

2 Revisão bibliográfica

Esta revisão bibliográfica apresenta o contexto científico no qual se insere este trabalho. Ela parte de conceitos abrangentes, como cadeia de suprimentos e o seu projeto, até chegar ao campo específico de atuação da ferramenta aqui exposta – otimização do projeto da cadeia de suprimentos de uma empresa de petróleo.

2.1 Projeto da cadeia de suprimentos

A necessidade de muitas empresas competirem hoje em um ambiente global fez com que a busca por melhores desempenhos financeiros e operacionais fomentasse o estudo da cadeia de suprimentos, reconhecendo esta como uma fonte de competitividade. Lambert & Cooper (2000) assinalam uma mudança de paradigma no qual as empresas não competem mais enquanto entidades isoladas, mas sim como cadeias de suprimentos.

A cadeia de suprimentos (também chamada de rede logística) é definida por Beamon (1998) como um processo integrado no qual diferentes entidades de negócios (fornecedores, fabricantes, atacadistas e varejistas) se unem para (1) adquirir matérias primas, (2) transformar essas matérias primas em produtos finais, (3) entregar estes produtos para o varejista. Tal processo é caracterizado por um fluxo de materiais para frente (do fornecedor para o varejista) e um fluxo de informações para trás (do varejista para o fornecedor). Mais recentemente, Min & Zhou (2002) também incluem a facilitação de troca de informações entre os membros da cadeia e a adição de valor aos produtos como objetivos da cadeia suprimentos.

Dentre os diversos aspectos que podem ser estudados de uma cadeia de suprimentos, um deles é o seu projeto (*Supply Chain Design – SCD*). Este se refere à estrutura da cadeia, ou seja, às ligações sequenciais entre as diferentes atividades e processos de fornecimento, produção e distribuição (Persson & Olhager, 2002). Decisões relacionadas ao projeto da cadeia de suprimentos envolvem questões como número de elos, localização, capacidades, tecnologias e integração vertical e visam, por exemplo, minimizar o custo total do sistema ou

maximizar o nível de serviço. Pesam sobre tais decisões forças opostas: o nível de serviço ao consumidor versus os custos de investimentos, produção, armazenamento, estoque e transporte.

Ademais, a escolha configuração da rede apropriada é uma decisão estratégica, pois tem um impacto duradouro na operação de uma empresa. Santos et al. (2005) reforçam a criticidade da decisão da configuração da cadeia de suprimentos devido ao significativo empenho financeiro durante um longo período de tempo.

Segundo Ballou (2001), a necessidade deste tipo de estudo provém da crescente expectativa dos consumidores sobre o serviço logístico, do alongamento dos canais de distribuição com a expansão do mercado global e das mudanças no padrão de demanda trazidas pelos movimentos de fusões e aquisições.

Para Shapiro (2001) o projeto da cadeia de suprimentos faz parte da formação da estratégia logística e por isso sugere a utilização de um framework conceitual para sua definição conforme exposto na Figura 1. Neste *framework*, o elemento estratégico que direciona o projeto e a operação da companhia é o nível de serviço. A partir dele, a rede logística poderá ser desenhada e sua estratégia estabelecida. Em seguida, serão definidos os elementos funcionais que dizem respeito a processos e sistemas para gestão de fluxos e de estoques de matéria prima, embalagens e produtos ao longo da rede. Finalmente, o último nível do *framework* consiste em estabelecer os recursos humanos, de tecnologia e de infraestrutura necessários para a execução da estratégia.



Figura 1 – Elementos da formação da estratégia logística. Fonte: Shapiro (2001).

Já Goetschalckx et al. (1994) descrevem as quatro etapas tradicionais para o projeto do sistema logístico estratégico conforme apresentado na Figura 2. A primeira delas também é o estabelecimento do nível de serviço, necessário para alcançar as estratégias de marketing e vendas estabelecidas pela companhia. Em seguida, é definida a alocação de produção e são tomadas decisões do tipo “fazer ou comprar”. A terceira etapa consiste em selecionar a rede de distribuição, decidindo o número e a localização dos centros de distribuição. Por último, é feita a alocação de clientes aos centros de distribuição segundo um modal de transporte.

