites impostos são respeitados e a procura é toda satisfeita.

Sendo assim o sugerido no objetivo do documento pode ser cumprido se for de interesse das entidades que podem ser beneficiadas de um estudo intermodal de redes.

8. REFERÊNCIAS

- CAIXETA-FILHO, J.V., MARTINS, R.S (2001), *Gestão Logística do Transporte de Cargas*, 1ª ed, ATLAS, Brasil.
- ARAÚJO, R.R (2003), *Um Modelo de Resolução Para Problemas de Roteirização em Arcos Com Restrição de Capacidade*, Dissertação de Mestrado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- FICO (2014), *X-press Use Guide*, Reino Unido.
- GOLDBARG, M.C., LUNA, H.P (2000), *Otimização Combinatória e Programação Linear- Modelos e Algoritmos*, Campos Editora, Brasil.
- POH, K.L., CHOOK, K.W., WON, C.G (2005), “A heuristic approach to the multi-period, multi-commodity transportation problem”, *Journal of Operation Research Society* 56: 708-718.
- ARNOLD, P., PEETERS, D., THOMAS, I. (2004), “Modelling a rail/road intermodal transportations system”, *Transportation Research Part E* 40: 255-270.
- MOPTC (2006) “*Portugal Logístico, Rede Nacional De Plataformas Logísticas*” Ministério de Obras Públicas, Transporte e Comunicações, Portugal.
- CHRISTOPHER, M. (2004), *Logistics and supply chain management*, Prentice-Hall, Reino Unido.
- GHIANI, G., LAPORTE, G., MUSMANNO, R. (2013), *Introduction to logistics systems management*, Wiley, Reino Unido.
- EISELT, H.A., SANDBLOM, C.L. (2000), *Integer programming and network models*, Alemanha.