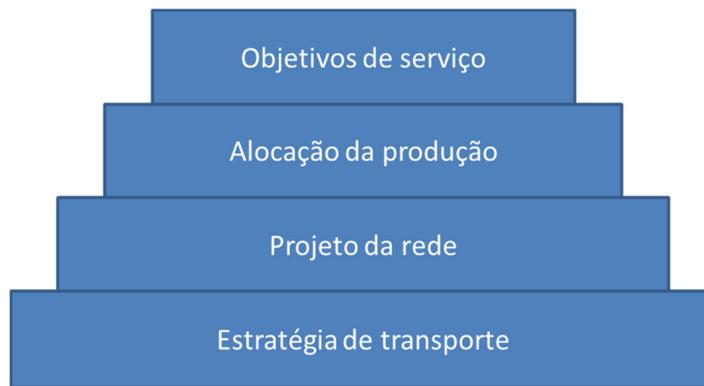


Figura 2 – Fases tradicionais do projeto do sistema logístico. Fonte: Autora, adaptado de Goetschalckx et al. (1994).

No entanto os autores ressaltam que focar exclusivamente em apenas uma das etapas de decisão acima leva a soluções sub-ótimas do projeto geral do sistema. Por isso os autores sugerem integrar as etapas de decisão conforme descrito na Figura 3.

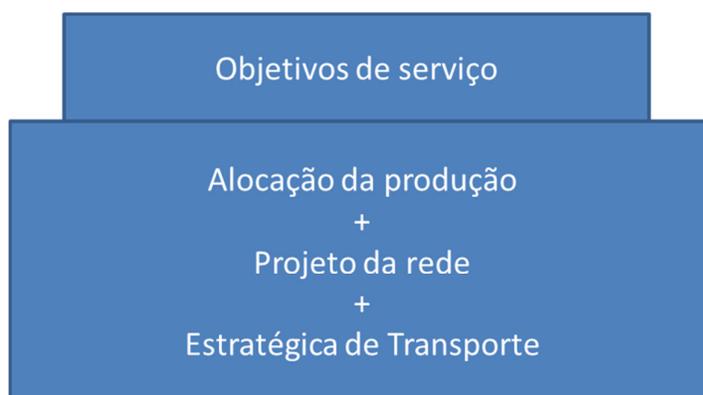


Figura 3 – Projeto do sistema logístico integrado moderno. Fonte: Autora, adaptado de Goetschalckx et al. (1994).

2.2 Otimização do projeto da cadeia de suprimentos

As três últimas etapas do projeto da cadeia logística descritas por Goetschalckx et al. (1994) comumente têm o apoio de ferramentas de programação matemática para auxiliar a escolha de uma determinada configuração da rede logística. Nos últimos cinquenta anos, o uso da programação

matemática para o estudo de sistemas industriais tem se intensificado graças ao desenvolvimento de novas técnicas e à evolução dos recursos computacionais. Dentre as ferramentas utilizadas, a otimização destaca-se como aquela que responde a grande parte dos problemas reais enfrentados por grandes corporações. Segundo Shapiro (2001), modelos de otimização fornecem uma análise profunda das opções de decisão, dos objetivos e das restrições de recursos de uma empresa.

Geoffrion & Powers (1995), ao fazerem uma análise da evolução dos vinte anos do uso de otimização para projeto do sistema estratégico de distribuição, apontam o crescimento da complexidade e do escopo dos temas ligados à logística como um dos motores dessa evolução. Além disso, a formalização dos profissionais que se dedicam a esta área fez com que estes reconhecessem a necessidade da modelagem dos processos logísticos.

Neste trabalho, dividem-se os modelos de otimização em quatro categorias:

- programação linear (PL): utiliza sistemas de equações lineares compostos por variáveis contínuas não negativas. Permite avaliações econômicas através do valor marginal e do custo reduzido;
- programação linear inteira mista (PLIM): é uma derivação dos modelos lineares porém incorpora variáveis inteiras não negativas. O uso de variáveis inteiras e mais especificamente de variáveis binárias se faz necessário quando é preciso representar, por exemplo, sequenciamento, economias de escala, custos fixos e seleção de opções de investimento;
- programação não-linear (PNL): surgem da necessidade da multiplicação variáveis, por exemplo variáveis que representam quantidade e variáveis econômicas;
- programação não-linear inteira mista (PNLIM): é uma derivação dos modelos não lineares, porém incorpora variáveis inteiras não negativas.

Cabe ressaltar que a introdução de variáveis inteiras ou de não linearidade na modelagem de um problema acarreta uma perda considerável de desempenho computacional.

A formulação de um problema também pode ser feita de acordo com o tipo de tratamento dado às incertezas dos dados de entrada: determinístico ou estocástico. Modelos determinísticos consideram os parâmetros de um modelo como fixos, ou seja, não sujeitos a variabilidade. Já os modelos estocásticos consideram que certos dados de entrada, por exemplo, preços de venda e demanda, como incertos e por isso sujeitos a flutuação. Neste caso, a modelagem do problema deve comportar este tipo de avaliação e para isso existem diferentes métodos, que não serão abordados nesta dissertação.

Todos os modelos de otimização descritos acima podem ser utilizados para modelar problemas de alocação de produção, escolha de rede de distribuição e alocação de clientes. No entanto o uso de cada um deles deve ser feito criteriosamente de acordo com a realidade específica da problemática avaliada, com os requisitos de detalhamento estabelecidos pelo usuário, com a disponibilidade de dados e ainda levar em conta a complexidade computacional e o tempo de processamento.

Em geral, os modelos de otimização do projeto da cadeia de suprimentos envolvem decisões do tipo sim ou não, como quais unidades devem operar em um determinado ano, quais não precisam funcionar, quais devem ter suas capacidades expandidas, qual modal de transporte deve ser selecionado etc. Tal tipo de decisão é modelado através de variáveis binárias.

A seção a seguir se dedica a apresentar alguns dos principais modelos de otimização do projeto da cadeia de suprimentos encontrados na literatura.

2.2.1

Modelos de otimização do projeto da cadeia de suprimentos

Geoffrion & Graves (1974) apresentaram um dos primeiros trabalhos descrevendo um modelo de otimização linear inteira mista para selecionar possíveis centros de distribuição em uma cadeia de suprimentos multi-produto

composta por três etapas (fábricas, centros de distribuição e zonas de consumo). Usando a técnica de decomposição de Benders, o modelo almeja determinar os centros de distribuição que serão utilizados, seus tamanhos, quais zonas de consumo cada um atenderá e os fluxos de produtos entre cada elo. As restrições envolvem o atendimento da demanda nas zonas de consumo, limites de capacidades nas fábricas e nos centros de distribuição, assim como restrições lógicas.

Fazendo uso da decomposição por objetivo primal (*primal goal decomposition*), Brown et al. (1987) desenvolvem um modelo PLIM para otimizar o projeto do sistema de produção e de distribuição da fabricante de biscoitos NABISCO de maneira a minimizar seus custos de produção e de transporte. Tal modelo visa alocar os equipamentos de produção primários (unidades de cozimento, fornos) e secundários (unidades de embalagem) a cada fábrica, determinar os níveis de produção de biscoitos de forma sequencial entre eles e repartir o atendimento aos clientes entre as diversas fábricas. A ferramenta apresentada também é capaz de selecionar novas fábricas, estabelecendo suas quantidades, seus equipamentos (primários e secundários) e sua localização. Além das restrições clássicas de atendimento da demanda e de limites de capacidade, este modelo também restringe o número de equipamentos de produção em cada fábrica.

Goetschalckx et al. (1994) propõem um modelo linear inteiro misto de minimização de custos de uma cadeia de suprimentos multi-produto, multi-etapas (zero, um ou mais centros de distribuição entre a fábrica e os pontos de consumo) e multicanal (diversos canais de transporte entre origem e destino). Além de resolver o problema de alocação da demanda nas diferentes fábricas, o modelo deve selecionar, entre os centros de distribuição com diferentes custos, capacidades de estoque e de movimentação, aqueles que resultam no menor custo para a cadeia. Estas decisões devem respeitar: os limites mínimos e máximos de capacidade de armazenagem nos centros de distribuição e de produção nas fábricas; a distância máxima entre centro de distribuição e o cliente; quantidades mínimas e máximas de transportadores e seus limites de carga em volume e em

peso; entre outras restrições gerais. Vale ressaltar que os centros de distribuição também desempenham a função de montagem de determinados produtos, o que faz com que a conservação de fluxos nestes seja descrita tal como uma “receita” de produção (por exemplo, $2 A + 3 B \rightarrow C$).

Arntzen et al. (1995) desenvolvem o *Global Supply Chain Model* (GSCM), modelo que avalia alternativas para a cadeia de suprimentos global e determina a estratégia de produção e de distribuição para uma fabricante multinacional de componentes eletrônicos. A incorporação de regras do comércio internacional, como taxas de importação, impostos, *drawback* e porcentagem de conteúdo local é muito importante na tomada de decisão da configuração da rede logística global de tal companhia. A função objetivo, além de considerar a questão financeira (custos) também avalia a dimensão temporal através da minimização dos tempos de produção e distribuição. Segundo os autores, este recurso é importante para empresas cujo produto possui um ciclo de vida curto e sofre rápida evolução tecnológica. Empresas com estas características não podem se permitir o uso de uma mesma estratégia durante um longo período de tempo.

Sabri & Beamon (2000) apresentam um modelo estocástico multi-objetivo que integra os planejamentos estratégico e operacional da cadeia de suprimentos. O uso de uma função multi-objetivo visa combinar os indicadores de desempenho: custo, nível de serviço e flexibilidade. As incertezas consideradas estão nos dados de demanda, *lead-time* de produção e *lead-time* de fornecimento. Decisões estratégicas envolvem a seleção de fábricas e centros de distribuição em uma cadeia com quatro estágios (fornecedores, fábricas, centros de distribuição e zonas de consumo) e os fluxos de materiais entre eles, além das variáveis que compõem a função multi-objetivo: custos e folga de capacidade de produção (flexibilidade de produção). Já as decisões operacionais se aplicam a uma cadeia com três estágios (fornecedores, fábricas e centros de distribuição) na qual são determinados tamanhos de lotes, pontos de ressuprimento, estoque de segurança, além das variáveis que compõem a função multi-objetivo: taxa de atendimento de pedidos (*order fill rate*) e folga no *lead-time* de entrega (flexibilidade de entrega).

Tsiakis & Papageorgiou (2008) aplicam um modelo PLIM, com maior detalhamento das restrições de produção, para analisar o projeto da cadeia de suprimentos global de uma empresa do setor químico. O modelo desenvolvido neste artigo considera a possibilidade de terceirizar parte da produção quando não há capacidade disponível nas plantas da companhia. Decisões estratégicas envolvem a seleção das fábricas e centros de distribuição que devem operar, havendo uma penalização para os fechamento de unidades. Decisões táticas envolvem o número de dias e a taxa de produção que uma fábrica produz um determinado produto, no período de um ano. A produção nas plantas está sujeita a restrições de número máximo de trocas de produto e de campanhas de um mesmo produto além de um número mínimo de dias de parada para manutenção. Ademais, para que haja uma distribuição homogênea da produção entre as diversas fábricas, existe um limite máximo para a diferença de utilização entre elas, quantificado em dias por ano. No estudo de caso, os autores analisam quatro cenários de operação para demonstrar os benefícios da otimização sobre a prática comum e sobre heurísticas:

- Otimização livre na qual todas as decisões estão a cargo do modelo;
- Otimização do fluxo em rede com o projeto da rede e a alocação da produção fixos;
- Otimização da rede com cada planta podendo produzir até três produtos alocados;
- Análise de sensibilidade da rede quanto a determinados parâmetros, como tempo de troca de produtos.

2.3

Otimização do projeto da cadeia de suprimentos da indústria química/petrolífera

Motivadas pela crescente complexidade dos seus planejamentos estratégicos, as indústrias química e petrolífera foram as pioneiras no desenvolvimento e no uso de ferramentas de programação matemática, e mais especificamente de modelos de otimização, para o planejamento de seus

investimentos. Grande parte destes modelos que são encontrados na literatura está limitada a avaliar a viabilidade de ampliação da capacidade da cadeia produtiva, principalmente dos processos dentro das unidades de produção. Estes consideram os diversos processos de produção como uma rede cujos elos possuem capacidade limitada e assim passível de expansão.

Sahinidis & Grossman (1991) descrevem um modelo PLIM para apoio a decisão de investimentos na cadeia de processos químicos de uma empresa. Tal ferramenta é capaz de avaliar as alternativas de aumento de capacidade para estes processos, tanto em termos de tamanho quanto em termos de tecnologia de processo a ser adotada – flexível ou dedicada, maximizando o valor presente dos projetos de investimento. Além disso, para cada período do horizonte de tempo analisado, são determinados os processos a serem utilizados ou desligados, os perfis de produção deles, as compras e as vendas de produtos químicos. Os mesmos autores propõem duas reformulações do modelo PLIM (Sahinidis & Grossman, 1992) a fim de acelerar o tempo de processamento. A primeira reformulação resulta em um modelo não linear que atinge boas soluções sub-ótimas. A segunda reformulação usa a relaxação linear do PLIM para acelerar o encontro da solução ótima.

Liu & Sahinidis (1995) desenvolvem um modelo PLIM multiperíodo para planejar a expansão e o desligamento de processos de produção em um complexo da indústria química de maneira a maximizar o valor presente líquido (VPL) dos projetos. Tal complexo é modelado como uma rede formada por conjuntos de processos de produção, de matérias primas, de produtos intermediários e de produtos finais. Os autores apresentam um estudo que aponta que o *gap* entre a solução da relaxação linear do PLIM e a solução do PLIM reduz à medida em que aumentam-se os períodos de tempo. Também é demonstrado que a incerteza nos preços e na demanda não provoca impactos significativos na solução do PLIM, desde que sejam permitidas revisões do planejamento através do ajuste dos níveis de produção e dos volumes de compra e venda. Liu & Sahinidis (1996a) abordam o mesmo problema no entanto utilizando um método de resolução baseado na aplicação de planos de corte à relaxação linear do PLIM, aumentando a eficiência

e a robustez da solução. A incorporação ao problema do tratamento da incerteza é feita através da formulação de um modelo estocástico de dois estágios (Liu & Sahinidis, 1996b). O método de resolução utilizado combina a decomposição de Benders com a simulação de Monte-Carlo. Neste trabalho, os autores ainda comparam os resultados do modelo estocástico aos resultados de uma formulação usando programação *fuzzy*, mostrando que a modelagem estocástica garante probabilisticamente soluções viáveis.

Iyer et al. (1998) apresentam um modelo PLIM para planejamento e programação de investimentos e operação da infraestrutura de exploração e produção de campos de petróleo *offshore*. As variáveis de decisão do modelo são: seleção dos reservatórios que serão explorados, a programação da perfuração dos poços e da instalação da plataforma, a definição da capacidade das plataformas e a taxa de produção de cada poço em cada período de tempo. Particularidades desta cadeia são contempladas pelo modelo tais como: restrições de pressão, não-linearidade do comportamento dos reservatórios, restrição do número de sondas de perfuração. Para viabilizar a resolução do problema é utilizada a estratégia de decomposição sequencial, agregando períodos de tempo e poços e depois desagregando-os.

Van den Heever & Grossman (1999) apresentam um modelo PNLIM, aplicado à indústria química, para desenho e planejamento da rede de processos de produção e análise das suas necessidades de expansão de capacidade. Variáveis binárias são utilizadas para refletir as seguintes decisões: a opção por investir em um processo, a utilização de uma unidade de processo em certo período e a sua necessidade de expansão de capacidade. As restrições às quais estão sujeitas estas decisões incluem balanços de massa e de calor, equações de desempenho de processo, ligações entre variáveis de períodos subsequentes e relações lógicas entre variáveis de processo e de decisão. Dois algoritmos são utilizados para a solução deste problema. O primeiro é o algoritmo baseado em lógica *Outer-Aproximation*, que faz interações entre o subproblema não-linear, com variáveis binárias fixas, e o PLIM no qual o modelo é linearizado nos pontos da solução não-linear. O segundo é um algoritmo de decomposição bi-nível, que separa um

nível para o problema de projeto da rede e outro para o planejamento e a operação desta.

Van den Heever et al. (2000) contemplam as questões logísticas da cadeia *upstream* de petróleo, tratando o problema de otimização do projeto da infraestrutura de exploração de campos de petróleo *offshore*, conforme mostra a Figura 4.

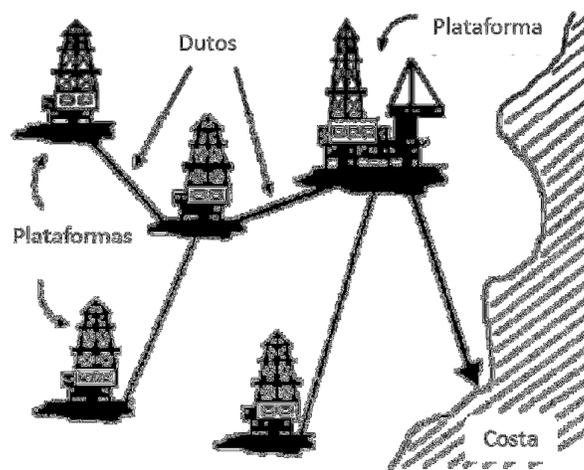


Figura 4 – Infraestrutura de campos de petróleo. Fonte: Van den Heever et al. (2000).

Para tratar este problema, os autores desenvolvem um modelo de PNLIM que visa maximizar o valor presente líquido dos investimentos sujeito a restrições de reservatório (não-lineares), de balanço de massa, de balanço de pressão e de condições lógicas. As variáveis de decisão discretas estão relacionadas a escolha das plataformas de produção, das de exploração e dos dutos nos quais se irá investir. Já as variáveis de decisão contínuas envolvem a capacidade destes elementos da rede. Este artigo aprofunda as questões econômicas associadas a exploração de petróleo como tarifas, impostos, taxas e royalties. Segundo os autores, negligenciar estas regras leva a soluções sub-ótimas, o que nesta indústria representa ganho ou perda de milhões de dólares.

Para tratar o projeto da rede logística *downstream* da cadeia de petróleo, Ross (2000) aborda o problema de alocação de recursos na cadeia de distribuição que atende a grandes clientes rurais tais como cooperativas de produtores. O

modelo apresentado seleciona as bases de distribuição que serão utilizadas na rede e também aloca os veículos de entrega a uma base e a um grupo de clientes, atendendo a parâmetros de desempenho estabelecidos pelo usuário como: número mínimo de entregas por veículo em cada viagem, utilização da capacidade do veículo e quilometragem total dos veículos dentro do horizonte de análise. Apesar de o autor tratar a questão do *downstream* da cadeia petrolífera, ele a aborda de maneira restrita, uma vez que não leva em conta toda a infraestrutura logística de distribuição de combustíveis, como terminais marítimos e dutos.

Ribas et al. (2010) apresentam duas abordagens para tratar a incerteza no planejamento estratégico da cadeia integrada de petróleo: a estocástica e a robusta. A ferramenta apresentada pelos autores avalia alternativas de investimento na infraestrutura de refino e de transporte considerando incertezas na produção de petróleo, na demanda de derivados e nos preços. Dessa forma são tomadas decisões de investimento em aumento de capacidade tanto na sub-cadeia *midstream* quanto na *downstream*, no entanto há maior enfoque nas questões relativas ao refino, com alto nível de detalhamento dos processos produtivos relativos a este. Os investimentos na infraestrutura logística se limitam ao aumento da capacidade de transporte nos arcos.

Tendo revisado alguns dos principais artigos dedicados a análise do projeto da cadeia de suprimentos de petróleo, é possível observar que pouca ênfase é dada ao estudo da cadeia logística desta indústria. Ribas (2007) corrobora esta afirmação ao classificar os modelos de planejamento da cadeia de petróleo segundo a sub-cadeia de aplicação (*upstream*, *midstream*, *downstream*) e ao nível de decisão e mostrar que nenhum modelo aborda as questões estratégicas associadas ao *downstream* da indústria petrolífera. Posto isto, este trabalho contribui com a literatura ao detalhar a rede logística da cadeia petrolífera, com foco na sub-cadeia *downstream*, através da incorporação de diversas de suas especificidades, tais como:

- Diversos modais de transporte: rodoviário, ferroviário, dutoviário, marítimo e aquaviário;
- A viscosidade de produtos no transporte através de dutos;

- A necessidade de mistura de certos produtos no transporte através de dutos devido à elevada viscosidade;
- A interdependência no investimento em ampliação de trechos de dutos, relevante para estudar a viabilidade de ampliações ou implantações sequenciais de segmentos de um mesmo duto;
- O custo de sobreestadia proporcional ao fluxo de produtos em terminais marítimos.

Pode-se afirmar assim que o modelo contempla importantes regras do negócio que não podem deixar de ser consideradas ao se estudar a viabilidade de investimentos na cadeia *downtream*. No Brasil hoje, grande parte dos investimentos previstos pelo setor estará direcionada para a infraestrutura logística. Esta representa um desafio, principalmente devido ao grande salto que a exploração dos campos do pré-sal dará nos próximos dez anos. Este trabalho pretende assim contribuir para responder a este desafio permitindo o uso de uma ferramenta adequada para a avaliação dos investimentos que se farão necessários.